



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



**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA CON TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO
DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE RADIO URBANO FM
DEL DISTRITO DE JULIACA PROVINCIA DE SAN ROMÁN,
REGIÓN PUNO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

JUAN VIDAL SUCASACA SUCASACA

PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PUNO - PERÚ

2022



DEDICATORIA

Dedico este tesis a miles de personas (jóvenes) de nuestra región, que se encuentran en una encrucijada en la vida por distintos factores de la vida, mucho que luchan para salir de la pobreza económica a ellos decirlos que la educación es la arma letal para cambiar su vida, familia y su patria no dejen de luchar por sus sueños estar siempre en dinamismo, nos harán más fuertes cumplir nuestras metas y seguir visionando lo que quizás no pudimos tener de niños pero cuando creces y obtienes fuerzas la tarea es seguir luchando una y otra vez la persistencia es la llave del éxito.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por ser mi guía espiritual en todo momento. A mi madre Sra. Francisca y padre sr. Felipe por ser mi principal motivación. Agradezco a mi asesor M.sc. marcos José Villanueva conejo, por guiarme y tenerme paciencia en este proyecto, desde el primer día que empezó este proyecto de tesis por brindarme su tiempo y acompañarme durante el desarrollo de la presente tesis. También agradezco a todos mis docentes de la escuela profesional de ingeniería mecánica eléctrica por habernos compartido sus mejores conocimientos con la mejor metodología de enseñanzas, decirlos a todos ellos muchas gracias.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ACRÓNIMOS

RESUMEN 11

ABSTRACT..... 12

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. HIPÓTESIS GENERAL 14

1.1.1. Hipótesis específicas..... 14

1.2. OBJETIVOS..... 15

1.2.1. Objetivo general..... 15

1.2.2. Objetivos específicos 15

1.2.3. Variables 15

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA..... 16

2.1.1. Funciones y objetivos básicos de una instalación de puesta a tierra 16

2.1.2. Necesidades del sistema 17

2.1.3. Naturaleza de la resistencia a la conexión a tierra 17

2.1.4. Capacidad de carga de corriente 21

2.2. COMPONENTES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA 23



2.2.1. Los conductores de tierra.....	23
2.2.2. Las varillas de tierra.....	24
2.2.3. Conectores	25
2.3. COMPOSICIÓN DEL TERRENO	26
2.3.1. Estratigrafía.....	27
2.3.2. La resistividad del suelo	28
2.3.3. Rangos de resistividad típicos	31
2.4. EFECTOS AMBIENTALES	32
2.4.1. Tratamientos químicos.....	34
2.4.2. Mejoradores Electroquímicos	35
2.5. MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA	37
2.5.1. Método de la pendiente.....	39
2.6. MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO	43
2.6.1. Métodos de medición de la resistividad.....	45
2.6.1.1. Método de dos puntos	46
2.6.1.2. Método de cuatro puntos	48
2.7. SEGURIDAD EN LA PUESTA A TIERRA	51
2.7.1. Resistencia del cuerpo humano	52

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES.....	54
3.1.1. Tipo de investigación.....	54
3.1.2. Técnicas de recolección de datos.....	55
3.1.3. Técnicas de análisis de datos	56
3.2. MÉTODO	57



3.2.1. Estimación de la Resistividad del terreno.....	57
3.2.1.1. Elementos necesarios para efectuar las mediciones	58
3.2.1.2. Modelado del Suelo	60
3.2.2. Cálculo de la Resistencia del sistema de puesta a tierra	62
3.2.3. Influencia del sistema de puesta a tierra tratado electroquímicamente	63
3.2.3.1 Método de medición del sistema de puesta a tierra	65

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ESTIMACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	69
4.1.1. Modelado del Suelo	76
4.2. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	80
4.3. INFLUENCIA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA TRATADO ELECTROQUÍMICAMENTE	81
V. CONCLUSIONES.....	86
VI. RECOMENDACIONES	87
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
ANEXOS.....	91

ÁREA: Eléctrica

TEMA: Puesta a tierra

FECHA DE SUSTENTACION: 10 de agosto de 2022



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Electrodo de tierra	19
Figura N° 2: Varilla de tierra.....	24
Figura N° 3: Conectores de tierra.....	26
Figura N° 4: Estratos del suelo.....	28
Figura N° 5: Esquema de la varilla.....	30
Figura N° 6: Variación de la resistividad	33
Figura N° 7: Método de tratamiento.....	37
Figura N° 8: Medición de la resistencia	39
Figura N° 9: Conexión del método de caída de potencial	40
Figura N° 10: Método de cuatro estacas para medir la resistividad del suelo.....	44
Figura N° 11: Sistema simétrico.....	49
Figura N° 12: Curva de resistencia típica.....	49
Figura N° 13: Sistema Asimétrico	50
Figura N° 14: Telurómetro KYORITSU Modelo 4105 A.....	56
Figura N° 15: Telurómetro KYORITSU Modelo DET4TC2.....	57
Figura N° 16: Esquema de instalación	58
Figura N° 17: Esquema de instalación	59
Figura N° 18: Ilustración del método de caída de potencial	66
Figura N° 19: Impedancia típica frente a la distancia de la sonda de potencial para el método de caída de potencial.....	67
Figura N° 20: Esquema de conexión del instrumento.....	68
Figura N° 21: Esquema de medición de resistividad de cuatro terminales	69
Figura N° 22: Esquema de instalación de los cables	70



Figura N° 23: Resistividad vs distancia trayectoria 1	72
Figura N° 24: Resistividad vs distancia trayectoria 2	73
Figura N° 25: Resistividad vs distancia trayectoria 3	75
Figura N° 26: Resistividad vs distancia trayectoria 4	76
Figura N° 27: Medida de la resistencia por caída de potencial	84



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Resistividad del terreno.....	31
Tabla N°2: Valores de resistividad del medio de puesta a tierra.....	32
Tabla N°3: valores de p/c para distintos valores de " μ "	42
Tabla N°4: Hoja de información Resistividad del terreno.....	60
Tabla N°5: Modelado Resistividad del terreno	62
Tabla N°6: Calculo de la Resistencia (R).....	63
Tabla N°7: Hoja de información cálculo de Resistencia con tratamiento	65
Tabla N°8: Hoja de información Resistencia	68
Tabla N°9: Resistividad del terreno trayectoria 1.....	71
Tabla N°10: Resistividad del terreno trayectoria 2.....	72
Tabla N°11: Resistividad del terreno trayectoria 3.....	74
Tabla N°12: Resistividad del terreno trayectoria 4.....	75
Tabla N°13: logaritmos naturales de las resistividades aparentes	77
Tabla N°14: Modelado Resistividad del terreno	79
Tabla N°15: Calculo de la Resistencia	81
Tabla N°16: Resistencia con tratamiento electroquímico	82
Tabla N°17: Resistencia con tratamiento electroquímico	83



ACRÓNIMOS

R_{CE-rod}	Resistencia producto del compuesto mejorador del suelo.
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.
PP_T	Es el valor leído de la tabla, correspondiente al μ calculado.
EC	distancia del electrodo de corriente.
X_i	Logaritmo natural de cada una de las medidas de resistividad.
x	Promedio o media del grupo de datos X_i .
R :	Resistencia de tierra en Ω
r	Radio del electrodo
l	Longitud de la varilla m



RESUMEN

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, el propósito principal es comprobar la influencia en el tratamiento de la puesta a tierra con aditivos electroquímicos, en el presente estudio se desarrolla un análisis del comportamiento del sistema de puesta a tierra aditivado con tratamiento electroquímico del sistema de comunicación de Radio Urbano FM del distrito de Juliaca Provincia de San Román, Región de Puno para conocer su efectividad y la importancia que tiene en el aspecto de seguridad ; Se estimó la resistividad del terreno, aplicando el método de los cuatro puntos y la disposición de espacios equidistantes también conocidos como el método de Werner recomendado por la norma IEEE Std 81-1983 y IEEE Std 81TM-2012, se tiene como resultado que la resistividad del terreno es de 70.21 Ohmios por metro, el cálculo de la resistencia de puesta a tierra que se ha obtenido como promedio de 22.59 Ohmios, teniendo en cuenta las mediciones realizadas y comparándolas con el cálculo realizado de la resistencia de puesta a tierra podemos concluir que el valor de la resistencia promedio de la puesta a tierra tratada electroquímicamente es 8.91 ohmios, con lo que se prueba la efectividad del tratamiento con el compuesto mejorador del terreno.

Palabras clave: Cemento conductivo, puesta a tierra, resistividad, resistencia, seguridad.



ABSTRACT

Grounding of electrical installations and equipment is an issue that affects several of the different disciplines involved in construction and electrical equipment, the main purpose is to check the influence on the treatment of grounding with electrochemical additives, in this study an analysis of the behavior of the grounding system with electrochemical additives treatment of the communication system of Radio Urbano FM in the district of Juliaca Province of San Roman, Region of Puno is developed to know its effectiveness and the importance it has in the safety aspect; The soil resistivity was estimated using the four-point method and the equidistant spacing arrangement also known as the Werner method recommended by the IEEE Std 81-1983 and IEEE Std 81TM-2012 standards, the result is that the soil resistivity is 70. 21 Ohms per meter, the calculation of the grounding resistance that has been obtained as an average of 22.59 Ohms, taking into account the measurements made and comparing them with the calculation made of the grounding resistance we can conclude that the value of the average resistance of the electrochemically treated grounding is 8 .91 ohms, thus proving the effectiveness of the treatment with the soil ameliorating compound.

Keywords: Conductive cement, grounding, resistivity, resistance, safety.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

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 educativo, centro comercial o industrial, y en las residencias el propósito principal es comprobar la influencia en el tratamiento de la puesta a tierra aditivados con el cemento conductivo o tratamiento 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 (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 presentará una propuesta nueva 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 Seguridad los sistemas de puesta a tierra deben conducir las corrientes de cortocircuito y descargas a tierra sin que se produzca una subida de tensión intolerable o tensiones de contacto.

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.

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 GENERAL

El tratamiento electroquímico del sistema de puesta a tierra permite reducir la resistencia del pozo tierra del sistema de comunicación.

1.1.1. Hipótesis específicas

La resistividad del terreno del centro de comunicaciones nos 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.

El sistema de puesta a tierra tratado electroquímicamente, garantiza la seguridad de protección tanto de las personas como de los equipos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Realizar el Análisis del comportamiento del sistema de Puesta a Tierra con tratamiento electroquímico para el sistema de Comunicación de Radio Urbano FM del distrito de Juliaca Provincia de San Román, Región de Puno.

1.2.2. Objetivos específicos

Estimar la resistividad según el estrato del terreno del centro de comunicaciones de Radio Urbano FM.

Calcular la resistencia del sistema de puesta a tierra del centro de comunicaciones.

Evaluar la influencia del sistema de puesta a tierra tratado electroquímicamente.

1.2.3. Variables

Las variables a ser analizadas son:

- Independientes:

Método de mejoramiento de conexión a tierra

- Dependientes:

Resistencia del pozo a tierra



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El sistema de puesta a tierra de un sistema eléctrico puede desempeñar diferentes funciones. (Manuel, Velásquez, Vanessa, & Lara, 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, Gonos, & Stathopulos, 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).

2.1.1. Funciones y objetivos básicos de una instalación de puesta a tierra

La función de la puesta a tierra (p.a.t) de una instalación eléctrica 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 impulsional, con ello, se logra:

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



- 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 Márquez, 1999).

2.1.2. Necesidades del sistema

El sistema de puesta a tierra en un sistema eléctrico puede desempeñar diferentes funciones en los sistemas eléctricos. 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 fuerte influencia del terreno donde se encuentran los electrodos, especialmente la resistividad eléctrica del suelo. 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 sistema, que está conectado a la tierra por conductores eléctricos. Para por ejemplo, las conexiones del neutro del transformador de un sistema de distribución eléctrica a los electrodos colocados 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).

2.1.3. Naturaleza de la resistencia a la conexión a tierra

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

- a) Resistencia del electrodo (de metal)
- b) Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo
- c) Resistencia del suelo, desde la superficie del electrodo hacia afuera, en la geometría establecida para el flujo de corriente hacia afuera del electrodo a la tierra infinita

Las dos primeras resistencias pueden hacerse relativamente pequeñas con respecto a la tercera y pueden ser desestimadas a todos los efectos prácticos. El tercer elemento, la resistencia del suelo, es el de se discutirá aquí.



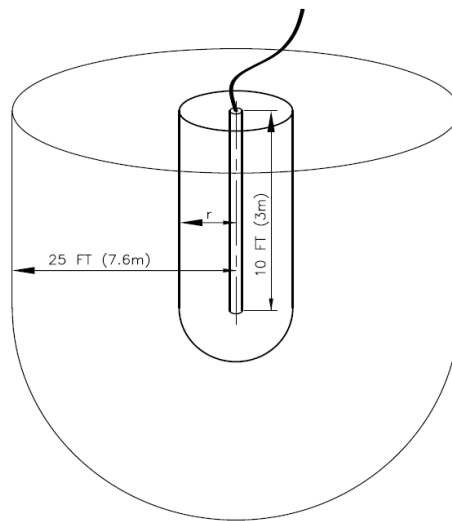
Como la Tierra es (relativamente) infinita en su tamaño, comparada con los sistemas de puesta a tierra como nosotros conocerlas, así como su capacidad de absorber un suministro virtualmente ilimitado de corriente. Prácticamente, sin embargo, esta corriente ilimitada a la tierra se transmite a través del metal interfaz electrodo-tierra de una manera que se describe mejor como sigue: (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 vara. La concha 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)

Para ayudar a visualizar esto, la figura 1 muestra una típica varilla de tierra. La trayectoria de la corriente del suelo hacia afuera de la superficie de la varilla consiste en sucesivas conchas cilíndricas y hemisféricas. A medida que la distancia de la varilla aumenta, también lo hace el área transversal de las proyecciones individuales. A medida que el área de las conchas aumenta, sus resistencias individuales en serie disminuyen de forma inversa a la superficie.

Figura N° 1: Electrodo de tierra.



Elaboración Propia

El sistema de puesta a tierra más avanzado puede no funcionar satisfactoriamente a menos que la conexión del sistema a la tierra es adecuada para la instalación en particular. A continuación, por lo tanto, la conexión de la tierra es una de las partes más importantes del conjunto sistema de conexión a tierra. También es la parte más difícil de diseñar.

La conexión a tierra o el sistema de electrodos necesita tener una resistencia suficientemente baja para reducir al mínimo la posibilidad de que se produzca una descarga para el personal que pueda estar en las proximidades del equipo, instalaciones, conductores o los propios electrodos como resultado de un rayo o el contacto involuntario de los conductores con conductores de mayor voltaje y para limitar sobretensiones transitorias.

El diseño de un electrodo de tierra de baja resistencia es de suma importancia para satisfacer los requisitos de los alimentadores del sistema de las empresas de servicios públicos, donde la ruta de retorno de la falla es a través del suelo. También, secundariamente, como un respaldo a los terrenos del equipo, que puede de vez en cuando



se abren los circuitos sin querer. Lógicamente, cuanto menor sea la resistencia del sistema de puesta a tierra, cuanto más adecuadamente se cumplan estos requisitos. Sin embargo, las instalaciones con los niveles más bajos disponibles de corriente de falla a tierra no requieren un valor tan bajo de puesta a tierra como lo hacen los sistemas más grandes con niveles más altos de corriente de falla de tierra. La tierra del sistema se puede obtener resistencias de menos de 1 ohmio mediante el uso de un número de electrodos conectados entre sí. Una resistencia tan baja sólo se requiere para las grandes subestaciones, líneas de transmisión, o estaciones generadoras. Las resistencias en el rango de 1 ohmio a 5 ohmios generalmente se encuentran adecuadas para subestaciones y edificios de plantas industriales y grandes instalaciones comerciales. (Rappaport & Mohla, 2007)

El valor de 25 ohmios anotado en el CNE se aplica a la resistencia máxima para un solo electrodo que consiste en una varilla, un tubo o una placa. Si se obtiene una resistencia más alta para un solo electrodo, se requiere un segundo electrodo de cualquiera de los tipos especificados en el CNE. Esto no debe interpretarse en el sentido de que 25 ohmios es un valor de resistencia satisfactorio para un sistema de puesta a tierra. (Rappaport & Mohla, 2007).

El Código Nacional De Electricidad Utilización menciona en la sección 060-712 Resistencia de Electroodos, lo siguiente:

“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 25 Ω . Cuando un electrodo simple, consistente en una varilla, tubería o placa, tenga una resistencia a tierra mayor de 25 Ω , 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”.



La regla 036.D. Sistemas con sólo una puesta a tierra (puesta a tierra en un punto o delta), de Código Nacional De Electricidad Suministro menciona lo siguiente:

La puesta a tierra con un solo electrodo deberá tener una resistencia a tierra que no exceda 25 ohms. Si la resistencia con un solo electrodo excede 25 ohms, deberán utilizarse otros métodos de puesta a tierra que permitan cumplir con este requerimiento.

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.

2.1.4. Capacidad de carga de corriente

Un factor que no debe pasarse por alto en el diseño de un sistema de tierra es la capacidad de carga actual de una conexión a la tierra. Las condiciones de temperatura y humedad que rodean inmediatamente al electrodo tienen un efecto directo en la resistividad de esta sección del circuito de puesta a tierra. Las corrientes que pasan del electrodo a la tierra tendrán un efecto definitivo sobre estas dos condiciones. Por lo tanto, la capacidad de carga de corriente de una conexión debe analizarse desde el punto de vista de la naturaleza del circuito de conexión a tierra y los tipos de carga que normalmente se puede esperar que lleve. (Rappaport & Mohla, 2007).

Las corrientes de baja magnitud, aunque sean de larga duración, darán lugar a un calentamiento relativamente escaso. El efecto de la conducción del calor y el flujo de la humedad debido a la acción capilar mantendrá, en la mayoría de los casos, la resistividad de la tierra en el electrodo cerca del valor original.



Cuando la tierra debe disipar altas corrientes durante breves períodos de tiempo, no se puede disipar una cantidad apreciable de calor por el proceso normal de conductividad térmica. La densidad de corriente permisible para un determinado aumento de temperatura es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad del suelo. Por consiguiente, la resistencia efectiva de la conexión a tierra depende del número de situaciones de ese tipo que podrían producirse sucesivamente antes de que se restablezcan las condiciones estables en la tierra.

Dado que aproximadamente el 25% de la resistencia de conexión a tierra de cada electrodo de la varilla se produce en un radio de 0,03 m de la superficie de la varilla, durante las fallas del sistema de alta energía puede producirse un grave calentamiento y vaporización de la humedad adyacente a las varillas. Cuando la humedad se disipa debido al calor extremo, la eficacia de la varilla en la tierra seca se reduce sustancialmente, y es probable que se produzca un arco eléctrico bajo la superficie del suelo. La ebullición de El agua del suelo produce vapor o humo en la superficie del suelo cerca del electrodo. Para evitar que los electrodos humeantes, una corriente máxima por metro de longitud de varilla para el sistema total de varillas no debe exceder los valores determinados por la ecuación:

$$I = \frac{1140 \times d}{\sqrt{\rho \times t}} \quad (1)$$

Donde

I = corriente máxima en amperios/metro

d = diámetro de la varilla en mm

ρ = resistividad de la tierra en ohm-cm



t = tiempo en segundos (típicamente un segundo)

Las corrientes terrestres de gran magnitud y larga duración son inusuales, pero podrían ocurrir como resultado de fallas en el terreno que no se despejan rápidamente. Si las corrientes terrestres de este tipo son previstas, el sistema debe cubrir una zona relativamente amplia y emplear un número suficiente de electrodos y conexiones de electrodos. Esto mantendrá la densidad de corriente en la tierra a un de bajo valor. (Rappaport & Mohla, 2007).

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:

- Los conductores de tierra.
- Los electrodos de conexión a tierra
- Los conectores

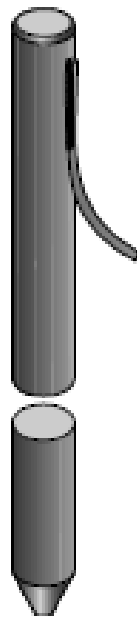
2.2.1. Los conductores de tierra

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

Están comúnmente disponibles como acero con cobre y acero galvanizado. Acero inoxidable sólido, cobre sólido y ocasionalmente también se utiliza el acero común. Las varillas también son disponibles con una coleta soldada de fábrica (Fig. 2). 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 N° 2: Varilla de tierra.



Elaboración Propia

Cuando el cobre está interconectado eléctricamente al acero en presencia de un electrolito, el acero se corroe para proteger el cobre. Como la proporción de acero y cobre en el sistema de puesta a tierra es normalmente grande, la cantidad de corrosión del acero



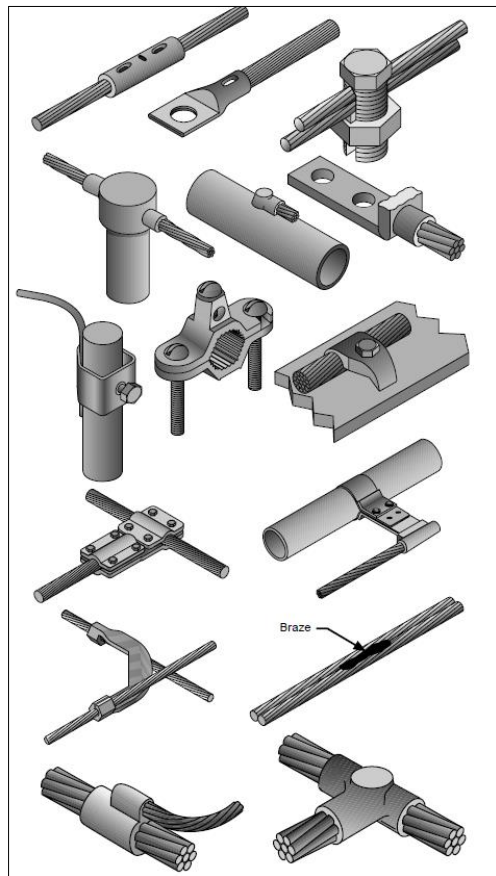
es normalmente tan pequeña que puede ser descuidada. Sin embargo, en los casos en los que la proporción de acero y cobre es pequeña, el aspecto de la corrosión debe ser considerado, por ejemplo, como en un con una barra de tierra y una conexión.

2.2.3. Conectores

Las conexiones a la varilla de tierra pueden ser tan importantes como la varilla misma. (Los conectores se discuten con más detalle en la siguiente sección.) A menudo, un gran conductor se conecta a una o dos varillas de tierra. En muchos casos, esto es un desbalance ya que la varilla no puede llevar tanta corriente como el conductor.

Para la mayoría de las aplicaciones de los conectores hay una elección de lo mejor. 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. Las conexiones a tierra llevan poca o ninguna corriente hasta que se produce una falla. Entonces, las corrientes pueden ser muy altas y la probabilidad de detectar un conector dañado es baja, ya que muchos de ellos están ocultos. El resultado es la degradación o el fallo del sistema. En el caso de los conectores ocultos detrás de las paredes o en el suelo, no hay forma de determinar si algo se ha degradado. La falla de un solo punto de conexión en una red de puesta a tierra puede ser peligrosa, y sin embargo pasar desapercibida durante años (Switzer, 1999).

Figura N° 3: Conectores de tierra.



Elaboración Propia

2.3. COMPOSICIÓN DEL TERRENO

La variación de la resistividad según la composición del terreno es muy acusada, tropezándose con la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están delimitadas como para saber, de antemano, el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la toma de tierra. Sucede, incluso, que, para una misma clase de terreno, situada en distintos parajes, la resistividad puede ser sensiblemente diferente. Los valores extremos que se encuentran en la práctica pueden variar de algunas decenas de $\Omega.m$, para terrenos orgánicos y húmedos a una decena de miles de Sim para granitos secos. (García Márquez, 1999)

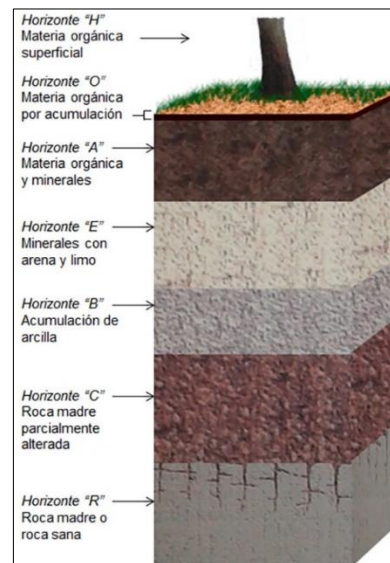


2.3.1. Estratigrafía

Los tipos de suelo básicos son cantos rodados, guijarros, grava, arena, limo y arcilla, definidos en términos de los rangos de tamaño de las partículas; a los que se añaden la arcilla orgánica, el limo o la arena y la turba. Estos nombres siempre se escriben en mayúsculas en la descripción del suelo. Las mezclas de los tipos de suelo básicos se denominan tipos compuestos.

Un suelo es de tipo básico de arena o grava (que se denominan suelos gruesos) si, después de la de los cantos rodados o rocas, más del 65% del material es de tamaños de arena y grava. Un suelo es de tipo básico de limo o arcilla (llamado suelos finos) si, después de la remoción de cualquier canto o rocas, más del 35% del material es de tamaños de limo y arcilla. Sin embargo, estos porcentajes deben considerarse como directrices aproximadas, no formando un límite rígido. Arena y la grava pueden subdividirse cada una en fracciones gruesas, medias y finas. El estado de la arena y la grava pueden describirse como bien graduado, mal graduado, uniforme o clasificado como brecha. En el caso de las gravas, la forma de las partículas (angular, subangular, sub redondeada, redondeada, plana, alargada) y la textura de la superficie (áspero, liso, pulido. Las partículas de grava suelen ser fragmentos de roca (por ejemplo, arenisca, esquisto). Arena Las partículas suelen estar compuestas por granos minerales individuales (por ejemplo, cuarzo, feldespato). Suelos finos deben ser descritos como limo o arcilla.(Craig, 2004).

Figura N° 4: Estratos del suelo.



Elaboración Propia

2.3.2. La resistividad del suelo

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.

Queda, pues, justificado que la resistividad de las capas superficiales de un terreno presente variaciones estacionales bajo el efecto del hielo y de la sequedad (que la aumentan) o de la humedad (que la disminuye). Esta acción puede hacerse notar hasta una profundidad de varios metros, en condiciones climáticas extremas y prolongadas.

Será, por tanto, prudente tener en cuenta estas variaciones de resistividad en el establecimiento de una red de tierras enterrada a una profundidad del orden de 1 metro.



Puede concluirse en que claramente se vé que la resistividad del terreno es una magnitud variable y que el único camino aceptable para conocer su valor consistirá en medirla, lo que permitirá establecer su magnitud en las condiciones existentes en cada caso.(García Márquez, 1999).

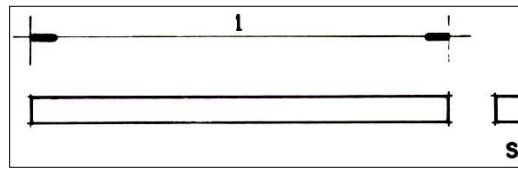
Se recomienda firmemente que la resistividad de la tierra en el lugar deseado de la conexión sea estudiada. La resistividad de los suelos varía con la profundidad desde la superficie, el tipo y la concentración de productos químicos solubles en el suelo, el contenido de humedad, y la temperatura del 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)

El terreno es mal conductor de la electricidad, si lo comparamos con los elementos conductores normalmente utilizados en las instalaciones eléctricas. No obstante, es un elemento conductor, por lo que las corrientes de defecto discurren a través de él, al no encontrar otro camino más favorable.

La resistividad de un terreno se mide con la ayuda de un telurómetro, siendo el método más generalizado el de Wenner, cuyo fundamento, justificación y forma de aplicación se describen en el Apéndice II de la presente obra.(Clemente, 1991).

Las resistividades del suelo y la roca en las que está enterrado el subsistema de electrodos de tierra, constituyen la limitación básica para lograr un contacto de baja resistencia con la tierra. 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.

Figura N° 5 :Esquema de la varilla.



Elaboración Propia

$$R = \rho \frac{l}{s} = \frac{E}{I} \quad (2)$$

Donde ρ : es la resistividad del material conductor, l es la longitud del camino para el flujo de la corriente en la tierra, A es el área de la sección transversal del camino conductor, I es el corriente en el electrodo, y E es el voltaje del electrodo medido con respecto al infinito.

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. 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.

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).

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{L}{L^2} = \left(\frac{\rho}{L}\right) \text{ ohms} \quad (3)$$

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.

Las unidades comunes de resistividad son ohm-cm y ohm-m. (EMCS et al., 1987).

2.3.3. Rangos de resistividad típicos

Una amplia variación de la resistividad se produce en función de los tipos de suelo, y el diseñador necesita una clasificación de los tipos de suelos en un lugar potencial para los electrodos de tierra. La Tabla 1 permite una rápida estimación de la resistividad del suelo, mientras que la Tabla 2 enumera los valores de resistividad medidos de una variedad de fuentes. (EMCS et al., 1987).

Tabla N°1: Resistividad del terreno

TIPO DE SUELO	RESISTIVIDAD (Ω - m)
Suelo orgánico húmedo	10
Suelo húmedo	100
Tierra seca	1000
Suelo con piedra	10000

Elaboración Propia

Tabla N°2: Valores de resistividad del medio de puesta a tierra

Valores de resistividad del medio de puesta a tierra		
Medio	RESISTIVIDAD (Ω -Cm)	
	MINIMA	MAXIMA
Suelos superficiales, limosos, etc.	100	500
Arcilla	200	1000
Arena y grava	5000	100000
La caliza de la superficie	10000	1000000
Calizas	500	400000
Pizarras	500	10000
Piedras areniscas	2000	200000
Granillo, basaltos, etc	5000	50000
Lagos de agua dulce	20000	20000000
Agua de grifo	1000	5000
Agua de mar	20	200

Elaboración Propia

2.4. EFECTOS AMBIENTALES

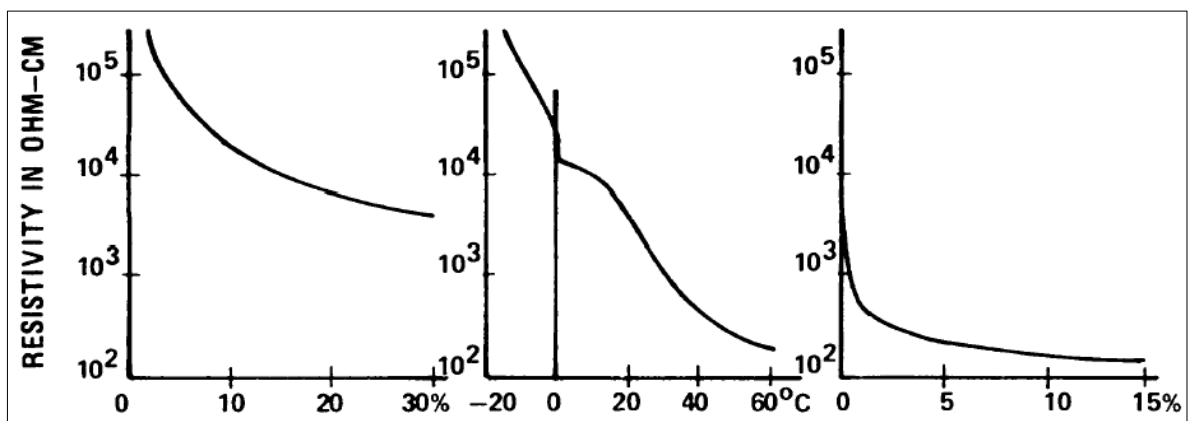
Además de la variación con los tipos de suelo, la resistividad de un determinado tipo de suelo variará varios órdenes de magnitud con pequeños cambios en el contenido de humedad, la concentración de sal y la temperatura del suelo. Son en gran medida estas variaciones en el suelo que causan la amplia gama de valores para cada tipo de suelo. En la figura 6 se muestran las variaciones observadas en un suelo determinado como humedad, sal, y el cambio de temperatura. Las curvas sólo

pretenden indicar tendencias otro tipo de suelo se esperaría que produjera curvas con formas similares, pero con valores diferentes.

La discontinuidad en la curva de temperatura (Figura 2-3(b)), indica que a temperaturas inferiores a la de congelación la resistividad del suelo aumentó notablemente. Este efecto de temperatura indeseable puede reducirse al mínimo los subsistemas de electrodos por debajo de la línea de congelación.(EMCS et al., 1987).

Variaciones típicas de la resistividad del suelo en función de la humedad, la temperatura y el contenido de sal.

Figura N° 6: Variación de la resistividad



a) Humedad

b) Temperatura

c) Sal añadida

Elaboración Propia



Tratamiento del suelo

La resistividad del suelo puede reducirse entre el 15% y el 90% mediante tratamiento químico (dependiendo del tipo y la textura del suelo). Hay un número de 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.

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. Mientras que los efectos positivos del tratamiento del suelo no se harán fácilmente evidentes, pueden ser acelerados por la saturación la zona con agua. Esto puede hacerse proporcionando un chorro de agua de las tuberías en el las ubicaciones de los electrodos. Además, este tratamiento no es permanente y debe ser repuesto periódicamente, según la naturaleza del tratamiento químico y las características del suelo. El tratamiento químico también tiene efectos adversos en la protección contra la corrosión del electrodo de tierra, que deben ser evaluados.

El tratamiento químico de los suelos es una solución activa al problema de los suelos de alta resistividad. Para que sea eficaz, se debe establecer un plan de mantenimiento regular para asegurar que se logre una puesta a tierra de baja resistencia.(Rappaport & Mohla, 2007).

2.4.1. Tratamientos químicos

Se pueden añadir sales para aumentar la conductividad del suelo, pero se trata de una solución temporal que debe renovarse cada año para mantener la elevada conductividad. Las varillas de tierra químicas pueden ayudar a capturar la precipitación y dirigirla a través de las sales, creando una solución salina dispersada en el suelo



circundante. También puede ser alimentado por un sistema de goteo cronometrado, si se dispone de agua doméstica.

Los aditivos químicos, como la sal común, el sulfato de cobre y/o el sulfato de magnesio, ayudarán a reducir el valor R (resistencia) para que pueda producirse alguna disipación (Recuerde, la potencia es I^2R .) Esto amortiguará el efecto, transformará la energía de la sobretensión en calor y aumentará el tamaño (volumen) del sistema terrestre. Los dos últimos productos químicos son menos corrosivos que la sal común. 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. Alrededor de 2 kilogramos de sales cubrirán 2 metros de un recorrido radial durante un año. Alrededor de 5 kg (mínimo) es necesario para cada barra de tierra. Asegúrate de que las sales son regadas o pueden ser arrastradas por el viento.

La encapsulación de elementos radiales en geles conductores o en materiales de carbono es una alternativa donde hay poco o ningún suelo. Existen productos comerciales para este uso. El gel de acrilamida, el gel de silicato y el gel de ferrocianuro de cobre se enumeran aquí en el orden de mayor conductividad; sin embargo, todos implican materiales tóxicos y/o peligrosos. Una alternativa fácil es usar hormigón para hacer un suelo artificial. (Rand, 2000).

2.4.2. Mejoradores Electroquímicos

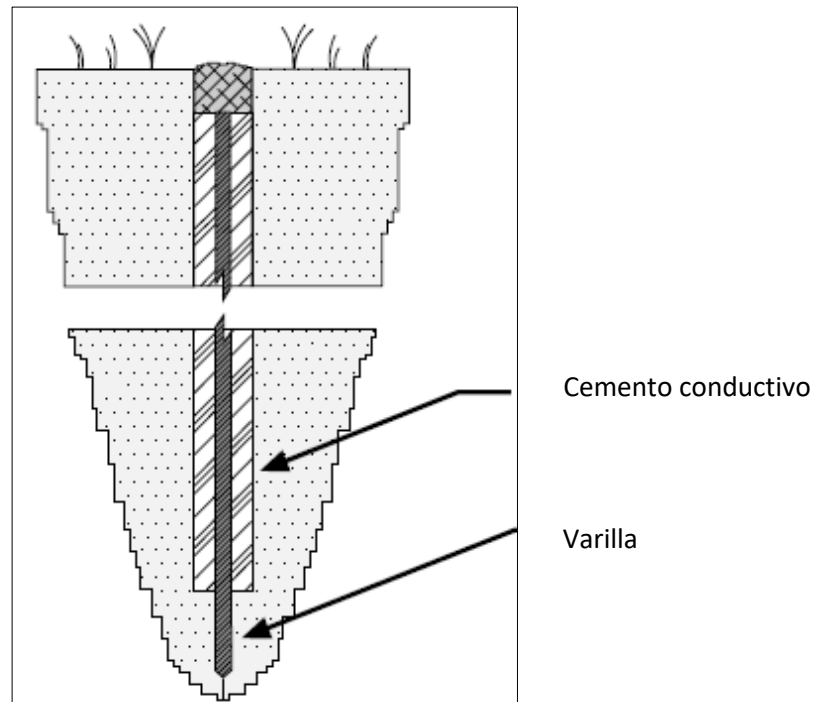
Si la resistividad del suelo es muy alta, se utiliza un material de relleno alrededor de la varilla del suelo para bajar la resistencia del sistema. Hay que tener cuidado al elegir el material utilizado. Debe ser de un material compatible con la varilla de tierra, el conductor y el material de conexión.



Hay varios materiales disponibles para reducir la resistencia del electrodo de varilla instalado. 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. Esto, en efecto, aumenta el diámetro de la varilla. A continuación se presentan algunos de los materiales que se utilizan comúnmente como materiales de mejora del suelo junto con sus resistividades: (Switzer, 1999).

- Hormigón : 3000 a 9000 ohm-cm (30 -90 ohm-m)
- 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 : 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 N° 7: Método de tratamiento



Elaboración Propia

2.5. MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA

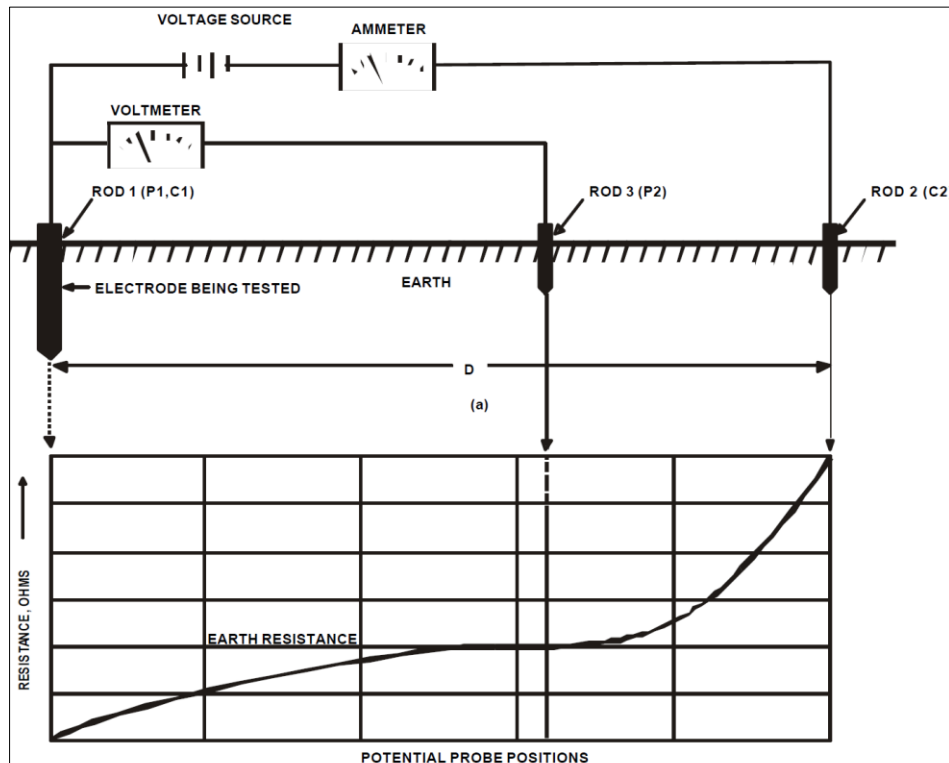
No hay ningún sustituto para una caída real del potencial de la medición en un sistema de tierra. La mayoría las técnicas e instrumentos de medición son similares y tienen fallas similares. Las técnicas actuales utilizan equipo con CC de estado estable o (más a menudo) formas de onda de la fuente de corriente alterna de baja frecuencia. Ninguna de ellas se acerca a la simulación de la dinámica condiciones de sobrecarga (como el rayo) en las que se desarrollan caídas de tensión inductivas. Los problemas se minimizarían si las múltiples inductancias paralelas (radiales con varillas) fueron incorporadas en el diseño y la disposición del sistema de tierra. Las inductancias paralelas disminuyen la inductancia del sistema en general, mejora la respuesta transitoria del sistema, y reduce el aumento del potencial del suelo durante un "evento".



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. Esto se puede hacer en cualquier probador de cuatro puntas uniendo P1 y C1 juntos. El espacio inicial entre los electrodos P1, C1 y C2 para un simple electrodo podrían ser de aproximadamente 30 metros, mientras que para el total de sistema de conexión a tierra podría ser de 300 m. El actual el espaciamiento puede aumentar o disminuir dependiendo sobre el tamaño del sistema de puesta a tierra siendo medido y los resultados del electrodo móvil P2.

El objetivo es mover el electrodo P2 a intervalos discretos a lo largo de una línea entre los electrodos P1, C1 y C2 y registrar/trazar la medición de voltaje. Es necesario localizar el área de la curva en la que el movimiento del electrodo P2 tiene poco o ningún efecto en la tensión medida, normalmente a un 61,8% de la distancia entre P1, C1 y C2. La mayoría de los instrumentos modernos convierten las lecturas de tensión directamente a $(R = E/I)$ Ohmios. (Impedancia si una fuente de corriente alterna).(Rand, 2000).

Figura N° 8: Medición de la resistencia



Elaboración Propia

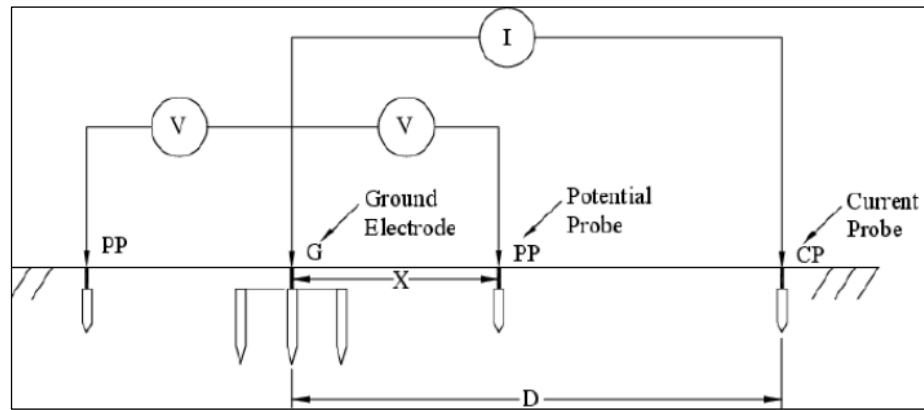
2.5.1. Método de la pendiente

Para la medida de la resistencia de puesta a tierra el Dr. G. F. Tagg, describió un método conocido como "método de la pendiente". la forma de conexión del equipo es como en el método de caída de potencial. El electrodo de corriente debe ubicarse a una distancia EC desde el sistema de puesta a tierra bajo medida, esta se sugiere de dos 2 a 3 veces la dimensión máxima del sistema de puesta a tierra.

Se puede resumir como sigue:

- Elija un punto de partida conveniente para las mediciones lineales y seleccione una distancia adecuada para el CP.

Figura N° 9: Conexión del método de caída de potencial



Elaboración Propia

- b) Medir las resistencias R_1 , R_2 y R_3 , a distancias EP iguales a 0,2CP, 0,4CP y 0,6CP respectivamente.
- c) Calcula el coeficiente de variación de la pendiente.

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} \quad (4)$$

Donde,

R_1 EP es 20% de EC.

R_2 EP es 40% de EC.

R_3 EP es 60% de EC.

- d) A partir de los valores obtenidos se busca el valor correspondiente al valor " μ " en la tabla 1. μ es una medida del cambio de la pendiente de la curva de resistencia del electrodo de puesta a tierra bajo estudio.

Al valor calculado de μ corresponde un valor PP_T/CP indicado en la tabla 3.

P_T es la distancia a la cual debe ser ubicado el electrodo de potencial para medir la resistencia de puesta a tierra real. Puesto que C ya es conocido, se calcula la distancia a la cual debe ser reubicado el electrodo de potencial así:



$$EP = P_T = \frac{PP_T}{C} EC \quad (5)$$

Donde,

PP_T Es el valor leído de la tabla, correspondiente al μ calculado.

EC Es la distancia del electrodo de corriente.

- e) Mide la resistencia colocando la sonda de potencial a distancia PP_T hallado.



Tabla N°3: valores de p/c para distintos valores de " μ "

Valores de p/c para distintos valores de " μ "					
μ	PPt/CP	μ	PPt/CP	μ	PPt/CP
0.4	0.643	0.8	0.58	1.2	0.494
0.41	0.642	0.81	0.579	1.21	0.491
0.42	0.64	0.82	0.577	1.22	0.488
0.43	0.639	0.83	0.575	1.23	0.486
0.44	0.637	0.84	0.573	1.24	0.483
0.45	0.636	0.85	0.571	1.25	0.48
0.46	0.635	0.86	0.569	1.26	0.477
0.47	0.633	0.87	0.567	1.27	0.474
0.48	0.632	0.88	0.566	1.28	0.471
0.49	0.63	0.89	0.564	1.29	0.468
0.5	0.629	0.9	0.562	1.3	0.465
0.51	0.627	0.91	0.56	1.31	0.462
0.52	0.626	0.92	0.588	1.32	0.458
0.53	0.624	0.93	0.556	1.33	0.455
0.54	0.623	0.94	0.554	1.34	0.452
0.55	0.621	0.95	0.552	1.35	0.448
0.56	0.62	0.96	0.55	1.36	0.445
0.57	0.618	0.97	0.548	1.37	0.441
0.58	0.617	0.98	0.546	1.38	0.438
0.59	0.615	0.99	0.544	1.39	0.434
0.6	0.614	1	0.542	1.4	0.431



0.61	0.612	1.01	0.539	1.41	0.427
0.62	0.61	1.02	0.537	1.42	0.423
0.63	0.609	1.03	0.535	1.43	0.418
0.64	0.607	1.04	0.533	1.44	0.414
0.65	0.606	1.05	0.531	1.45	0.41
0.66	0.604	1.06	0.528	1.46	0.406
0.67	0.602	1.07	0.526	1.47	0.401
0.68	0.601	1.08	0.524	1.48	0.397
0.69	0.599	1.09	0.522	1.49	0.393
0.7	0.597	1.1	0.519	1.5	0.389
0.71	0.596	1.11	0.517	1.51	0.384
0.72	0.594	1.12	0.514	1.52	0.379
0.73	0.592	1.13	0.512	1.53	0.374
0.74	0.591	1.14	0.509	1.54	0.369
0.75	0.589	1.15	0.507	1.55	0.364
0.76	0.587	1.16	0.504	1.56	0.358
0.77	0.585	1.17	0.502	1.57	0.352
0.78	0.584	1.18	0.499	1.58	0.347
0.79	0.582	1.19	0.497	1.59	0.341

Elaboración Propia

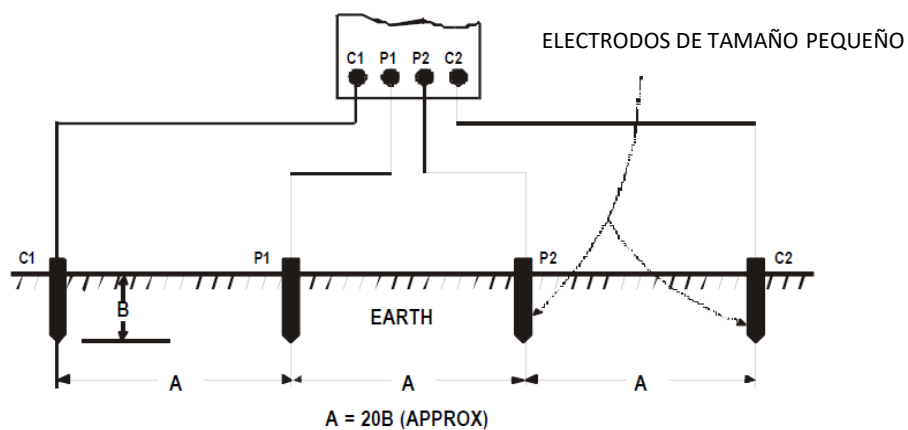
2.6. MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Se muestra un método para determinar el valor medio de la resistividad del suelo (ρ_E). Se colocan cuatro electrodos igualmente espaciados a una profundidad poco profunda; la profundidad de penetración (b) se mantiene pequeña en comparación con el

espaciado entre electrodos (a) donde $(a) \geq (b)$. Una corriente alterna conocida circula entre los dos electrodos exteriores mientras que el potencial se mide a través del par interior.

Esto da el valor medio de la resistividad del suelo (ρ_E) en Ohm-m. El espaciado de los electrodos (a) corresponde a la profundidad del suelo vista por la corriente de prueba. Variando el espaciado de electrodos, se puede obtener un perfil de resistividad frente a la profundidad. 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 N° 10: Método de cuatro estacas para medir la resistividad del suelo.



Elaboración Propia

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. La complejidad añadida causada por los suelos no uniformes



es común, y sólo en unos pocos casos las resistividades del suelo son constantes a medida que aumenta la profundidad.

La resistividad de la Tierra no sólo varía según el tipo de suelo, sino también según la temperatura, la humedad, el contenido en sal y la compacidad (véase la Fig. 9). La literatura indica que los valores de resistividad de la Tierra varían de 0,01 a 1 Ω .m para el agua de mar y hasta 10^9 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. 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 alto.

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 cuestión.(Mukhedkar & Dawalibi, 1984)

2.6.1. Métodos de medición de la resistividad

A menudo, 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. Esos datos podrían ser de considerable ayuda para el ingeniero de diseño, que debería tratar de obtener por lo menos la siguiente información:

- Tipo de suelo en cada capa
- Contenido de humedad
- El pH del suelo



- Profundidad de las aguas subterráneas (DeCosta et al., 2012)

Una determinación más precisa es posible si se hace una medición de la resistencia de cuatro terminales de la muestra de suelo. Los terminales potenciales deben ser pequeños, en relación con la sección transversal de la muestra, y estar situados a suficiente distancia de los terminales para asegurar una distribución casi uniforme de la corriente en la muestra. Una distancia igual a la sección transversal más grande dimensión suele ser adecuada para el propósito de la determinación.

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, y en duplicando la compactación del suelo original y el contenido de humedad en la celda de prueba. (Mukhedkar & Dawalibi, 1984)

2.6.1.1. Método de dos puntos

Se pueden hacer mediciones aproximadas de la resistividad de la tierra no contaminada en el campo con la resistividad de los suelos de recubrimiento con el método de dos puntos. El aparato 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 más pequeña y el terminal negativo del otro electrodo. El instrumento puede ser calibrado para leer directamente en ohmímetros a la tensión nominal de la batería. 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)



Variación de la profundidad o método de los tres puntos

Este método, a veces llamado método de tres puntos, es una prueba de resistencia al suelo realizada varias veces, cada vez la profundidad de enterramiento del electrodo probado se incrementa en un incremento determinado. El propósito de esto es forzar más pruebas corrientes a través del suelo profundo. El valor de resistencia medido reflejará entonces la variación de la resistividad al aumentar profundidad. Normalmente el electrodo probado es una varilla. Las varillas se prefieren a otros tipos de electrodos porque ofrecen dos importantes ventajas: (DeCosta et al., 2012)

1. El valor teórico de la resistencia de la varilla de tierra es simple de calcular con la precisión adecuada, por lo tanto, los resultados son fáciles de interpretar.
2. La introducción de una varilla en el suelo es normalmente una operación fácil.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el valor medido de la resistencia debe ser lo más exacto posible para que pueda ser exitoso comparado con el valor teórico. Por lo tanto, el método de caída de potencial se utiliza preferentemente para estas mediciones. 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). Si se debe investigar un gran volumen de suelo, es preferible utilizar el método de los cuatro puntos, ya que la conducción de varillas largas no es práctica. (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)

2.6.1.2. 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 pasa 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 ohms.

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

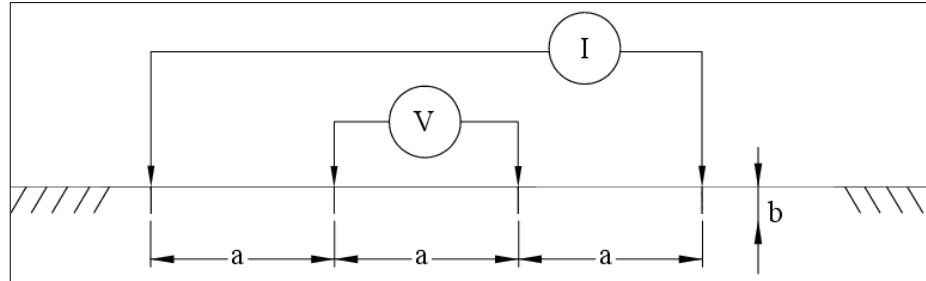
1) Disposición de Espacios Iguales o de Wenner. Con esta disposición los electrodos están espaciados por igual como se muestra en la Fig. 10. Sea la distancia entre dos electrodos adyacentes. Entonces, la resistividad r en términos de las unidades de longitud en las que se miden a y b es:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (6)$$

Cabe señalar que esto no se aplica a las varillas de tierra conducidas a la profundidad b ; se aplica sólo a los pequeños electrodos enterrados a la profundidad b , con cables de conexión aislados. 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:

$$\rho = 2\pi aR \quad (7)$$

Figura N° 11: Sistema simétrico

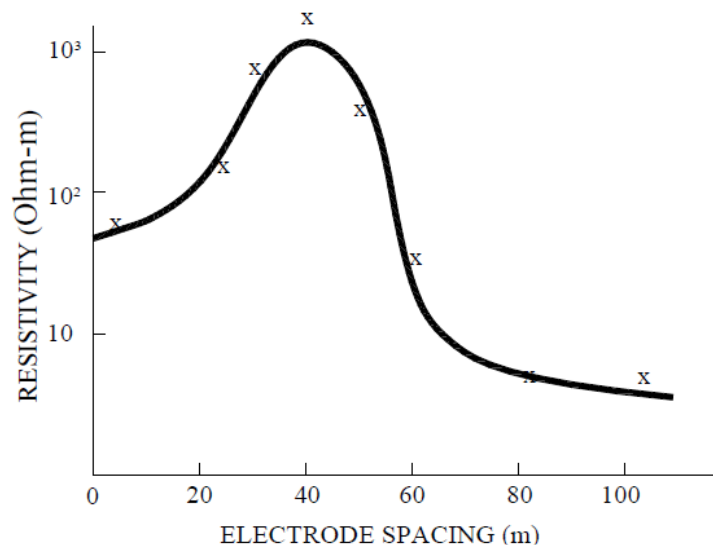


Elaboración Propia

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

Un conjunto de lecturas tomadas con varios espaciamentos de sondas da un conjunto de resistividades que, cuando se trazan contra el espaciamiento, indican si hay capas distintas de diferentes suelos y da una idea de sus respectivas resistividades y profundidad. (Ver Fig. 11) (Mukhedkar & Dawalibi, 1984).

Figura N° 12: Curva de resistencia típica



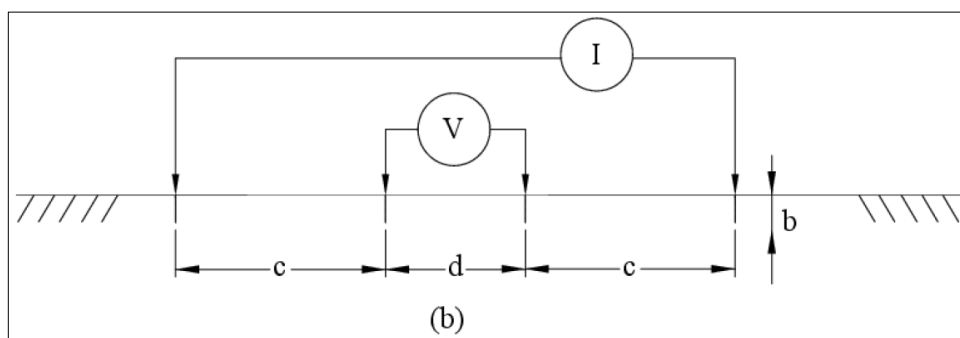
Elaboración Propia

2) Arreglo de Schlumberger-Palmer o de espaciamiento desigual. Un defecto del método Wenner es la rápida disminución de la magnitud del potencial entre los dos electrodos internos cuando se aumenta su espaciamiento a valores relativamente grandes. A menudo los instrumentos comerciales son inadecuados para medir un potencial tan bajo valores. Para poder medir las resistividades con grandes distancias entre los electrodos de corriente, la disposición que se muestra en la figura 12 puede utilizarse con éxito. Las posibles sondas se acercan a los correspondientes electrodos. Esto aumenta el valor potencial medido.

La fórmula que se utilizará en este caso puede determinarse fácilmente. 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).

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (8)$$

Figura N° 13: Sistema Asimétrico



Elaboración Propia



2.7. SEGURIDAD EN LA PUESTA A TIERRA

En principio, un diseño de puesta a tierra de seguridad tiene los siguientes dos objetivos:

- Proporcionar medios para transportar corrientes eléctricas a la tierra en condiciones normales y de fallo sin exceder los límites de funcionamiento y de equipo o sin afectar negativamente a la continuidad del servicio.
- Asegurar que una persona que se encuentre en las proximidades de instalaciones conectadas a tierra no esté expuesta al peligro de una descarga eléctrica crítica

Así pues, un enfoque práctico de la puesta a tierra segura se ocupa y se esfuerza por controlar la interacción de dos sistemas de puesta a tierra, como se indica a continuación:

La tierra intencional, que consiste en electrodos de tierra enterrados a cierta profundidad bajo la superficie de la tierra.

El suelo accidental, establecido temporalmente por una persona expuesta a un gradiente potencial en las proximidades de una instalación de puesta a tierra. (Keil & Merryman, 2000)

Las personas a menudo asumen que cualquier objeto conectado a tierra puede ser tocado con seguridad. Una baja resistencia del suelo de la subestación no es, en sí misma, una garantía de seguridad. No hay una relación simple entre la resistencia del sistema de tierra en su conjunto y la máxima corriente de choque a la que puede estar expuesta una persona. Por lo tanto, una subestación de una resistencia del suelo relativamente baja puede ser peligrosa, mientras que otra subestación con una resistencia muy alta se puede hacer seguro mediante un diseño cuidadoso. Por



ejemplo, si una subestación se alimenta de una línea aérea sin escudo o cable neutro, una baja resistencia de la red es importante. La mayor parte o la totalidad de la corriente total de la falla entran en la tierra causando un aumento a menudo pronunciado del potencial del suelo local. Si un cable de blindaje, se utiliza un cable neutro, un bus con aislamiento de gas, o un alimentador de cable subterráneo, etc., una parte de la corriente de falla regresa a través de este camino metálico directamente a la fuente. Dado que este enlace metálico proporciona un paralelo de baja impedancia camino al circuito de retorno, el aumento del potencial de tierra local es en última instancia de menor magnitud. En cualquier caso, el efecto de esa porción de corriente de falla que entra a la tierra dentro de la subestación el área debe ser analizada más a fondo. Si la geometría, la ubicación de los electrodos de tierra, las características locales del suelo, y otros factores contribuyen a un gradiente potencial excesivo en la superficie de la tierra, el sistema de puesta a tierra puede ser inadecuada a pesar de su capacidad para transportar la corriente de falla en las magnitudes y duraciones permitidas por relés de protección (Keil & Merryman, 2000) eil & Merryman, 2000).

2.7.1. Resistencia del cuerpo humano

Para las corrientes y frecuencia de 50 o 60 Hz, el cuerpo humano puede ser aproximado por una resistencia. La trayectoria de la corriente que se considera típicamente es de una mano a ambos pies, o de un pie al otro. La resistencia interna del cuerpo es de aproximadamente 300 Ω , mientras que los valores de la resistencia del cuerpo incluyendo la piel van de 500 Ω a 3000 Ω . La resistencia del cuerpo humano se reduce por el daño o la función de la piel en el punto de contacto.

Dalziel realizó extensas pruebas usando agua salada para mojar las manos y los pies para determinar las corrientes de salida seguras, con las manos y los pies mojados.



Los valores obtenidos usando 60 Hz para los hombres fueron: La corriente fue de 9,0 mA; los voltajes correspondientes fueron de 21,0 V para el mano a mano y 10,2 V para el mano a pie. Por lo tanto, la resistencia CA para un contacto mano a mano es igual a $21,0/0,009$ o 2330Ω , y la mano a los pies la resistencia es igual a $10,2/0,009$ o 1130Ω , basado en este experimento. (Keil & Merryman, 2000)



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

Como material de la investigación tenemos a las instalaciones del sistema de puesta a tierra, del sistema de comunicación.

3.1.1. Tipo de investigación

Para el presente proyecto de tesis el tipo de investigación en cada objetivo es cuantitativo:

Tipo cuantitativo: Es un conjunto de procesos secuenciales y probatorios cada etapa precede a la siguiente y no podemos brincar los pasos, parte de una idea de la cual se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco teórico, de las preguntas se establecen variables y determinan variables, se desarrolla un plan para probarlas (diseño), se miden las variables en un determinado contexto se analizan las mediciones obtenidas (con frecuencia utilizando métodos estadísticos), se establecen una serie de conclusiones respecto de las hipótesis. (Sampieri et al., 2010).

Estudios descriptivos busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Describe tendencias de un grupo o población. Es decir, únicamente pretende medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre las variables, sin indicar como se relacionan estas. (Sampieri et al., 2010).

Estudios correlacionales: Asocia variables mediante un patrón predecible para un grupo o población. Este tipo de estudios tiene como finalidad conocer la relación o



grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular. (Sampieri et al., 2010).

De acuerdo a lo mencionado la presente investigación se enmarca dentro la investigación cuantitativa, Descriptiva Correlacional.

3.1.2. Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos para la presente Investigación se obtendrá mediante los siguientes instrumentos de recolección de datos:

- **Análisis documental**

Mediante el cual se recopila datos e información necesaria para desarrollar y sustentar este estudio. Básicamente como su nombre lo indica a través del análisis de documentos existentes.

Se utiliza como fuente los datos, libros, informes, separatas, páginas de internet, etc., referente a sistemas de puesta a tierra.

- **Observación**

Se caracteriza porque tiene objetivos definidos y concretos, y porque deliberadamente procura ser objetiva. En este ítem se examinan cuestiones relativas al registro de la observación, los tipos de observación, las precauciones en el empleo de esta técnica de recolección de datos y algunas de sus ventajas y limitaciones (Popper, 2017).

- **Internet**

Una vez obtenida la información esta se analiza e interpreta relacionándolos con las diferentes partes de la investigación, en especial con los objetivos y la hipótesis.

3.1.3. Técnicas de análisis de datos

Se requiere acumular información primaria para después analizar y cuantificarla.

Los datos obtenidos en el proceso de investigación son analizados y mostrados en las gráficas para la mejor visualización, comprensión y así poder elaborar las posibles conclusiones y recomendaciones.

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 conductorio.
- Medidor digital de la resistencia a tierra (Telurómetro), KYORITSU Modelo 4105 A.

Figura N° 14: Telurómetro KYORITSU Modelo 4105 A



Elaboración Propia

- Medidor digital de la resistencia a tierra (Telurómetro), MEGGER Modelo DET4TC2.

Figura N° 15: Medidor digital, MEGGER Modelo DET4TC2.



Elaboración Propia

3.2. MÉTODO

El método planteado a para cada objetivo son los siguientes:

3.2.1. Estimación de la Resistividad del terreno

De acuerdo a lo recomendado por la norma IEEE Std 81-1983 y IEEE Std 81TM-2012 (Revisión de IEEE Std 81-1983), para estimar la resistividad del suelo utilizamos el método de los cuatro puntos y la disposición de espacios equidistantes también conocidos como el método de Wenner. Con esta disposición los electrodos están espaciados por igual como se muestra en la Figura N° 16. Sea la distancia entre dos electrodos adyacentes. Entonces, la resistividad r en términos de las unidades de longitud en las que se miden a y b es:

Que se aplica sólo a los pequeños electrodos enterrados a la profundidad b , con cables de conexión aislados. 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 $b = 0$ (De Costa et al., 2012).

Este método consiste en introducir cuatro electrodos de prueba en línea recta y separados a distancias iguales (a), enterrados a una profundidad (b) que es igual a la vigésima parte de la separación de los electrodos de prueba ($b= a/20$) y van conectados al equipo de medición, el cual introduce una intensidad de corriente entre los electrodos C1 y C2, generando una diferencia de potencial entre los electrodos P1 y P2 (VP1 ,P2), que será medida por el equipo, a su vez en la pantalla tendremos el resultado de la relación (V/I) que por ley de Ohm es R (Longatt, 2007).

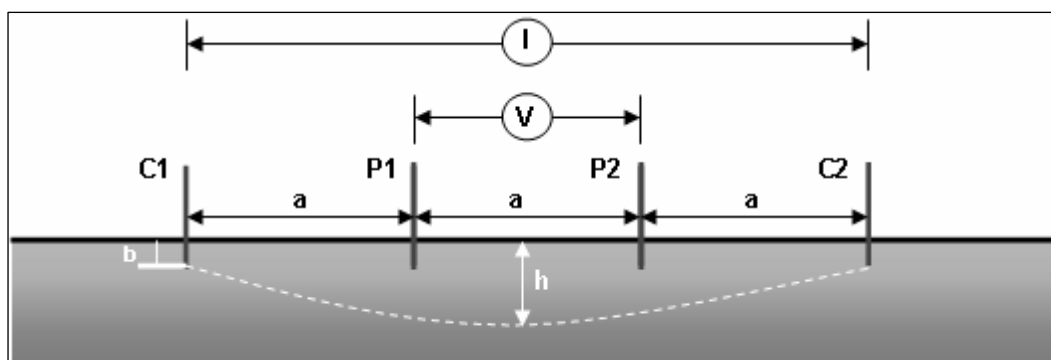
3.2.1.1. Elementos necesarios para efectuar las mediciones

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 Márquez, 1999).

Se instalará el circuito como se ilustra en la figura:

Figura N° 16: Esquema de instalación



Elaboración Propia

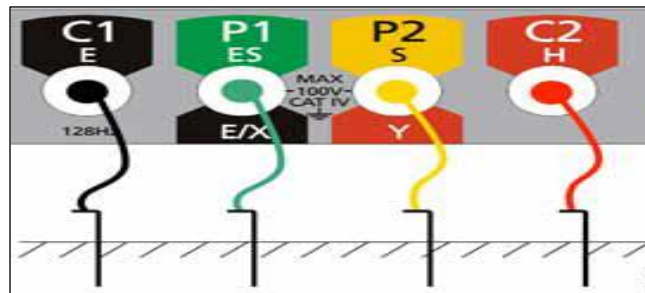
Entonces, la resistividad r en términos de las unidades de longitud en las que se miden a y b es:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (9)$$

El procedimiento es el siguiente:

Instalar los 4 electrodos a por lo menos 10 cm de profundidad y una separación inicial de 1 m, aumentar esta distancia gradualmente.

Figura N° 17: Esquema de instalación



Elaboración Propia

Conectar los cables al equipo siguiendo las siguientes instrucciones:

- Cable del electrodo 1 al terminal C1.
- Cable del electrodo 2 al terminal P1.
- Cable del electrodo 3 al terminal P2.
- Cable del electrodo 4 al terminal C2.

Tomar la medida y realizar el cálculo utilizando la fórmula 9.

Los resultados se registrarán en la siguiente tabla:

Tabla N°4: Hoja de información Resistividad del terreno

Hoja de información resistividad del terreno

Lectura del instrumento R (Ω)	Distancia a (m)	Profundidad b (m)	$P = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$
--	-----------------	-------------------	---

Elaboración Propia

3.2.1.2. Modelado del Suelo

Con las medidas obtenidas en campo, se obtiene un modelo de resistividad uniforme del suelo.

Se utiliza el método estadístico BOX-COX, el procedimiento se describe a continuación:

El valor de la resistividad del modelo se calcula con el valor promedio de las resistividades medidas, el cual puede obtenerse mediante el promedio aritmético de las mediciones mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n} (\Omega.m) \quad (10)$$

En donde:

$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}$: Mediciones de resistividad aparente a diferentes profundidades de investigación.

n : Número de mediciones realizadas.

Para aproximar un suelo no uniforme al modelo de suelo homogéneo, es aplicar la técnica estadística llamada transformación de BOX-COX, que nos permite calcular un valor de resistividad con probabilidad del 70% de no ser superada.

se calculan los logaritmos naturales de las resistividades aparentes.

$$X_i = \ln(\rho_i) \quad (11)$$

ρ_i : resistividad aparente del terreno medidas en campo.

Se halla el promedio x a partir de la siguiente ecuación:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (12)$$

X_i : Logaritmo natural de cada una de las medidas de resistividad.

Se calcula la desviación estándar mediante la siguiente formula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - x)^2}{n}} \quad (13)$$

X_i : Logaritmo natural de cada una de las medidas de resistividad.

x : promedio o media del grupo de datos X_i .

Se utiliza la ecuación 14 para encontrar la resistividad con 70% de probabilidad de ser la real:

$$\rho = e^{(S*Z)+x} (\Omega. m) \quad (14)$$

De la distribución normal se toma el valor de Z para una probabilidad del 70%, de donde obtenemos que

$$Z = 0.524411 \quad (15)$$

Finalmente tenemos que:

$$\rho = e^{(S*0.524411)+x}(\Omega.m) \quad (16)$$

Los resultados se registran en la siguiente tabla:

Tabla N°5: Modelado Resistividad del terreno

Modelo resistividad del terreno				
RESISTIVIDAD $\Omega\text{-m}$	$x_i = \ln(P_{ai})$	$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n}}$	$\rho = e^{(S+Z)+\ln(p)prom}$

Elaboración Propia

3.2.2. Cálculo de la Resistencia del sistema de puesta a tierra

Para la determinar la resistencia de puesta a tierra se realiza mediante el método descrito en la norma IEEE Std 81™-2012 (Revisión de IEEE Std 81-1983), este método se describe como sigue.

La resistencia a tierra de la varilla enterrada en un suelo uniforme viene dada por:

(DeCosta et al., 2012)

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad (17)$$

O en función de las aproximaciones utilizadas.



$$R = \frac{\rho_2}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right) \quad (18)$$

Es la relación matemática para evaluar la resistencia de un electrodo cilíndrico y vertical (Arturo Galvan D., Gilberto Pretelln G, 2010).

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 N°6: Calculo de la Resistencia (R)

Cálculo de la resistencia (R)			
longitud del electrodo(L)	Radio del electrodo(r)	Resistividad del terreno (p)	Cálculo de la resistencia (R)
			$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$

Elaboración Propia

3.2.3. Influencia del sistema de puesta a tierra tratado electroquímicamente

Para el cálculo de los electrodos instalados en concreto o en compuestos que mejoran el suelo, de acuerdo a la IEEE Std 80-2000, tenemos lo siguiente:

la resistencia del electrodo encajonada en concreto es:

$$R_{CE-rod} = \frac{1}{2\pi L_r} \left(\rho_c \left[\ln \left(\frac{D_c}{d} \right) \right] + \rho \left[\ln \left(\frac{8L_r}{D_c} \right) - 1 \right] \right) \quad (19)$$

La ecuación (19) puede estar relacionada con la fórmula de uso general para una varilla de tierra de longitud L_r y diámetro d , de la siguiente manera

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi L_r} \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d} \right) - 1 \right] \quad (20)$$

Entonces la ecuación (58) puede resolverse así:

$$R_{CE-ros} = \frac{1}{2\pi L_r} \left\{ \rho \left[\ln \left(\frac{8L_r}{D_c} \right) - 1 \right] + \rho_c \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d} \right) - 1 \right] - \rho_c \left[\ln \left(\frac{8L_r}{D_c} \right) - 1 \right] \right\} \quad (21)$$

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).

De donde se tiene:

$$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi L} (\ln r_2 - \ln r_1) + \frac{\rho_2}{2\pi L} (\ln 4L - 1 - \ln r_2) \quad (22)$$

La ecuación (22) representa la combinación de dos resistencias, una resistencia de un volumen de suelo de radio r_1 , directamente enterrado en un suelo de resistividad ρ_2 , y una resistencia de un segmento interno de radio r_2 que contiene un núcleo metálico de radio r_1 . (Galvan ,Pretelín, 2010)

Tabla N°7: Hoja de información cálculo de Resistencia con tratamiento

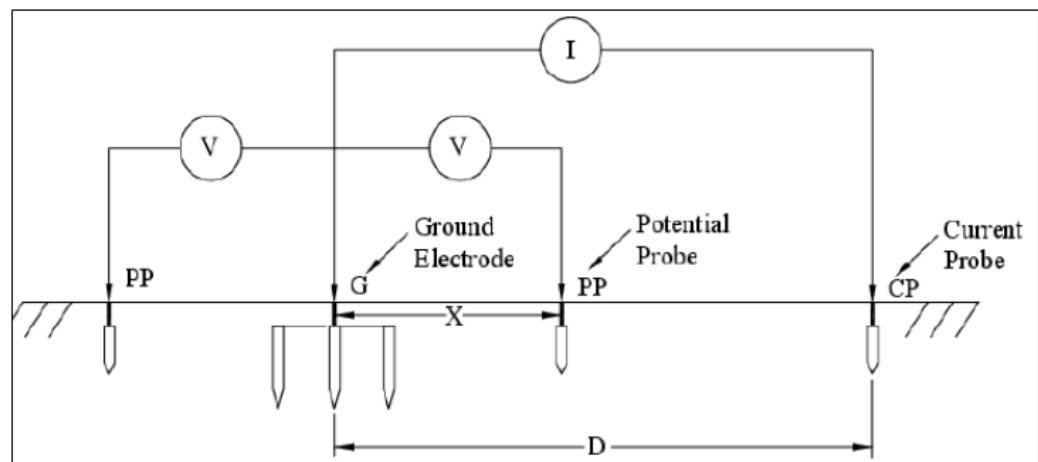
Resistencia de Puesta a Tierra con Revestimiento de Cemento Conductivo					
Longitud del electrodo (Lr) metros	Resistividad del concreto (pc) Ω -m	Radio de la varilla de tierra (r1) m	Resistividad del terreno (p)	Radio de la cascara de concreto (r2) m	Cálculo de la resistencia (R_{CE-rod})
					$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi L} (\ln r_2 - \ln r_1) + \frac{\rho_2}{2\pi L} (\ln 4L - 1 - \ln r_2)$

Elaboración Propia

3.2.3.1 Método de medición del sistema de puesta a tierra

El método de caída de potencial consiste en hacer pasar una corriente entre un electrodo de tierra (G) y una sonda de corriente (CP) y, a continuación, medir la tensión entre G y una sonda de potencial (PP), como se muestra en la Figura 20. Para minimizar las influencias entre los electrodos debido a las resistencias mutuas, la sonda de corriente se coloca generalmente para minimizar las influencias entre los electrodos debido a las resistencias mutuas, esta se coloca generalmente a una distancia considerable del electrodo de tierra que se está probando.

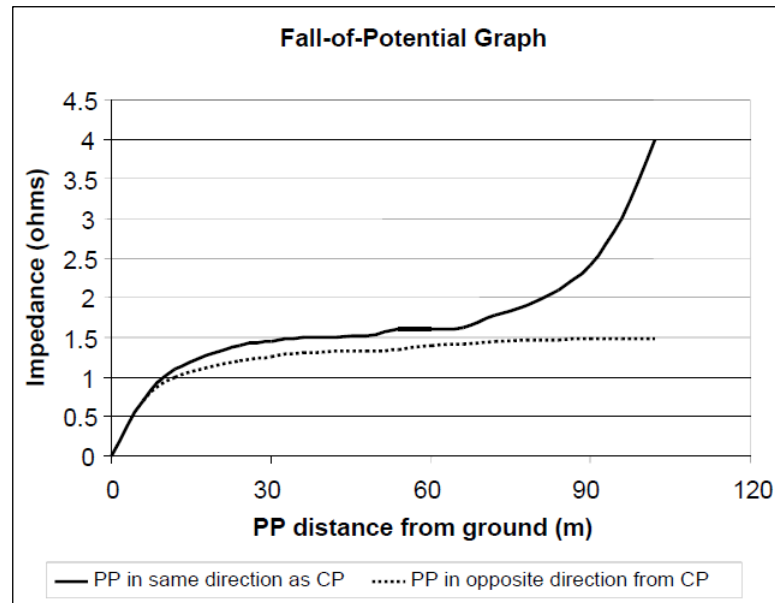
Figura N° 18: Ilustración del método de caída de potencial



Elaboración Propia

Normalmente, esta distancia es al menos cinco veces la mayor dimensión del electrodo de tierra bajo prueba. La sonda de potencial se coloca normalmente en la misma dirección que la sonda de corriente, pero puede colocarse en dirección opuesta, como se muestra en la figura 20. En la práctica, la distancia "X" para la sonda de potencial suele ser el 62% de la distancia de la sonda de corriente cuando las sondas de corriente y de potencial están en la misma dirección (regla del 62%). Esta distancia se basa en la posición teóricamente correcta para la medición de la impedancia del electrodo para un suelo con resistividad uniforme.

Figura N° 19: Impedancia típica frente a la distancia de la sonda de potencial para el método de caída de potencial

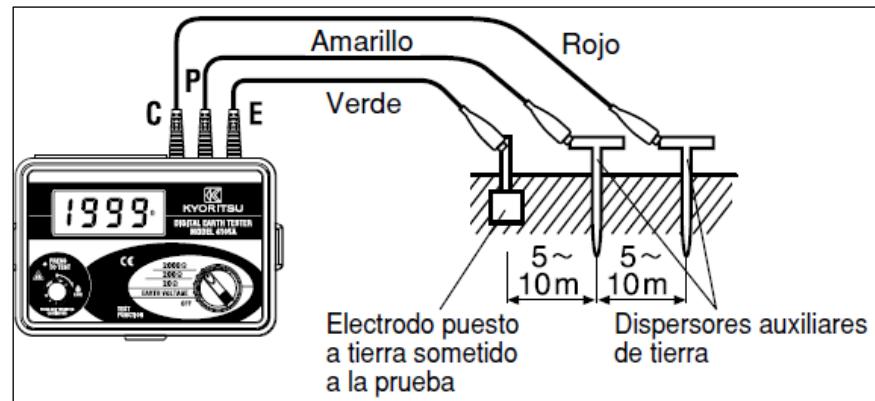


Elaboración Propia

La secuencia de medición por el método descrito es el siguiente:

- Conectar el electrodo bajo prueba a los terminales C1 y P1.
- Llevar la pica de corriente C (cable rojo), tan lejos como sea posible del electrodo bajo prueba E (cable verde). Conectar esta pica al terminal C2 del medidor de tierras.
- Llevar la pica de potencial P (cable amarillo), a mitad de camino entre E y C, sobre la recta que les une. Conectar el cable de esta pica al terminal P2 del medidor de tierras.
- Realizar la medida, siendo ésta la resistencia R1.
- Poner la pica (P) a una distancia igual al 40% de EC desde E y tomar una segunda lectura, (R2).

Figura N° 20: Esquema de conexión del instrumento.



Elaboración Propia

Los registros de las medidas se anotarán en el formato de registro de medidas de resistencia de puesta a tierra siguiente:

Tabla N°8: Hoja de información Resistencia

Hoja de Resistencia	
Distancia (m)	Medicion (Ω)

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

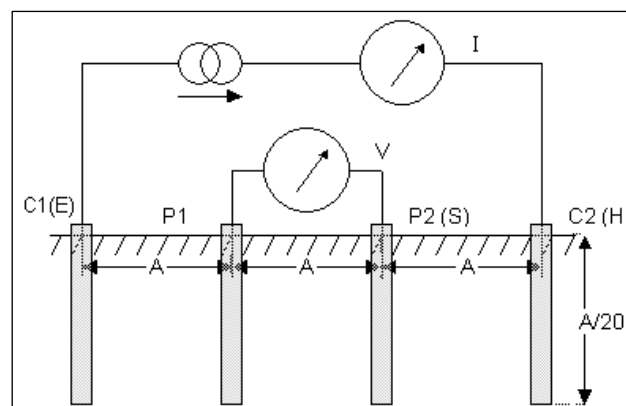
En el presente capítulo se analizan los datos obtenidos producto de las mediciones realizadas, de forma de extraer significados relevantes con relación al problema de investigación y dar respuestas a los objetivos planteados.

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 81-1983 y IEEE Std 81TM-2012 (Revisión de IEEE Std 81-1983), planteada en el capítulo anterior. Se procede de la siguiente manera:

Se instalo el circuito de acuerdo al manual como se ilustra en la figura N° 18

Figura N° 21: Esquema de medición de resistividad de cuatro terminales



Elaboración Propia

Se Instaló los 4 electrodos a de 10 cm de profundidad y una separación inicial de 1 m, aumentando esta distancia gradualmente en 0.5 m hasta lograr una separación de 5 m entre cada electrodo.

Se conectan los cables a los terminales y electrodos como se aprecia en la figura

N°19.

Figura N° 22: Esquema de instalación de los cables



Elaboración Propia

Los cables se conectan al equipo siguiendo las siguientes instrucciones:

- Cable del electrodo 1 al terminal C1.
- Cable del electrodo 2 al terminal P1.
- Cable del electrodo 3 al terminal P2.
- Cable del electrodo 4 al terminal C2.

Se toma la medida y realizamos el cálculo utilizando la fórmula 9.

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

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 1 \times 12.41}{1 + \frac{2 \times 1}{\sqrt{1^2 + 0.1^2}} - \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0.1^2}}} = 78.17 \Omega/m^2$$

Los demás cálculos se registran en la siguiente tabla:



Tabla N°9: Resistividad del terreno trayectoria 1

Resistividad del terreno trayectoria 1					
Lectura del instrumento	Distancia	Profundidad	$\rho=2\pi aR$	$P = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$	
R(Ω)	a(m)	b(m)			
12.41	1	0.1	77.97	78.17	
9.52	1.5	0.1	89.72	89.82	
6.52	2	0.1	81.93	81.98	
4.32	2.5	0.1	67.86	67.89	
3.56	3	0.1	67.1	67.12	
2.7	3.5	0.1	59.38	59.39	
1.81	4	0.1	45.49	45.5	
1.51	4.5	0.1	42.69	42.7	
1.13	5	0.1	35.5	35.5	

Elaboración Propia

Figura N° 23: Resistividad vs distancia trayectoria 1



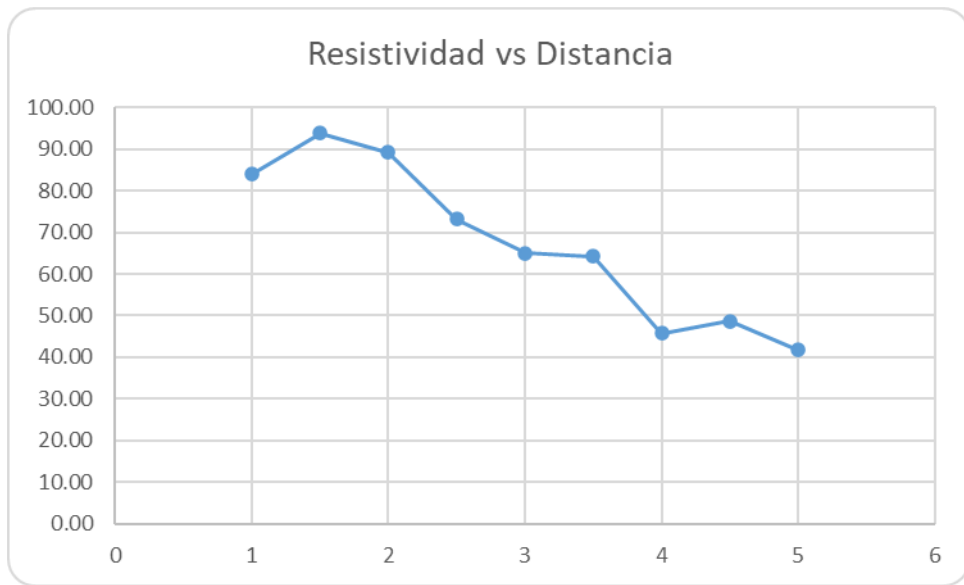
Elaboración Propia

Tabla N°10: Resistividad del terreno trayectoria 2

Resistividad del terreno trayectoria 2				
Lectura del instrumento	Distancia	Profundidad	$\rho=2\pi aR$	$P = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$
$R(\Omega)$	a(m)	b(m)		
trayectoria 2	1	0.1	83.82	84.03
	1.5	0.1	93.78	93.88
	2	0.1	89.22	89.28
	2.5	0.1	73.2	73.23
	3	0.1	65.03	65.05
	3.5	0.1	64.21	64.23
	4	0.1	45.74	45.75
	4.5	0.1	48.63	48.64
	5	0.1	41.78	41.79

Elaboración Propia

Figura N° 24: Resistividad vs distancia trayectoria 2



Elaboración Propia

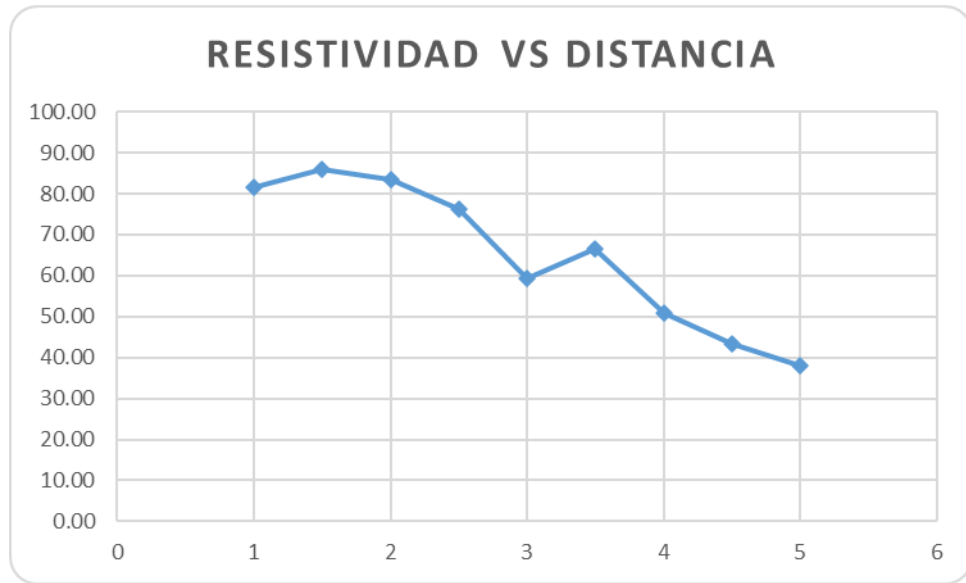


Tabla N°11: Resistividad del terreno trayectoria 3

Resistividad del terreno trayectoria 3					
Lectura del instrumento	Distancia	Profundidad	$\rho=2\pi aR$	$P = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$	
	R(Ω)	a(m)	b(m)		
Trayectoria 3		1	0.1	81.3	81.51
		1.5	0.1	85.86	85.95
		2	0.1	83.32	83.37
		2.5	0.1	76.34	76.37
		3	0.1	59.38	59.39
		3.5	0.1	66.41	66.43
		4	0.1	50.77	50.78
		4.5	0.1	43.26	43.27
		5	0.1	38.01	38.02

Elaboración Propia

Figura N° 25: Resistividad vs distancia trayectoria 3



Elaboración Propia

Tabla N°12: Resistividad del terreno trayectoria 4

Resistividad del terreno trayectoria 4

Lectura del instrumento	Distancia	Profundidad	$\rho=2\pi aR$	$P = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$	
				$R(\Omega)$	$a(m)$
trayectoria 4	1	0.1	80.93	81.13	
	1.5	0.1	88.88	88.97	
	2	0.1	69.62	69.66	
	2.5	0.1	67.86	67.89	
	3	0.1	55.61	55.62	
	3.5	0.1	48.38	48.39	
	4	0.1	49.76	49.77	
	4.5	0.1	35.91	35.91	

Elaboración Propia

Figura N° 26: Resistividad vs distancia trayectoria 4



Elaboración Propia

4.1.1. Modelado del Suelo

Con las medidas obtenidas en campo, se obtiene un modelo de resistividad uniforme del suelo.

Se utiliza el método estadístico BOX-COX, el procedimiento se describió en el capítulo anterior, y es el siguiente:

El valor de la resistividad del modelo se calcula con el valor promedio de las resistividades medidas, el cual puede obtenerse mediante el promedio aritmético de las mediciones mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n} (\Omega.m)$$



En donde:

$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}$: Mediciones de resistividad aparente.

n : Número de mediciones realizadas.

Se tiene lo siguiente:

$$\rho_a = \frac{81.21 + 89.66 + 81.07 + 71.34 + 61.80 + 59.61 + 47.95 + 42.63 + 36.84}{9} (\Omega \cdot m)$$

$$\rho_a = 63.57 (\Omega \cdot m)$$

se calculan los logaritmos naturales de las resistividades aparentes.

$$X_i = \ln(\rho_i)$$

ρ_i : resistividad aparente del terreno medidas en campo.

Realizando el cálculo para 81.21 tenemos

$$X_i = \ln(81.21)$$

$$X_i = 4.40$$

Los demás resultados se muestran en la tabla:

Tabla N°13: logaritmos naturales de las resistividades aparentes

logaritmos naturales de las resistividades aparentes	
RESISTIVIDAD Ω -m	$x_i = \ln(P_{ai})$
81.21	4.4
89.66	4.5



81.07	4.4
71.34	4.27
61.8	4.12
59.61	4.09
447.95	3.87
42.63	3.75
36.84	3.61

Elaboración Propia

Se halla el promedio x a partir de la siguiente ecuación:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n}$$

X_i : Logaritmo natural de cada una de las medidas de resistividad.

Se obtiene lo siguiente:

$$x = \frac{4.4 + 4.5 + 4.4 + 4.27 + 4.12 + 4.09 + 3.87 + 3.75 + 3.61}{9}$$

$$x = 4.11$$

Se calcula la desviación estándar mediante la siguiente formula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - x)^2}{n}}$$

X_i : Logaritmo natural de cada una de las medidas de resistividad.

x : promedio o media del grupo de datos X_i .

$$S = \sqrt{\frac{0.08195 + 0.14843 + 0.081 + 0.02457 + 0.00017 + 0.00053 + 0.0579 + 0.12832 + 0.25421}{9}}$$

$$S = 0.2685$$

Se utiliza la ecuación siguiente para encontrar la resistividad con 70% de probabilidad de ser la real:

$$\rho = e^{(S*Z)+x}(\Omega.m)$$

De la distribución normal se toma el valor de Z para una probabilidad del 70%, de donde obtenemos que

$$Z = 0.524411$$

Finalmente tenemos que:

$$\rho = e^{(S*0.524411)+x}(\Omega.m)$$

$$\rho = e^{(0.2685*0.524411)+4.11}(\Omega.m) \quad \rho = 70.21(\Omega.m)$$

Los resultados se registran en la siguiente tabla:

Tabla N°14: Modelado Resistividad del terreno

Modelado resistividad del terreno				
SEPARACION ENTRE ELECTRODOS (m)		$x_i = \ln(P_{ai})$	$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n}}$
1	81.21	4.4	0.08195	
1.5	89.66	4.5	0.14843	
5	81.07	4.4	0.081	
2.5	71.34	4.27	0.02457	0.2685 70.21
3	61.8	4.12	0.00017	
3.5	59.61	4.06	0.00053	



4	47.95	3.87	0.0579
4.5	42.63	3.75	0.12832
5	36.84	3.61	0.25421

Elaboración Propia

De los cálculos se ha obtenido que la resistividad del terreno es de 70.21 Ohmios por metro.

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

De acuerdo al método descrito en el capítulo 3, la resistencia a tierra de la se calcula utilizando la formula siguiente:

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

En donde:

R: Resistencia de tierra en Ω

ρ : Resistividad del suelo en $\Omega \cdot m = 81.21$, para la primera medición, consideramos el promedio de la medida de las 4 trayectorias.

r : Radio del electrodo = 0.016 m

l : Longitud de la varilla m = 2.4 m

$$R = \frac{81.21}{2\pi * 2.4} \left(\ln \frac{4 * 2.4}{0.016} - 1 \right) = 29.06 \Omega$$

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



Tabla N°15: Cálculo de la Resistencia

Cálculo de la Resistencia				$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$
longitud del electrodo(L)		Resistividad del terreno (ρ)		Cálculo de la resistencia (R)
2.4	0.016	81.21	29.06	
2.4	0.016	89.66	32.09	
2.4	0.016	81.07	29.02	
2.4	0.016	71.34	25.53	
2.4	0.016	61.8	22.12	
2.4	0.016	59.61	21.33	
2.4	0.016	47.95	17.16	
2.4	0.016	42.63	15.26	
2.4	0.016	36.84	13.18	

Del cálculo podemos observar que se tiene un promedio de la resistencia de 22.59 Ohmios.

Elaboración Propia

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 fórmula siguiente:



$$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi L} (\ln r_2 - \ln r_1) + \frac{\rho_2}{2\pi L} (\ln 4L - 1 - \ln r_2)$$

Donde:

- R_2 : Resistencia del compuesto mejorador del suelo.
- ρ : Resistividad del terreno = mediciones realizadas.
- ρ_2 : Resistividad del relleno = 0.5 Ω -m. (Ficha técnica del fabricante)
- r_2 : Radio que contiene un núcleo metálico de radio $r_1 = 0.0508$ m.
- L : Longitud del electrodo = 2.4 m
- r_1 : radio de la varilla = 0.008 m.

Tabla N°16: Resistencia con tratamiento electroquímico

Resistencia con tratamiento electroquímico						
Resistencia de Puesta a Tierra con Revestimiento de Cemento Conductivo						
Longitud del electrodo (Lr) metros	Radio de la varilla de tierra (r1) m	Radio de la cascara de concreto (r2) m	$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi L} (\ln r_2 - \ln r_1) + \frac{\rho_2}{2\pi L} (\ln 4L - 1 - \ln r_2)$			
2.4	0.5	0.008	78.17	0.0508	9.7	
2.4	0.5	0.008	89.82	0.0508	11.2	
2.4	0.5	0.008	81.98	0.0508	10.2	
2.4	0.5	0.008	67.89	0.0508	8.5	
2.4	0.5	0.008	84.03	0.0508	10.4	



2.4	0.5	0.008	93.88	0.0508	11.6
2.4	0.5	0.008	89.28	0.0508	11.1
2.4	0.5	0.008	73.23	0.0508	9.1
2.4	0.5	0.008	81.51	0.0508	10.1
2.4	0.5	0.008	85.95	0.0508	10.7
2.4	0.5	0.008	83.37	0.0508	10.4
2.4	0.5	0.008	76.37	0.0508	9.5
2.4	0.5	0.008	81.13	0.0508	10.1
2.4	0.5	0.008	88.97	0.0508	11
2.4	0.5	0.008	69.66	0.0508	8.7
2.4	0.5	0.008	67.89	0.0508	8.5
2.4	0.5	0.008	55.62	0.0508	7
2.4	0.5	0.008	48.39	0.0508	6.1
2.4	0.5	0.008	49.77	0.0508	6.2
2.4	0.5	0.008	35.91	0.0508	4.5
2.4	0.5	0.008	32.05	0.0508	4.1

Elaboración Propia

Se ha tenido según las mediciones realizadas de la resistencia de puesta a tierra los siguientes resultados:

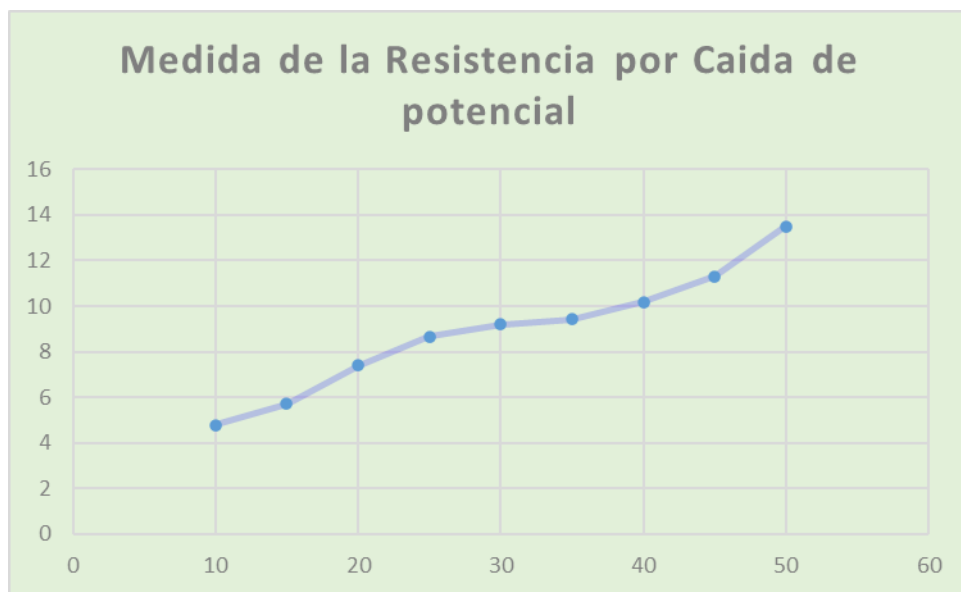
Tabla N°17: Resistencia con tratamiento electroquímico

resistencia con tratamiento electroquímico	
Distancia	Medida
(m)	R(Ω)
10	4.77

15	5.72
20	7.41
25	8.67
30	9.21
35	9.43
40	10.17
45	11.32
50	13.51

Elaboración Propia

Figura N° 27: Medida de la resistencia por caída de potencial



Elaboración Propia

Con las mediciones realizadas y comparándolas con el cálculo realizado de la resistencia de puesta a tierra tenemos lo siguiente:

Podemos deducir que el valor de la resistencia promedio de la puesta a tierra calculada es de 22.59 Ohmios y el promedio de la puesta a tierra tratada



electroquímicamente es 8 .91 ohmios, con lo que se prueba la efectividad del tratamiento con el compuesto mejorador del terreno (cemento conductivo).



V. CONCLUSIONES

- Se estimó la resistividad del terreno, se utilizó 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 81-1983 y IEEE Std 81TM-2012, se ha tenido como resultado que la resistividad del terreno es de 70.21 Ohmios por metro.
- Se determinó la resistencia de puesta a tierra se realizó mediante el método propuesto en la norma IEEE Std 81TM-2012, del cálculo realizado se ha obtenido el resultado promedio de la resistencia de 22.59 Ohmios.
- Se verificó la efectividad del tratamiento electroquímico, teniendo en cuenta las mediciones realizadas y comparándolas con el cálculo realizado de la resistencia de puesta a tierra podemos concluir que el valor de la resistencia promedio de la puesta a tierra calculada es de 22.59 Ohmios y el promedio de las mediciones realizadas de la puesta a tierra tratada electroquímicamente es 8.91 ohmios, con lo que se prueba la efectividad del tratamiento con el compuesto mejorador del terreno (cemento conductor).



VI. RECOMENDACIONES

- Los egresados de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica deben continuar con este tipo de investigaciones referidas a los Sistemas de Puesta a Tierra, utilizando diferentes tipos de tratamientos químicos para mejorar la resistencia.
- Continuar con la línea de investigación referente al estudio del comportamiento de los Sistemas de Puestas a Tierra, como por ejemplo frente a las descargas atmosféricas, al mantenimiento de los sistemas 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*.
- 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).
- Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics* (T. & Francis (ed.); Seventh ed). E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall.
- 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 Márquez, 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>
- Longatt, F. M. G. (2007). *Sistemas de Puesta a Tierra y Protección Contra Descargas Atmosféricas*. 5546954, 1–9.
- 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>
- 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.
- Popper, K. R. (2017). *La lógica de la investigación científica* (Oronet (ed.); 1°). ePub base r1.2.



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

ANEXOS

PANEL FOTOGRÁFICO

Medición de la resistividad del terreno



Instalación del pozo a tierra



Tratamiento del pozo a tierra



Medición de la resistencia del pozo a tierra



Medición de la resistencia del pozo a tierra



FICHA TECNICA DEL CEMENTO CONDUCTIVO

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)

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Planteamiento del problema	Planteamiento del problema específico	Hipótesis	Objetivos	Variables	Indicadores	Métodos
¿Cómo influye el tratamiento electroquímico en la resistencia de los Sistemas de Puesta a tierra?	¿Cuál es la influencia de la resistencia del terreno en la resistencia del sistema de puesta a tierra?	La resistencia del terreno del centro de comunicaciones nos permite analizar el comportamiento del sistema a tierra.	Estimar la resistencia según el estrato del terreno del centro de comunicaciones de Radio Urbano FM.	Independientes: composición de los estratos del suelo donde se ubica la varilla. Dependientes: Resistividad del suelo	Ohmios /metro ($\Omega \cdot m$)	Wenner
	¿Cómo mejora la resistencia del sistema de puesta a tierra, con el tratamiento electroquímico?	La Resistencia del sistema de puesta a tierra permite conocer la efectividad del tratamiento electroquímico del sistema de puesta a tierra.	Calcular la resistencia del sistema de puesta a tierra del centro de comunicaciones.	Independientes: Método de mejoramiento del sistema a tierra. Dependientes: Resistencia del sistema a tierra	Ohmios (Ω)	Caída del potencial
	¿Cómo garantiza la seguridad de protección tanto de las personas como de los equipos el sistema de puesta a tierra tratado electroquímicamente?	El sistema de puesta a tierra tratado electroquímicamente, garantiza la seguridad de protección tanto de las personas como de los equipos.	Evaluar la influencia del sistema de puesta a tierra tratado electroquímicamente.	Independientes: Valor del sistema a tierra. Dependientes: Resistencia del sistema a tierra	Ohmios (Ω)	Caída del potencial



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° 200211

Datos Generales

Solicitante	REPRESENTACIONES Y SERVICIOS ING SRL
Dirección	NRO. F INT. 9-A URB. LA ARBOLEDA - TRUJILLO - LA LIBERTAD
Equipo	TELUROMETRO
Marca	Kyoritsu
Modelo	4105A
Número de serie	W8014001
Fecha de Calibración	2020-01-15
Registro	14-5455

Método de Calibración

Por comparación directa con nuestro Patrón
Se han tomado cinco lecturas por cada valor nominal.

Patrón(es) utilizado(s).

Descripción	N° de serie	Trazabilidad	Validez
DECADA DE RESISTENCIAS Marca:TIME ELECTRONICS Modelo:1051	8151C18	INACAL Certificado N°: LE - 003 - 2020 Calibrado 2020-01-10	2 año(s)

Lugar de la Calibración

Realizada en las instalaciones de Laboratorio de Calibraciones de LOGYTEC S.A.
Calle Isidoro Suárez # 236 - San Miguel - Lima

Condiciones Ambientales

Temperatura Ambiente	Humedad Relativa
23,0 °C ± 1 °C	60,0 % ± 5 %

Nota

Los resultados expresados en este Certificado son válidos únicamente para la unidad ensayada, no siendo extensivos a otras unidades aun cuando fueran del mismo tipo y lote.

La incertidumbre total expandida está basada en una incertidumbre patrón combinada multiplicada por un factor de expansión k=2 para un nivel de confianza de aproximadamente 95%



Toda reproducción de este documento deberá ser integral y sin ninguna alteración



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° 200211

Resultado de la calibración

Resistencia

Rango	Nominal	Patrón	Lectura	Error	μ (K=2)
20 Ω	5 Ω	5,0181 Ω	4,93 %	-1,756 %	0,590 %
	10 Ω	10,0158 Ω	9,96 Ω	-0,557 %	0,580 %
200 Ω	50 Ω	50,0689 Ω	50,2 Ω	0,26 %	0,16 %
	90 Ω	90,166 Ω	90,4 Ω	0,26 %	0,13 %
2000 Ω	600 Ω	599,499 Ω	597 Ω	-0,4 %	0,2 %
	1000 Ω	1000,02 Ω	997 Ω	-0,3 %	0,1 %

Observaciones

Del resultado de las mediciones se concluye que el instrumento se encuentra calibrado.



Calibrado por:

Eduardo Fernandez Ulfee
Laboratorio de calibraciones

Toda reproducción de este documento deberá ser integral y sin ninguna alteración