



**MÉTODOS PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA EN
TERRENOS USADOS PARA PUESTAS A TIERRA**

**JORLAN RICARDO VERONA LOBO
CHRISTIAN TRIVIÑO BERNATE**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
CARTAGENA DE INDIAS D.T.H Y C
JULIO DE 2008**



**MÉTODOS PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA EN
TERRENOS, USADOS PARA PUESTAS A TIERRA**

**JORLAN RICARDO VERONA LOBO
CHRISTIAN TRIVIÑO BERNATE**

Monografía de Grado presentada como requisito para optar el Título de
Ingeniero Electricista

Minor Sistemas de Potencia

Director
Salomón Zarur R.
Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
CARTAGENA DE INDIAS D.T.H Y C
JULIO DE 2008**

ÍNDICE

	Pág.
DEFINICIONES	5
INTRODUCCIÓN	7
1. MÉTODOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	9
1.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	11
1.1.1. Tipo de Terreno	13
1.1.2. Humedad del suelo	13
1.1.3. Salinidad	14
1.1.4. Temperatura	15
1.1.5. Granulometría	16
1.1.6. Estratografía	17
1.1.7. Compactación	18
1.2. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	19
1.2.1 Medición de la resistividad utilizando muestras de suelo	21
1.2.2 Método variación de la profundidad	21
1.2.3 Método de los 4 puntos	22
2. MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	27
2.1. CONFIGURACIONES GEOMÉTRICAS	27
2.1.1. Varilla vertical	28
2.1.2. Varilla vertical enterrada a partir de una profundidad "t"	29
2.1.3. Electrodo en paralelo	30
2.1.4. Electrodo horizontal	34
2.1.5. Dos conductores en ángulo recto	36
2.1.6. Configuración en estrella con 3 puntos	36
2.1.7. Configuración de una malla	36
2.2. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE MALLA	36
2.2.1. Tensiones presentadas en las mallas de tierra	37
2.2.2. Tensiones peligrosas tolerables por el ser humano	39
2.3. INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN Y EL ESPACIAMIENTO DE ELECTRODOS	41

3.	MÉTODOS CON LAS CUALES SE OBTENDRÍA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA PUESTA A TIERRA	43
3.1.	VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA SEGÚN EL ÁREA DE LOS CONDUCTORES	43
3.2.	MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA PUESTA A TIERRA	46
3.2.1.	Método de los 3 puntos	46
3.2.2.	Método de caída de potencial	48
3.2.3.	Medida de la resistencia de puesta a tierra [RPT] sobre pavimentos o suelos de concreto	52
3.2.4.	Medida de la RPT mediante medidor tipo pinza	53
	CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	58
	BIBLIOGRAFÍA	60

DEFINICIONES

Las definiciones están establecidas de acuerdo a las normas IEEE Std 81-1983, RETIE, ASTM G 57-95 a.

Sistema de Puesta a Tierra (SPT) (Grounding System): Conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico específico, sin interrupciones ni fusibles, que unen los equipos eléctricos con el suelo o terreno. Comprende la puesta a tierra y todos los elementos puestos a tierra.

Suelo: Sistema natural, resultado de procesos físicos, químicos y biológicos, con componentes principalmente minerales y sólidos inertes que le dan estabilidad, en conjunto con líquidos y gases que definen su comportamiento eléctrico.

Electrodo de Puesta a Tierra (Grounding Electrode): Conductor o grupo de ellos en íntimo contacto con el suelo, para proporcionar una conexión eléctrica con el terreno. Puede ser una varilla, tubo, placa, cinta, cable o malla de conductores.

Puesta a tierra (Grounding): Grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuyen las corrientes eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende: Electroodos, conexiones y cables enterrados. También se le conoce como toma de tierra o conexión a tierra.

Puesto a Tierra (Grounded): Toda conexión intencional o accidental del sistema eléctrico con un elemento considerado como una puesta a tierra. Se aplica a todo equipo o parte de una instalación eléctrica (neutro, centro de estrella de transformadores o generadores, carcazas, incluso una fase para sistemas en delta, entre otros), que posee una conexión intencional o accidental con un elemento considerado como puesta a tierra.

Tierra (Ground o Earth): Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua. El término “masa” solo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, los barcos, los carros y otros.

Resistividad del Suelo: Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo; se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo; su magnitud se expresa en (Ohm-m) o (Ohm-cm), es inversa a la conductividad. La resistividad eléctrica (ρ): Es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas.

Tensión de contacto: Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se puede alcanzar al extender un brazo.

Tensión de paso: Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso (aproximadamente un metro).

INTRODUCCIÓN

En este informe se resalta la importancia de una buena puesta a tierra, el por qué de su monitoreo y mantenimiento, y en particular, algunos métodos (tradicionales y modernos) para llevar a cabo la medición de la resistividad y la resistencia en diferentes tipos de instalación.

Para realizar el estudio se revisarán y analizarán diferentes estándares reconocidos como los de la IEEE (“Institute of Electrical and Electronics Engineers”), publicaciones, manuales de equipos de medición y páginas en Internet.

Con la información recopilada se explicarán algunas definiciones básicas relativas a resistividad y resistencia, se realizará la descripción de los diferentes métodos de medición de puesta a tierra, los diferentes factores que pueden afectar su medición.

Este trabajo se encuentra dividido principalmente en tres secciones en las cuales cada una de ellas se encarga de explicar cada paso que se necesita realizar para obtener un diseño de un Sistema de Puesta a Tierra.

En la primera sección se analizarán los métodos para obtener la resistividad del terreno y además se conocerán los factores que hacen variar la resistividad del terreno. Algunos de estos factores pueden ser: las condiciones climatológicas, estratigrafía, compactación del terreno, características físicas del terreno, etc.

En la segunda sección se mostrarán las diferentes configuraciones que existen para el diseño de un sistema de puesta a tierra basados en los valores de resistividad obtenidos en la anterior sección

En la tercera sección finalmente se explicarán las formas como se pueden medir la resistencia del SPT. Teniendo en cuenta que los valores que se pueden medir en la práctica se ven influenciados por una serie de factores que impiden obtener resultados con gran exactitud. Entre los mismos podemos citar la posible existencia de corrientes vagabundas de CC y de CA, el carácter electrolítico del terreno y su eventual polarización, la aparición de potenciales galvánicos, el acoplamiento inductivo y/o capacitivo con otros sistemas, la ocurrencia de lluvias cercanas al momento en que se hace la medición, las irregularidades en la composición geológica del terreno y su grado de compactación, etcétera.

1. MÉTODOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

En esta sección se define la resistividad y sus unidades, se describe al terreno desde su característica de conductor de la electricidad y su resistividad, así como los diferentes factores que influyen directamente en el aumento o disminución de esta resistividad

Generalidades

Analizando el objetivo principal de este trabajo y la definición de la puesta a tierra, se ratifican que los elementos más importantes que garantizan una buena puesta a tierra son las uniones metálicas directas entre determinadas partes de una instalación, el electrodo o electrodos en contacto permanente con el terreno y una buena resistividad del terreno.

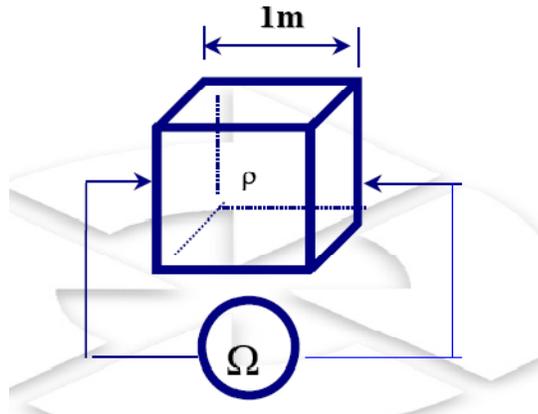
Para saber el comportamiento del terreno tendremos que analizarlo desde el punto de vista eléctrico, como elemento encargado de disipar las corrientes anormales que lleguen a través de los electrodos, es decir, debemos conocer internamente las diversas resistividades del terreno.

La realización de una instalación de puesta a tierra requiere conocer previamente el perfil de la resistividad del terreno según la profundidad, de esta forma facilita la elección de la deposición de los electrodos de tierra que proporcione mejores resultados técnico – económicos.

Debe resaltarse que la estimación de la resistividad en base a la clasificación del suelo puede dar lugar a grandes errores que obligarían a las pertinentes correcciones posteriores, por lo tanto, es de suma importancia realizar las mediciones ya que es el valor que requerimos y que dependerá de la resistividad de los diferentes estratos y del espesor de cada uno de ellos, proporcionando una medida real y confiable¹.

La resistividad de los suelos se puede expresar en las siguientes unidades $\Omega\text{-m}$, $\Omega\text{-cm}$ ó $\Omega\text{-mm}$, que corresponde a la resistencia que presenta un cubo de 1 metro cúbico de suelo o aguas, entre sus paredes laterales (aristas) y se representa por la letra griega ρ tal como se representa en la figura 1.

Figura 1. Resistividad de un cubo de terreno de 1m de arista.



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 35.

Donde las dimensiones de ρ resultan de las siguientes ecuaciones (1) y (2):

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \rightarrow \left(\frac{\Omega m^2}{m} \right) = \Omega m \quad (2)$$

¹ Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 32

Para un cubo de 1m de lado (Ver ecuación 3):

$$R(\Omega) = \rho \frac{l(m)}{S(m^2)} = \rho \frac{1(m)}{(1x1)m^2} = \frac{\rho}{1m} \quad (3)$$

Despejando ρ , $\rho = R (\Omega.m)$

Variables:

R = Resistencia en (Ω)

ρ = Resistividad en ($\Omega .m$)

l = Longitud en (m)

S = Sección en (m^2)

1.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad del terreno depende de su naturaleza, estratificación (capas de distinta composición), contenido de humedad, salinidad y temperatura. La resistividad de un terreno también se ve afectado por las variaciones estacionales.

Por otro lado, a medida que aumenta el tamaño de las partículas aumenta el valor de la resistividad, por ello la grava tiene mayor resistividad que la arena, y esta mayor resistividad que la arcilla.

Debido que las capas no son uniformes en un terreno, cuando se mide la resistividad, se está midiendo la resistividad aparente y por ello amerita determinar la resistividad de cada capa o estrato y sus espesores.

La tierra representa generalmente un mal conductor (gran contenido de óxido de silicio y óxido de aluminio que son altamente resistivos) pero gracias al amplio volumen disponible, se puede lograr a través de ella los niveles conductivos necesarios para su utilización auxiliar.

La conductividad representa un fenómeno esencialmente electroquímico o electrolítico, y por lo tanto, depende de la cantidad de agua depositada o el nivel de humidificación existente

Los suelos están compuestos principalmente, por óxidos de silicio y óxidos de aluminio que son muy buenos aislantes; sin embargo la presencia de sales y agua contenida en ellos, mejora notablemente la conductividad de los mismos.

En la resistividad del terreno influyen los siguientes factores y es necesaria su evaluación²:

Tipo de terreno.

Humedad del suelo.

Salinidad

Temperatura del terreno.

Granulometría

Estratografía

Compactación del terreno.

² EEPP Medellín, normas de montajes complementarios, medida de la resistividad eléctrica del suelo, pág. 5-17

1.1.1. Tipo de Terreno: Los tipos de terreno los podemos clasificar como terrenos vegetales húmedos, arcillas, gravas, limos, arenas arcillosas, fangos, turbas, arenas, suelo pedregosos (poca vegetación) y rocas con sus respectivos valores típicos de resistividad, tal como se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores típicos de resistividad Vs Tipo de terreno

Tipo de terreno	Valores Típicos de la resistividad (Ω -m)
Terrenos vegetales húmedos	10 – 50
Arcillas, gravas, limos	20 – 60
Arenas arcillosas	80 – 200
Fangos, turbas	150 – 300
Arenas	250 – 500
Suelos pedregosos (poca vegetación)	300 – 400
Rocas	1000 – 10.000

Fuente: Manual técnico elaborado para Procobre-Chile, pág. 25, Primera edición 1999.

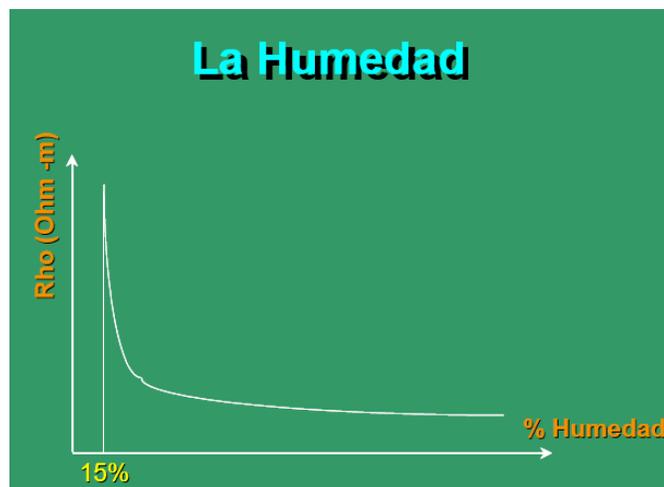
1.1.2. Humedad del suelo: Aquí varía la resistividad según la humedad del terreno, mientras más húmedo sea éste más baja será la resistividad del terreno y mientras más seco este el terreno mayor será la resistividad de éste, es por esta razón que debe procurarse un terreno un poco más húmedo para obtener mejores valores.

Se dice que el terreno esta “Saturado de agua” cuando todos sus intersticios se encuentran llenos de agua. Una vez pasada la causa de la “saturación” el agua contenida en los espacios entre los diferentes agregados, debido a la gravedad se dirigirá hacia abajo quedando estos ínter espacios ocupados por aire en el interior de los agregados, al ser superior la fuerza de capilaridad que la gravedad, el agua contenida en ellos no se mueve y en estas circunstancias, se dice que

el terreno esta “saturado de humedad”³. En la figura 2, se puede observar la variación de la resistividad en función de la humedad, en una muestra de arcilla roja, con el porcentaje de humedad contenida.

El grado de humedad, tiene una incidencia muy importante en lo que respecta al valor y a la estabilidad de la resistividad. Tal como se observa en la figura 2.

Figura 2. Resistividad Vs Humedad en %



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 38

1.1.3 Salinidad: Como se sabe el agua por sí sola no conduce la electricidad pero con sales se convierte en un excelente conductor, es por esto que mientras más sales contenga el terreno y este húmedo más bajo serán los valores de resistividad como se observa en la figura 3.

³ Manual Técnico elaborado para Procobre-Chile, Primera edición 99, Pág. 25

El contenido de sales produce una menor resistividad intergranular, lo cual permite circular corrientes con mayor facilidad y además, la sal (NaCl) es un material que absorbe con facilidad la humedad (higroscópico) al igual que el cemento y el carbón vegetal.

Este factor se modifica con frecuencia en terrenos donde la resistividad es alta, con el fin de disminuirla se le realiza un tratamiento al terreno con SAL.

Figura 3. Resistividad Vs Sales (% Volumen)



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 40

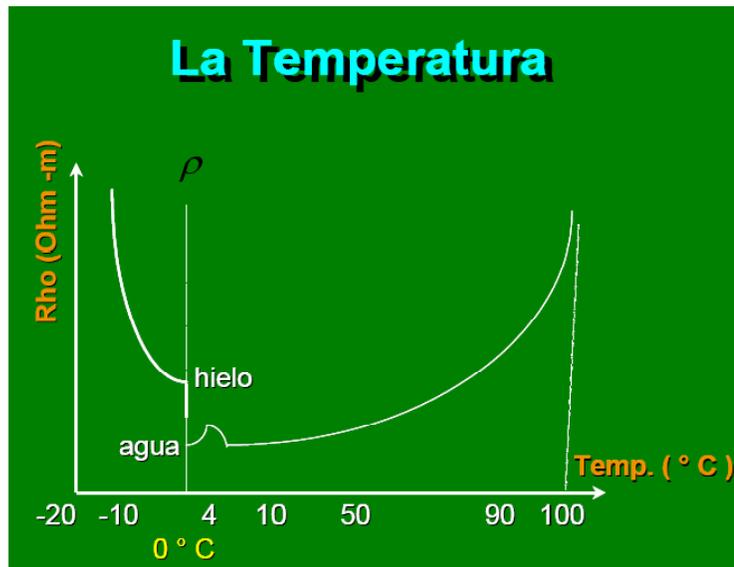
1.1.4. Temperatura: La resistividad de los suelos, también depende de la temperatura, esta característica térmica del terreno depende de su composición, de su grado de compactación y del grado de humedad.

La resistividad del terreno aumenta al disminuir la temperatura, pero cuando el terreno se enfría por debajo de cero grados centígrados el agua que contiene se congela. El hielo es aislante desde el punto de vista eléctrico, lo que implica que la movilidad de los iones del terreno a través del agua se ve detenida al congelarse esta.

Una forma de amortiguar este efecto en zonas con clima continental (inviernos fríos y veranos calurosos) deberá introducirse los electrodos a mayor profundidad.

En la siguiente figura 4, se puede observar como aumenta la resistividad de un terreno en función del descenso de la temperatura.

Figura 4. Resistividad Vs Temperatura



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 39

1.1.5. Granulometría: Otro factor que afecta la resistividad es la granulometría en donde la resistividad disminuye mientras más compactado este un terreno, ya que cuando no está bien compacto existen pequeños espacios de aire los cuales impiden que la corriente eléctrica se pueda esparcir por el terreno, tal como se observa en la figura 5.

Se relaciona con el tamaño del grano que compone predominantemente el suelo y sus características higroscópicas (absorción) y de retención de agua. El efecto general de ésta en la resistividad, es: Grado de unión (Compactación)- Forma de cristales.

Figura 5. Resistividad Vs Relación tamaño del grano.



Fuente: Manual técnico elaborado para Procobre-Chile, pág. 25, Primera edición 1999.

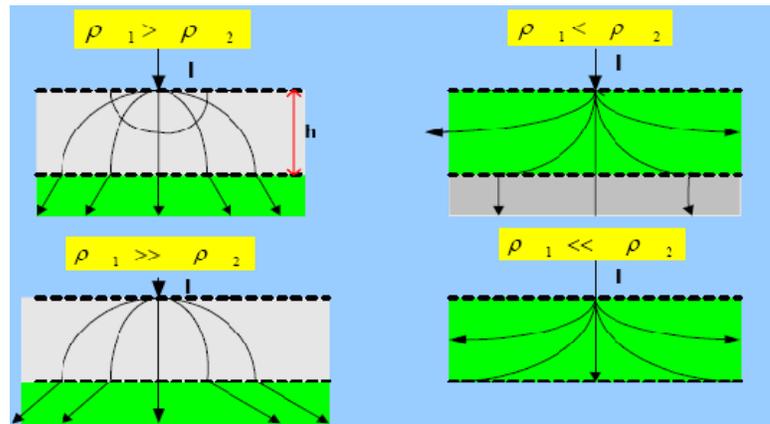
1.1.6. Estratografía: El suelo está formado por capas (estratos) que tienen diferentes resistividades y profundidades debido a la formación geológica que son generalmente horizontales y paralelas a la superficie.

Existen estratos que se presentan en formas inclinadas o verticales debido a fallas geológicas pero para los estudios se asumen horizontales. El desconocimiento a priori de la resistividad de las capas inferiores obliga al estudio y medición de las mismas si se requiere conocer el valor de la puesta a tierra a una determinada profundidad.

Se puede afirmar que la resistividad a una profundidad de 5 m puede llegar a ser mayor que solamente a una profundidad de 1,5 m por tratarse de un terreno de una capa arcillosa.

En la figura 6 se observa que el comportamiento de la resistividad del terreno no es uniforme y depende de la característica de los estratos y en un caso real se puede dar terrenos con diferentes capas con resistividades y espesores diversos que pueden ser mayor a lo requerido, por lo tanto no tendría éxito la puesta a tierra en esta capa.

Figura 6. Cambios transversales y longitudinales de la resistividad.

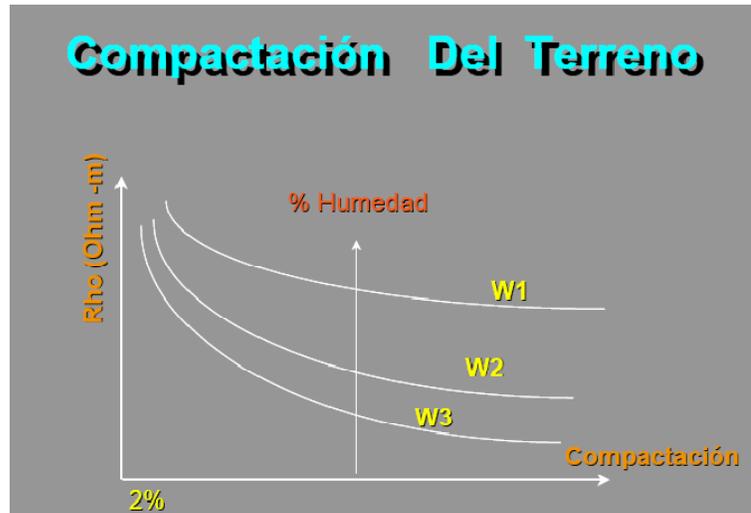


Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 41.

1.1.7. Compactación: Aquí la resistividad disminuye mientras más compactado este un terreno. El grado de compactación altera el valor de resistividad, debido al grado de unión de los granos como se puede observar en la figura 7.

- Relación directa al almacenamiento de agua y
- Relación inversa a intersticios de aire

Figura 7. Resistividad Vs Compactación.



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 40

Analizando todos los factores que influyen en la resistividad del terreno y cuál de ellos se podría modificar para ajustar la Resistividad a un valor deseado, notamos que el más factible y utilizado en la actualidad es el de salinidad, existen métodos para realizarle tratamientos al terreno teniendo en cuenta los porcentajes de sales que posee éste.

1.2. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Es importante que la resistividad pueda verificarse en forma tan precisa como sea posible, ya que el valor de resistencia a tierra del electrodo es directamente proporcional a la resistividad del suelo. Si se usa un valor incorrecto de resistividad del terreno en la etapa de diseño, la medida de impedancia del sistema de tierra puede resultar significativamente diferente de lo planeado. Este puede, a su vez, tener serias consecuencia financieras (daños a transformadores, protecciones, equipos, entre otros).

Por tal motivo estimaciones basadas en la clasificación del suelo conducen sólo a valores aproximados de la resistividad. Por tanto, es necesario tomar mediciones directamente en el sitio donde quedará ubicado el sistema de puesta a tierra.

Las técnicas para medir la resistividad del suelo son esencialmente las mismas cualquiera sea el propósito de la medida. Sin embargo la interpretación de los datos recolectados puede variar considerablemente y especialmente donde se encuentren suelos con resistividades no uniformes.

Típicamente, los suelos poseen varias capas, cada una teniendo diferentes resistividades. A menudo cambios laterales también ocurren, pero en comparación con los cambios verticales, estos cambios usualmente son más graduales. Por tanto, las mediciones de resistividad deben ser realizadas para determinar si hay alguna variación importante de la resistividad con la profundidad.

Las diferentes técnicas de medida son descritas en detalle en la **IEEE Std 81-1983 “IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potencial of a ground system”**. Para efectos de este trabajo, sólo será válido el método de Wenner o método de los cuatro puntos, debido a que es uno de los más precisos y utilizados en la actualidad. Mientras que las demás técnicas solo se mencionarán, si se desea ampliar la información de ellas, es necesario remitirse a la normativa mencionada anteriormente.

1.2.1. Medición de la resistividad utilizando muestras de suelo

La estimación de la resistividad del terreno a partir de la medición de la resistividad de una muestra extraída del mismo, se puede realizar empleando el método de los cuatro puntos en una caja prismática pequeña de sección transversal cuadrada, en la que se introduce el material extraído de la probeta respectiva⁴.

Como es de esperar, el valor de resistividad que se obtiene de esta manera resulta menos exacto que el que se obtendría en el terreno real, pero en algunas ocasiones es el único camino posible.

1.2.2. Método variación de la profundidad

Este método, también conocido como método de los tres puntos, son pruebas de resistencia del terreno llevadas a cabo con frecuencia, cada vez que la profundidad de enterramiento de los electrodos de prueba se incrementa. El propósito de esto es forzar la corriente de prueba a través de la profundidad del suelo. El valor medido de resistencia a continuación reflejará la variación de resistividad a una mayor profundidad. Por lo general, la prueba del electrodo es una varilla. Barras son preferibles a otros tipos de electrodos, ya que ofrecen dos ventajas importantes:

- El valor teórico de la resistencia de las barras enterradas, resulta más fácil de calcular con una precisión adecuada, por lo tanto, los resultados se facilitan al interpretarlos.
- La conducción de una varilla en la suave es normalmente una operación fácil.

⁴ IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, Pág. 10.

Uno debe tener en cuenta, sin embargo, que el valor medido de la resistencia debe ser tan exacto como sea posible a fin de que pueda compararse con el valor teórico. Por lo tanto, el método de la caída de potencial es el más utilizado para estas mediciones.

El método de la variación de profundidad proporciona información útil sobre la naturaleza del suelo en las proximidades de la barra (5 a 10 veces la vara de longitud). En caso de que un gran volumen de suelo sea investigado, es preferible utilizar el método de los cuatro puntos, ya que la conducción de las varas de largo no es práctico⁵.

1.2.3. Método de los cuatro puntos

- **Método de Wenner**

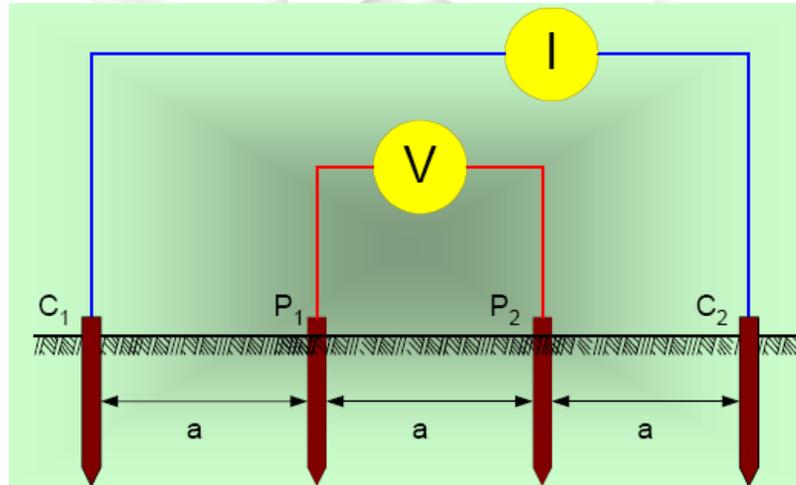
El método de los cuatro puntos de Wenner⁶ es el método más preciso y popular. Las razones para esto es que el método obtiene la resistividad del suelo para capas profundas sin enterrar los electrodos a dichas profundidades. No es necesario un equipo pesado para realizar las medidas. Los resultados no son afectados por la resistencia de los electrodos auxiliares o los huecos creados para hincarlos en el terreno.

El método consiste en enterrar pequeños electrodos tipo varilla, en cuatro huecos en el suelo a una profundidad y espaciados (en línea recta) una distancia “a” como se ilustra en la figura 8.

⁵ IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, Pág. 8.

⁶ Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas, Ignacio Agulleiro, pág. 9

Figura 8. Método de Medición WENNER



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 17.

Una corriente “I” se inyecta entre los dos electrodos externos y el potencial “V” entre los dos electrodos internos es medido por el instrumento. El instrumento mide la resistencia $R = (V/I)$ del volumen de suelo cilíndrico de radio “a” encerrado entre los electrodos internos. La resistividad aparente del suelo ρ_a , a la profundidad “a” es aproximada por la siguiente ecuación (4):

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

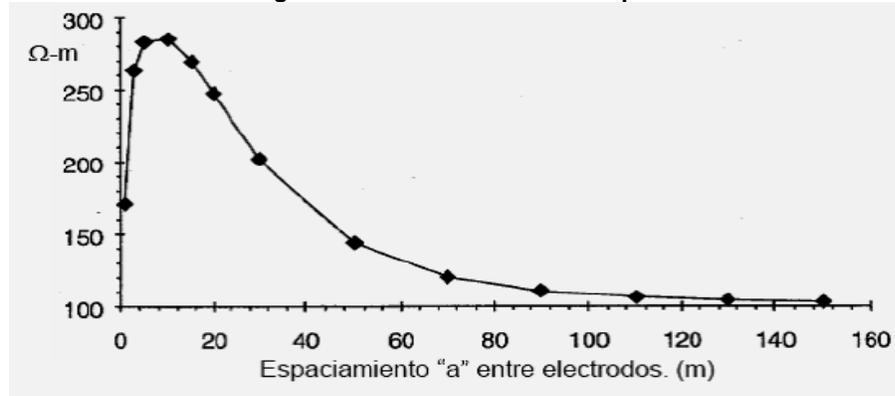
Dado que en la práctica la distancia “a” es mucho mayor que la profundidad de enterramiento, la ecuación se simplifica de la siguiente manera (ver ecuación 5):

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

Para determinar el cambio de la resistividad del suelo con la profundidad, el espaciamiento entre electrodos es variado desde unos pocos metros hasta un espaciamiento más grande que o igual a la máxima dimensión esperada del sistema de puesta a tierra (por ejemplo, la longitud de los conductores enterrados o la profundidad de las varillas). El espaciamiento “a” del electrodo es interpretado como la profundidad a la cual se lee la resistividad del suelo. Para caracterizar la variación de la resistividad del suelo dentro de un área específica, se deben realizar varios grupos de medidas en diferentes direcciones.

Diferentes lecturas tomadas con varios espaciamientos da un grupo de resistividades, las cuales, cuando son graficadas contra el espaciamiento, indica si hay capas de diferente suelo o rocas y da una idea de su respectiva profundidad y resistividad. La figura 9 ilustra este concepto.

Figura 9. Curva de resistividad típica

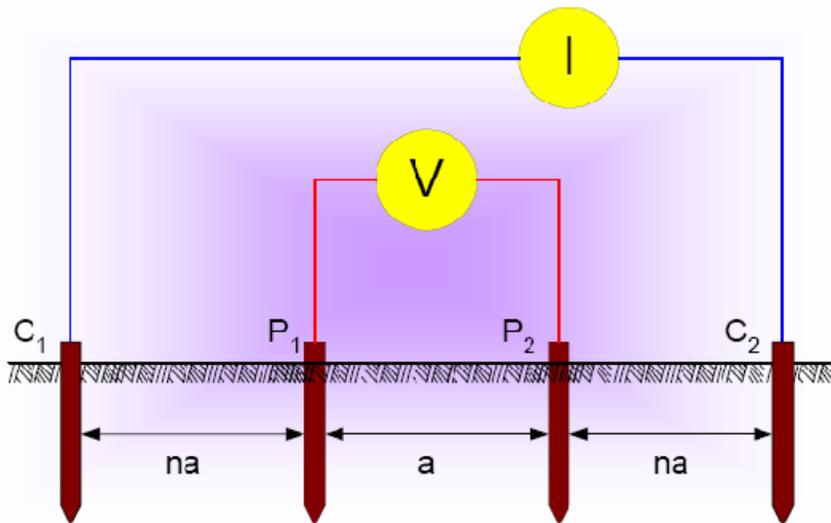


Fuente: Subestaciones de alta y extra alta tensión, Mejía y Villegas, pág. 580, Segunda Edición.

- **Método de Schlumberger**

En este método⁷ los cuatro electrodos se ubican sobre una línea recta y la distancia de los electrodos detectores de potencia P_1 y P_2 que permanecen fijos, es mucho menor que los electrodos inyectoros de corriente C_1 y C_2 , que son los que se trasladan figura No 10.

Figura 10. Método de Medición Schulumberger



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 23

La ecuación fundamental para este caso es (6):

$$\rho_{asch} = \pi R \cdot n(n+1) a \quad (6)$$

Donde:

n : Factor de distancia a modificar en los electrodos de corriente..

a : Distancia entre los electrodos de potencial.

⁷ Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas, Ignacio Agulleiro, pág. 12

Empleando la configuración de *Wenner*, la interpretación de los valores de resistividad aparente resulta más directa, lo cual permite visualizar con facilidad la tendencia del gráfico de campo. También en este caso los instrumentos pueden ser de menor sensibilidad que los empleados con la configuración de *Schlumberger*, ya que a medida que se separan los electrodos de corriente, también lo hacen los de potencial.

Por su parte, la configuración de *Schlumberger* es menos sensible a las variaciones laterales de terreno o buzamiento de los estratos, debido a que los electrodos de potencial permanecen inmóviles. Además, la realización práctica de la medida es más ágil, ya que sólo se desplazan los electrodos de corriente.

2. MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

Esta sección mostrará las formas como se pueden obtener los valores de resistencia de un sistema de puesta a tierra de acuerdo a las configuraciones más típicas y más utilizadas, basándonos en valores de resistividad obtenidos con los diferentes métodos mencionados en la sección anterior.

Un aspecto importante que se debe tener en cuenta a parte de los valores de resistencia son las tensiones de paso, de contacto y transferidas o tensiones peligrosas las cuales en caso de una falla a tierra no deben superar los valores máximos permitidos. Cuando por valores altos de resistividad del terreno, de elevadas corrientes de falla a tierra o tiempos de despeje de la misma, o que por un balance técnico-económico no resulte práctico obtener los valores de resistencia exigido por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, se debe garantizar que las tensiones de paso, contacto y transferidas aplicadas al ser humano en caso de una falla a tierra no superen las máximas permitidas⁸.

2.1. CONFIGURACIONES GEOMÉTRICAS

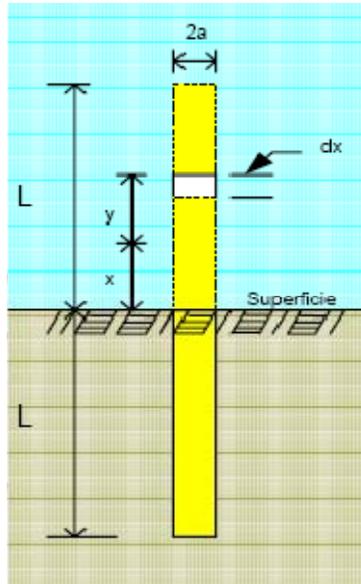
A continuación se deducirán las resistencias de puesta a tierra de las configuraciones más típicas y más utilizadas.

⁸ Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Colombia, Art 15.

2.1.1. Varilla vertical

Considerando un electrodo de longitud “L”, diámetro “2a” tal como se observa en la figura 10, junto son su imagen sobre la superficie de la tierra.

Figura. 11. Modelo varilla vertical



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 69

El problema electrostático consiste en calcular la capacitancia, asumiendo una carga uniforme sobre la superficie, esto significa calcular el potencial promedio sobre el electrodo, luego de realizar los cálculos correspondientes obtenemos la siguiente ecuación (7) para obtener la resistencia estimada con esta configuración.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{a} \quad (7)$$

Donde:

ρ : resistividad del terreno

L: longitud de la barra en (m)

A: radio de la barra en (m)

Ln: logaritmo natural

R: resistencia en (Ω)

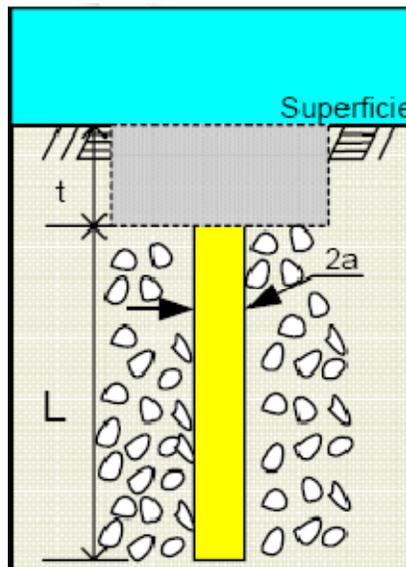
d: 2a

La diferencia entre una y otra para las longitudes y radios normales no es mayor del 6%.

2.1.2. Varilla vertical enterrada a partir de una profundidad “t”.

En la mayoría de los casos no se encuentran enterradas a partir de la superficie del terreno, sino a partir de una profundidad t, como se muestra en la figura 12.

Figura. 12. Varilla vertical enterrada a una profundidad t.



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 68

La resistencia será igual a la siguiente ecuación (8):

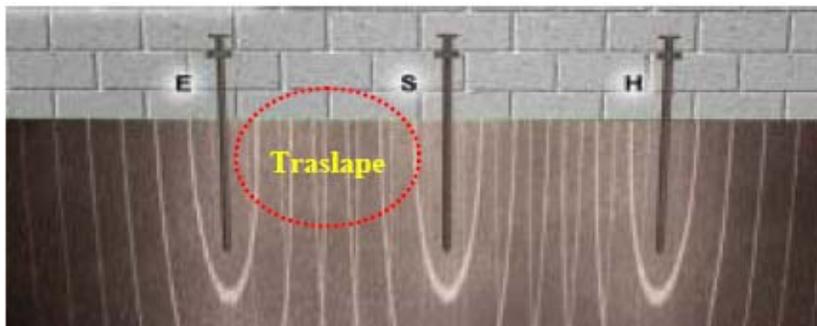
$$R = \frac{\rho}{2\pi L} L n \left(\frac{L}{a} \sqrt{\frac{3L+4t}{L+4t}} \right) \quad (8)$$

Nota: el objetivo de enterrar una distancia “t” al electrodo debajo de la superficie es para disminuir los posibles gradientes de potencial sobre la superficie del terreno en los contornos de la barra.

2.1.3. Electrodo en paralelo

Si bien el objetivo es disminuir la resistencia equivalente, esto se logra teniendo un espaciamiento mínimo entre electrodos igual al doble de su longitud con el fin de evitar zonas de interferencia como se observa en la figura 13

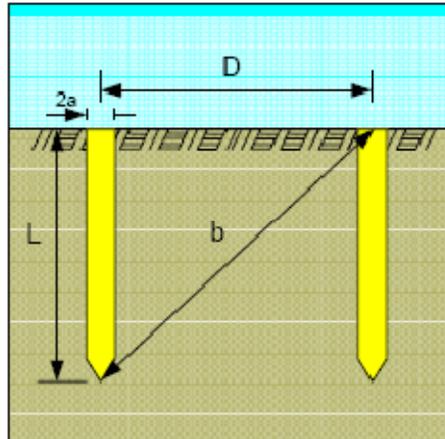
Figura. 13. Zonas de interferencia (traslape), cuando los electrodos no están espaciados suficientemente.



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 70

Resistencia de tierra de 2 electrodos separados a una distancia D, como se observa en la figura.14.

Figura. 14. Dos electrodos de puesta a tierra.



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 71

$$R_2 = \frac{\rho}{4\pi L} \operatorname{Ln} \left(\frac{(b+L)^2 - D^2}{D^2 - (b+L)^2} \right) \quad (9)$$

Haciendo $D = 2L$ y reemplazándolo en (9)

$$R_2 = \frac{\rho}{4\pi L} \operatorname{Ln} \left(\frac{10,47 L - 2}{2 - 1,53 L} \right) \quad (10)$$

Se puede obtener un índice de reducción de resistencia igual a la siguiente ecuación (11):

$$K = \frac{R_2 \text{ electrodo}}{R_1 \text{ electrodo}} \quad (11)$$

Considerando el mismo criterio se puede calcular la resistencia equivalente para varios electrodos en paralelo de longitud y espaciamento iguales, así como el índice de reducción como se observa en la tabla 2.

**MÉTODOS PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA EN TERRENOS, EN USADOS
PARA PUESTAS A TIERRA**

Tabla 2A: Resistencia de puesta a tierra de electrodos paralelos, alineados e igualmente espaciados (L=2,4m, $\phi = 5/8$ pulg. $R_1 = 0,425\rho$)

$L = 2,4 \text{ m}$		$d = \frac{5}{8}$		$R_1 = 0,425 \rho$					
Separación	2,5 mm		3 m		4 m		5 m		
Número de Jabalinas	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	
2	0,241 $\rho\Omega$	0,566	0,237 $\rho\Omega$	0,557	0,231 $\rho\Omega$	0,511	0,228 $\rho\Omega$	0,536	
3	0,173 $\rho\Omega$	0,408	0,169 $\rho\Omega$	0,397	0,163 $\rho\Omega$	0,383	0,159 $\rho\Omega$	0,374	
4	0,137 $\rho\Omega$	0,324	0,133 $\rho\Omega$	0,313	0,127 $\rho\Omega$	0,298	0,123 $\rho\Omega$	0,289	
5	0,115 $\rho\Omega$	0,270	0,110 $\rho\Omega$	0,260	0,105 $\rho\Omega$	0,246	0,101 $\rho\Omega$	0,237	
6	0,099 $\rho\Omega$	0,233	0,095 $\rho\Omega$	0,223	0,089 $\rho\Omega$	0,210	0,086 $\rho\Omega$	0,202	
7	0,087 $\rho\Omega$	0,206	0,083 $\rho\Omega$	0,196	0,078 $\rho\Omega$	0,184	0,075 $\rho\Omega$	0,176	
8	0,078 $\rho\Omega$	0,185	0,075 $\rho\Omega$	0,176	0,070 $\rho\Omega$	0,164	0,066 $\rho\Omega$	0,156	
9	0,071 $\rho\Omega$	0,168	0,068 $\rho\Omega$	0,159	0,063 $\rho\Omega$	0,148	0,060 $\rho\Omega$	0,141	
10	0,065 $\rho\Omega$	0,154	0,062 $\rho\Omega$	0,140	0,057 $\rho\Omega$	0,135	0,054 $\rho\Omega$	0,128	
11	0,060 $\rho\Omega$	0,142	0,057 $\rho\Omega$	0,134	0,053 $\rho\Omega$	0,124	0,050 $\rho\Omega$	0,118	
12	0,056 $\rho\Omega$	0,132	0,053 $\rho\Omega$	0,125	0,049 $\rho\Omega$	0,115	0,046 $\rho\Omega$	0,109	
13	0,053 $\rho\Omega$	0,124	0,050 $\rho\Omega$	0,117	0,046 $\rho\Omega$	0,107	0,043 $\rho\Omega$	0,101	
14	0,049 $\rho\Omega$	0,117	0,047 $\rho\Omega$	0,110	0,043 $\rho\Omega$	0,101	0,040 $\rho\Omega$	0,095	
15	0,047 $\rho\Omega$	0,110	0,044 $\rho\Omega$	0,103	0,040 $\rho\Omega$	0,095	0,038 $\rho\Omega$	0,089	

Fuente: Manual para el diseño y construcción de mallas conectadas a tierra para subestaciones y equipos, pág. 6, Impreso 2004

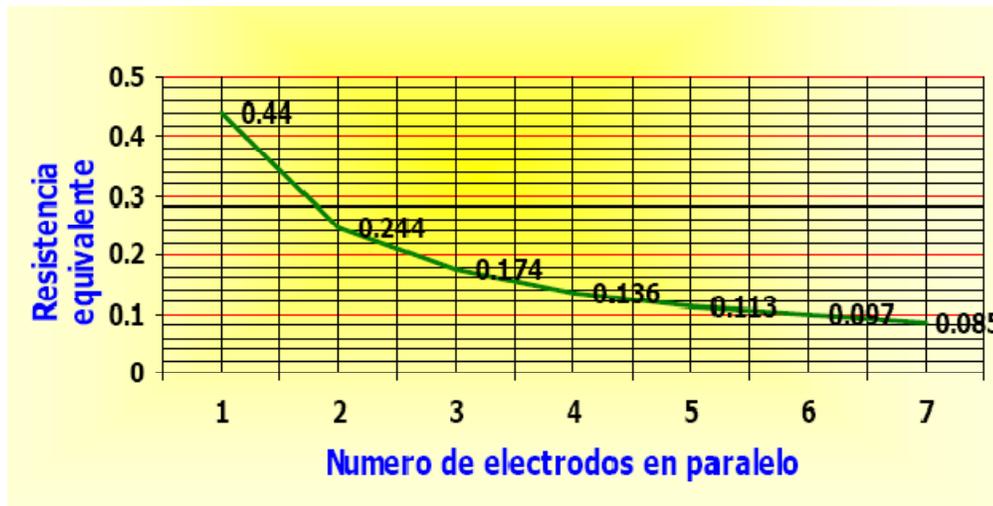
TABLA 2B Resistencia de puesta a tierra de electrodos paralelos, alineados e igualmente espaciados (L=2,4m, $\phi = 3/4$ pulg. $R_2 = 0,413\text{p}$)

$L = 2,4 \text{ m}$		$d = \frac{3}{4}''$		$R_1 = 0,413 \text{ pa}$				
Separación	2,5 mm		3 m		4 m		5 m	
Número de Jabalinas	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,235 pa	0,568	0,231 pa	0,559	0,225 pa	0,546	0,222 pa	0,537
3	0,169 pa	0,410	0,165 pa	0,399	0,159 pa	0,384	0,155 pa	0,375
4	0,134 pa	0,326	0,130 pa	0,315	0,124 pa	0,300	0,120 pa	0,290
5	0,112 pa	0,272	0,108 pa	0,262	0,102 pa	0,217	0,098 pa	0,238
6	0,097 pa	0,235	0,093 pa	0,225	0,087 pa	0,211	0,084 pa	0,203
7	0,086 pa	0,208	0,082 pa	0,198	0,076 pa	0,185	0,073 pa	0,177
8	0,077 pa	0,186	0,073 pa	0,177	0,068 pa	0,165	0,065 pa	0,157
9	0,070 pa	0,169	0,066 pa	0,160	0,061 pa	0,149	0,058 pa	0,142
10	0,064 pa	0,155	0,061 pa	0,147	0,056 pa	0,136	0,053 pa	0,129
11	0,059 pa	0,144	0,056 pa	0,136	0,052 pa	0,125	0,049 pa	0,119
12	0,055 pa	0,134	0,052 pa	0,126	0,048 pa	0,116	0,045 pa	0,110
13	0,052 pa	0,125	0,049 pa	0,118	0,045 pa	0,108	0,042 pa	0,102
14	0,049 pa	0,118	0,046 pa	0,111	0,042 pa	0,101	0,039 pa	0,096
15	0,046 pa	0,111	0,043 pa	0,104	0,039 pa	0,096	0,037 pa	0,090

Fuente: Manual para el diseño y construcción de mallas conectadas a tierra para subestaciones y equipos, pág. 6, Impreso 2004

Del cuadro se puede apreciar que el índice de reducción para 4 electrodos es de 32% y se obtiene una notable reducción hasta 6 electrodos y a partir de ello se satura la disminución de la resistencia equivalente con el aumento del número de electrodos en paralelo, como se puede apreciar en la siguiente figura 15.

Figura. 15. Curva resistencia equivalente en función del número de electrodos en paralelo.



Fuente: Manual para el diseño y construcción de mallas conectadas a tierra para subestaciones y equipos, pág. 7, Impreso 2004

En consecuencia: para evitar la saturación en la disminución de la resistencia con el aumento de electrodos en paralelo, debe evaluarse si se justifica económicamente. Una recomendación práctica es no poner más de 6 electrodos en paralelo.

2.1.4. Electrodo horizontales

La resistencia de aterramiento de un conductor o electrodo enterrado horizontalmente (ver figura 16) en el suelo a una profundidad “h” metros será igual a la siguiente ecuación (12):

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L^2}{ah} - 2 + \frac{2h}{L} - \left(\frac{h}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right) \right] \Omega \quad (12)$$

Donde:

R : resistencia en (Ω).

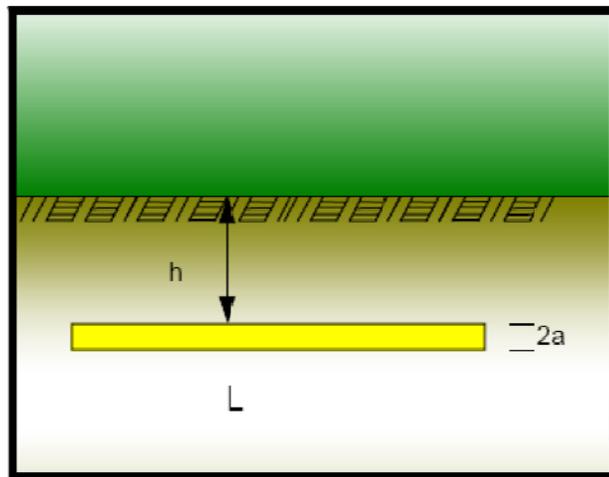
L : longitud en (m).

a : radio del electrodo en (m).

n : profundidad de enterramiento en (m).

También se puede utilizar la ecuación (13) en vez de la (12),

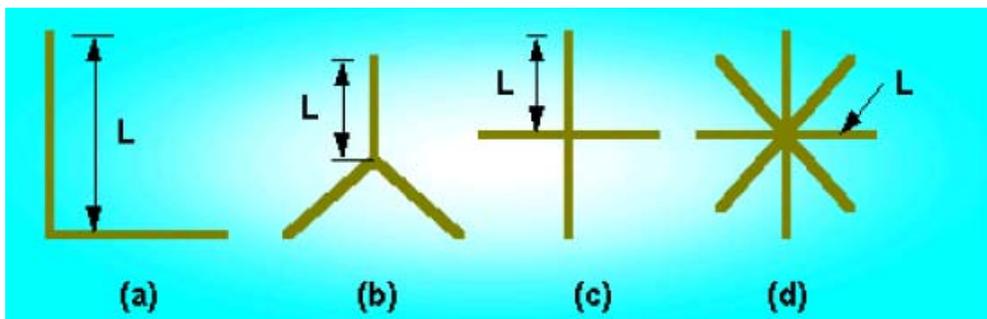
Figura. 16. Electrodo horizontal enterrado a una profundidad "h".



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 71

Se pueden enterrar electrodos con diferentes configuraciones como se observa en la figura. 17.

Figura. 17. Configuraciones horizontales de conductores.



Fuente: Documento Curso de puestas a tierras TECSUP, pág. 71

2.1.5. Dos conductores en ángulo recto (fig. 17.a)

Con la siguiente ecuación (14) se puede calcular su resistencia:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\text{Ln} \left(\frac{L^2}{2ah} \right) - 0,2373 + 0,8584 \frac{h}{L} + 1,656 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 10,85 \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right] \quad (14)$$

2.1.6. Configuración en estrella con tres puntos (fig. 17.b)

Se puede calcular su resistencia con la siguiente ecuación (15):

$$R = \frac{\rho}{3\pi L} \left[\text{Ln} \left(\frac{L^2}{2ah} \right) - 1,077 - 0,836 \frac{h}{L} + 3,808 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 13,824 \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right] \quad (15)$$

2.1.7. Configuración de una malla

Otra forma de configurar una puesta a tierra es mediante una malla entrelazada por conductores de cobre tal como se observa en la figura 18, la unión de los puntos de la malla debe ser tal que no exista calentamiento en dicha unión, con ello se pueden lograr resistencias más bajas que en las configuraciones anteriores.

2.2. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE MALLA

Según la fórmula experimental de "Laurent", se tiene la siguiente fórmula (16) para el cálculo de puesta a tierra de una malla:

$$R = \frac{\rho}{\sqrt[4]{S/\pi}} + \frac{\rho}{L} \quad (\Omega) \quad (16)$$

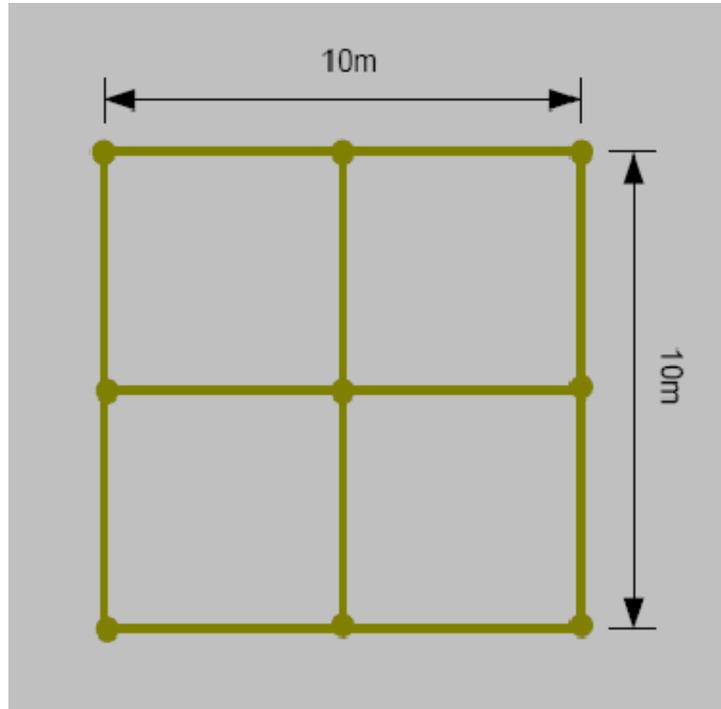
Donde:

ρ : resistividad (Ω - m).

s : superficie que cubre la malla (m^2).

L : longitud total de conductor de la malla (m).

Figura. 18. Malla de puesta a tierra de 10 x 10 m².



Fuente: Understanding Ground Resistance Testing AEMC, pág. 16

2.2.1. Tensiones presentadas en las mallas de tierra

Consideramos una malla formada por “n” conductores dispuestos en cada dirección con separación uniforme “D” entre ellos, enterrada a una profundidad fija “h” metros, siendo “L” la longitud total de conductor enterrado como se visualiza en la figura 18. En el momento en que la falla difunde una corriente de I Amperes al terreno, una persona puede quedar expuesta a los siguientes voltajes de riesgos (Fig. 19)

- **Tensión de paso (Vp).**

Corresponde a la diferencia de potencial entre dos puntos ubicados sobre la superficie del suelo, separados a una distancia de un metro:

Donde el K_S se puede hallar por la formula (17)

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D+h} + \frac{1}{3D+h} + \dots + \frac{1}{(n-1)D+h} \right] (17)$$

- **Tensión de contacto o toque.**

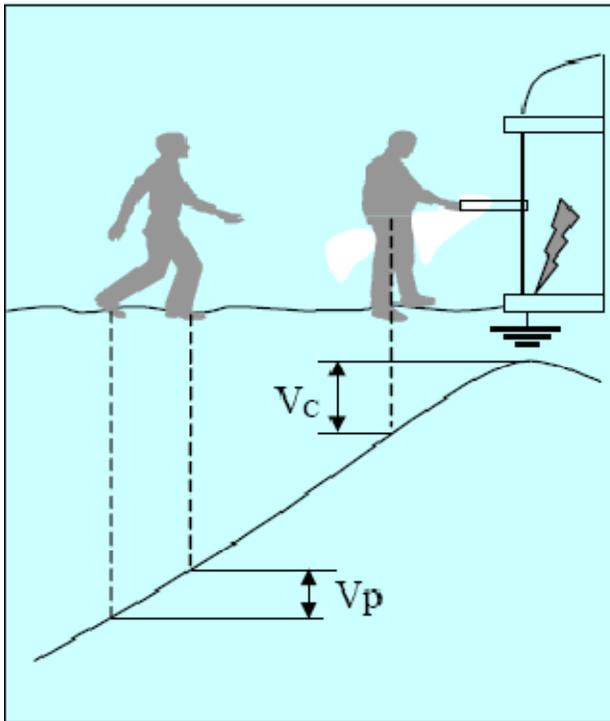
La tensión de contacto mano – pie corresponde a la diferencia existente entre el potencial de un punto sobre la superficie del terreno y el potencial que adquiere un conductor metálico unido a la malla. Para su estimación, se utiliza la expresión (18) correspondiente al máximo posible o tensión de contacto.

$$V_m = K_m K_i \rho_e \frac{I}{L} (\text{volts}) (18)$$

Donde su coeficiente se calcula por la siguiente formula (19):

$$K_m = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{D^3}{16hd} \right) + \ln \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{5}{4} \dots \dots \frac{2n-3}{2n-2} \right) \right] (19)$$

Figura. 19. Tensión de paso y contacto (toque).



Fuente: Understanding Ground Resistance Testing AEMC, pág. 16

2.2.2. Tensiones peligrosas tolerables por el ser humano

Estas tensiones presentes en la superficie del terreno sobre una malla de tierra que difunde una corriente de falla, no deben superar en ningún caso las tensiones tolerables por el cuerpo humano. La máxima diferencia de potencial a que puede ser sometido el cuerpo humano, en base a los posibles puntos de contacto se calcula mediante las expresiones:

- **Máxima tensión de paso tolerable**

Se puede hallar por medio de la siguiente expresión (20)

$$V_P = \frac{116+0,696c\rho_S}{\sqrt{t}} \text{ (volts) } (20)$$

- **Máxima tensión de contacto tolerable [ver figura 19]**

Se puede hallar por medio de la siguiente fórmula (21)

$$V_C = \frac{116+0,174c\rho_S}{\sqrt{t}} \text{ (volts) } (21)$$

En donde:

ρ [Ω -m]: resistividad de la capa superficial.

t [seg] : tiempo global de exposición.

c : factor de corrección debido a la presencia de la capa superficial resistiva. En la práctica se estima $c = 1$.

Los límites de diseño se han establecido como tensiones y para llegar a los límites apropiados, es necesario considerar la impedancia a través del cuerpo humano, la resistencia de contacto de la mano, la resistencia del calzado y la resistividad del material superficial bajo el calzado. Suponiendo:

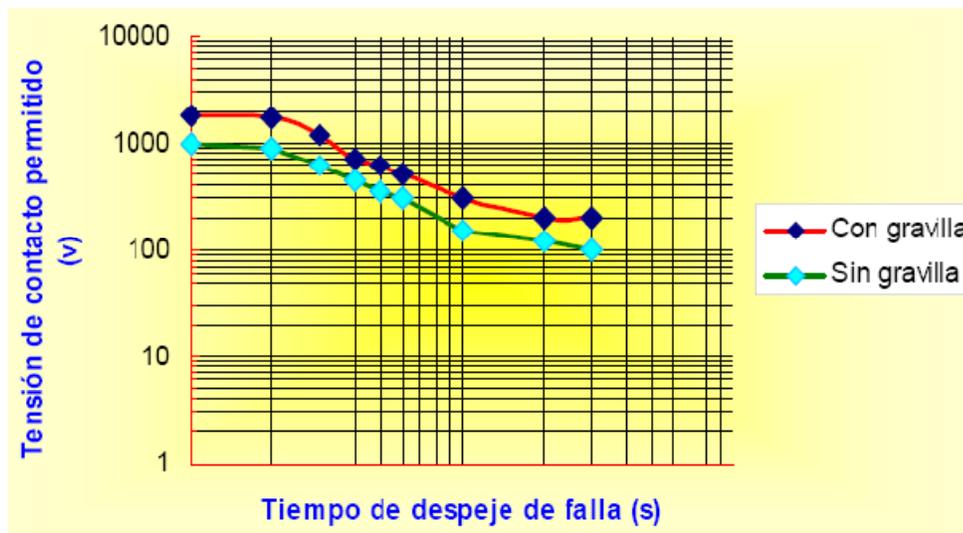
100 Ohm – metro la resistividad del suelo.

1000 Ohm para la impedancia del ser humano.

4000 Ohm de impedancia para el calzado.

300 Ohm resistencia de contacto de la mano.

Figura. 20. Potenciales de contacto permitidos.



Fuente: Understanding Ground Resistance Testing AEMC, pág. 17

Finalmente, la resistencia de puesta a tierra tiene tres componentes: La resistencia del electrodo conectado a tierra, la resistencia de contacto entre el electrodo y tierra y la resistencia de la tierra alrededor del electrodo.

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra depende de la geometría del electrodo y de la manera cómo está ubicado en la tierra y pueden ser: varilla vertical, varilla vertical enterrada a partir de una profundidad "t", electrodos en paralelo, electrodos horizontales y malla.

Los factores que influyen en la reducción de la resistencia de puesta a tierra son: el diámetro del electrodo, el espaciamiento entre electrodos, su longitud y el número de electrodos en paralelo, este último se justifica técnica y económicamente al tener como máximo seis electrodos en paralelo.

La puesta a tierra del tipo malla se utiliza en casos que se desee un valor bajo de resistencia, como es el caso especial en las subestaciones. Cuando se hace necesario controlar las tensiones de paso y tensiones de toque en las cercanías del sistema de puesta a tierra esta es una de las opciones más apropiadas recomendadas.

Los valores máximos de la tensión de paso y de toque, depende de la resistividad de la superficie del terreno, del tiempo de exposición de la falla y de la presencia de la capa superficial resistiva.

2.3. INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN Y EL ESPACIAMIENTO DE ELECTRODOS

- Diámetro del electrodo: la resistencia a tierra no disminuye considerablemente con el aumento del diámetro del electrodo, un incremento el doble del diámetro, la resistencia disminuye sólo al 11%.

- Efecto de espaciamiento y de longitud: si dos electrodos están ubicados muy próximos uno de otro, hay interferencia de campos eléctricos entre ellos y aumenta el valor de la resistencia, una separación menor que el doble de su longitud no es aconsejable.
- El aumento del número de electrodos, como se observó cuando se incrementa mucho el número de electrodos, debido al efecto “mutuo”, la resistencia a tierra aumenta, es decir, hay una cierta saturación, lo mismo sucede con la separación entre ellos. Habrá siempre un valor bajo el cual la resistencia aumenta y encima del cual la influencia de disminución es mínima.

3. MÉTODOS CON LAS CUALES SE OBTENDRÍA LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

Esta sección trata principalmente de los métodos existentes en la actualidad con las cuales se obtendría la medida de la resistencia del sistema de puesta a tierra, además, se realiza una explicación de la importancia de la medición de este parámetro.

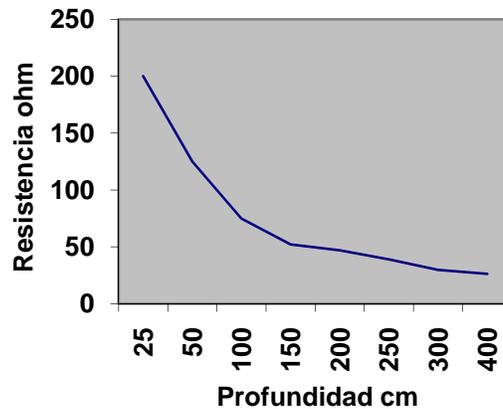
La resistencia del sistema de puesta a tierra es un factor muy importante ya que de ella depende la correcta operación de los dispositivos de protección por fallas de aislación y sobretensiones transitorias, es decir, es la resistencia que ofrece un sistema de tierra al paso de la corriente eléctrica y esta a su vez depende de la resistividad del terreno, las características físicas del electrodo a tierra (diámetro, área, longitud, etc.), también de la longitud y el área de los conductores.

3.1. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA SEGÚN EL ÁREA DE LOS CONDUCTORES

- **Variación de la resistencia en función a la profundidad del electrodo.**

A través de la expresión mostrada en la figura 21 que se muestra abajo, se puede calcular los efectos de la variación de la resistencia de tierra en función de la profundidad alcanzada por un electrodo.

Figura. 21. Resistencia en función de su profundidad



Fuente: Instituto Politécnico Nacional Sistemas De Puesta A Tierra Para Edificios Inteligentes, pág. 22 Edición 3

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas “RETIE”, especifica que la profundidad mínima de enterrado de una varilla debe ser de 2.4 metros (8 pies)⁹.

Para varillas de acero de sección circular, se requiere que su diámetro no sea menor a 1.59 cm (5/8”) y para varillas de cobre o de acero recubiertas de cobre el diámetro mínimo debe de ser de 1.27 cm (1/2”), para terrenos duros como el tepetate es recomendable varillas con un diámetro de 1.91 cm (3/4”).

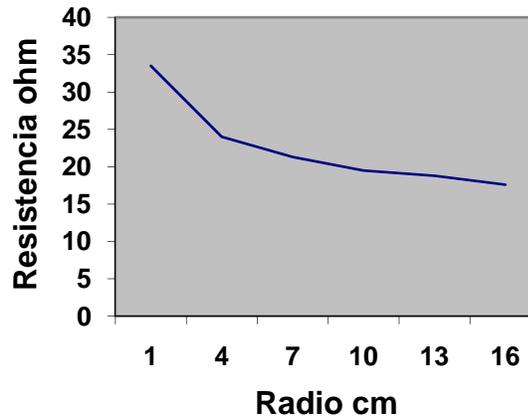
- **Variación de la resistencia en función del diámetro del electrodo.**

Ciertamente, la resistencia de un electrodo de sección circular se reduce al incrementarse su diámetro, sin embargo tiene un límite en el que ya no es recomendable aumentarlo debido a que el valor de la resistencia del terreno permanece prácticamente constante.

De acuerdo con la figura 22 que se muestra más adelante, se puede calcular y graficar los valores de la resistencia en función al diámetro del electrodo.

⁹ Reglamento de Técnico de Instalaciones Eléctricas, Colombia, Art. 15.3.1.2 d

Figura. 22. Resistencia en función del diámetro del electrodo



Fuente: Instituto Politécnico Nacional Sistemas De Puesta A Tierra Para Edificios Inteligentes, pág. 23 Edición 3

De acuerdo a la figura 22, se puede decir que no es recomendable invertir en electrodos de gran diámetro, ya que no se reduce considerablemente la resistencia, por lo cual es mejor practicarse otros métodos.

Un buen diseño de puesta a tierra debe reflejarse en el control de las tensiones de paso, de contacto y transferidas; sin embargo, la limitación de las tensiones transferidas principalmente en subestaciones eléctricas es igualmente importante. En razón a que la resistencia de puesta a tierra es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial y controla las tensiones transferidas, pueden tomarse los siguientes valores máximos de RPT (ver tabla 4) adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050, NTC 4552.

Tabla 4. Valores de referencia para sistemas de puesta a tierra

APLICACIÓN	VALORES MÁXIMOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
Estructuras de líneas de transmisión.	20Ω
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1Ω
Subestaciones de media tensión.	10Ω
Protección contra rayos.	10Ω

Fuente: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas

3.2. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

En esta parte se presentan los métodos más comunes en la medición de resistencia de puesta a tierra de sistemas pequeños y medianos principalmente, donde el valor de la resistencia puede ser hasta de 20 Ohms.

3.2.1. Método de los tres puntos

En la figura 23 se tiene la ilustración del método de los tres puntos o método de triangulación. En este método se utilizan dos electrodos auxiliares con resistencias R_y y R_z respectivamente. Estos dos electrodos se colocan de tal forma que conformen un triángulo con el electrodo en estudio. Se miden las resistencias entre cada electrodo y se determina la resistencia del electrodo en estudio, R_x , mediante la siguiente fórmula (22):

$$R_x = (R_1 + R_2 - R_3) / 2 \quad (22)$$

Donde R_1 , R_2 y R_3 quedan determinadas por las fórmulas indicadas en la figura 23.

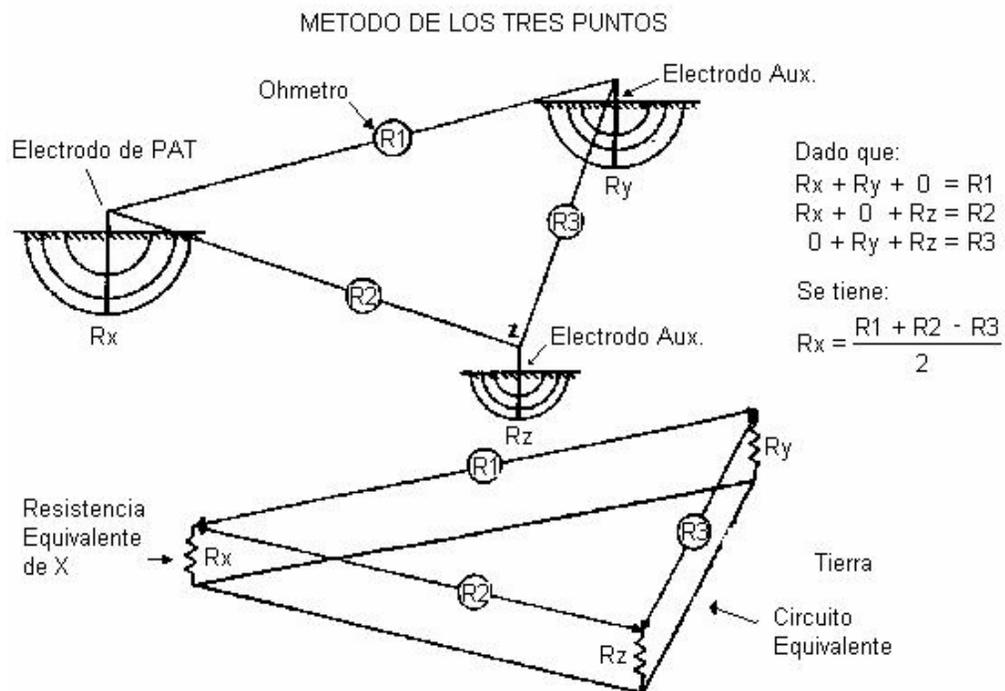
En este método se tratan de utilizar electrodos auxiliares que se presuman sean de resistencia similar al electrodo en estudio para obtener mejores resultados.

Igualmente, se clavan los electrodos auxiliares de modo tal que queden todos los electrodos lo suficientemente alejados y no se solapen las áreas de influencia de la resistencia de cada uno y evitar resultados absurdos. Se recomienda una distancia entre electrodos de 8 metros o más cuando se estudie un electrodo simple.

En este método existen influencias marcadas por objetos metálicos enterrados y no existe forma de eliminar dicha influencia. Tampoco es muy efectivo a la hora de evaluar valores bajos de resistencia o valores de resistividad muy altos del terreno involucrado donde la resistencia de contacto de los electrodos sea apreciable.

Otra desventaja es que en este método se considera que el terreno es completamente homogéneo. Por estas razones este método es poco utilizado. Sin embargo, puede ser útil cuando existen limitaciones de espacio y no se pueden colocar los electrodos en línea recta para realizar una medición con el método de caída de potencial, por ejemplo.

Figura. 23. Método de los tres Puntos

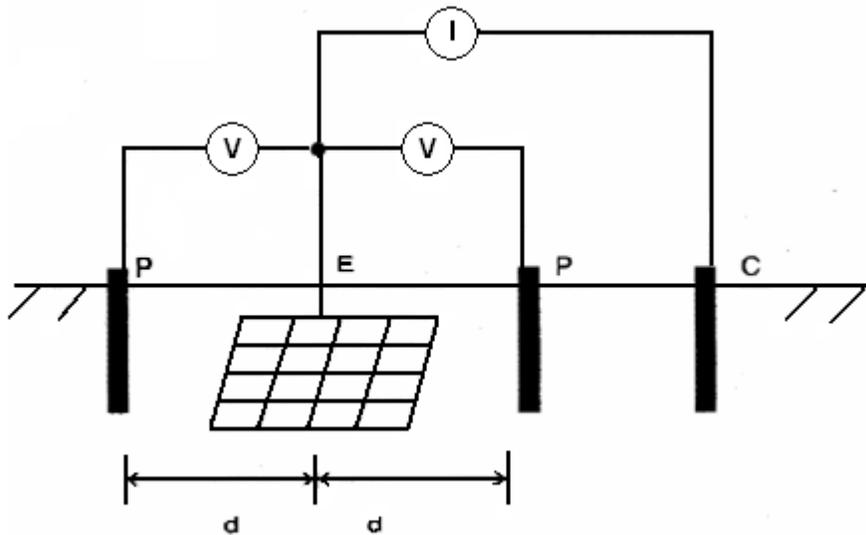


Fuente: Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas, Ignacio Agulleiro, pág. 14

3.2.2. Método de caída de potencial

La resistencia de puesta a tierra debe ser medida antes de la puesta en funcionamiento de un sistema eléctrico, como parte de la rutina de mantenimiento o excepcionalmente como parte de la verificación de un sistema de puesta a tierra. Para su medición se debe aplicar el método de Caída de Potencial, cuya disposición de montaje para medición se muestra en la figura 24.

Figura. 24. Método de la caída de Potencial para medir la RPT



Fuente: EEPP Normas de montajes complementarios medida de la resistencia de puesta a tierra, pág. 6, Última edición agosto-2005

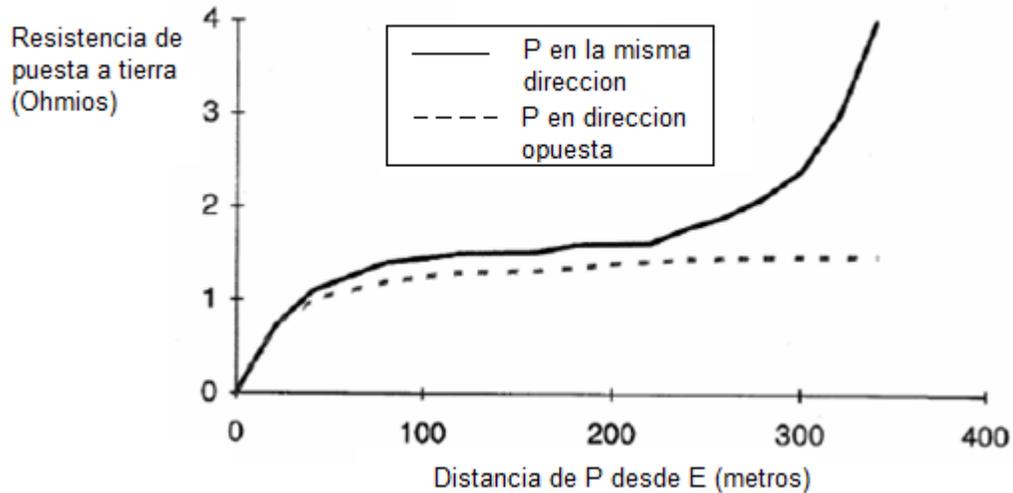
El método consiste en pasar una corriente entre el electrodo o sistema de puesta a tierra a medir y un electrodo de corriente auxiliar (C) y medir el voltaje con la ayuda de un electrodo auxiliar (P) como muestra la figura 24. Para minimizar la influencia entre electrodos, el electrodo de corriente, se coloca generalmente a una sustancial distancia del sistema de puesta a tierra. Típicamente ésta distancia debe ser cinco veces superior a la dimensión más grande del sistema de puesta a tierra bajo estudio.

El electrodo de voltaje debe ser colocado en la misma dirección del electrodo de corriente, pero también puede ser colocado en la dirección opuesta como lo ilustra la figura 24. En la práctica, la distancia “d” para el electrodo de voltaje se elige al 62% de la distancia del electrodo de corriente. Esta distancia está basada en la posición teóricamente correcta para medir la resistencia exacta del electrodo para un suelo de resistividad homogéneo.

La localización del electrodo de voltaje es muy crítica para medir la resistencia de un sistema de puesta a tierra. La localización debe ser libre de cualquier influencia del sistema de puesta tierra bajo medida y del electrodo auxiliar de corriente. La manera más práctica de determinar si el electrodo de voltaje está fuera de la zona de influencia de los electrodos es obtener varias lecturas de resistencias moviendo el electrodo de voltaje en varios puntos entre el sistema de puesta a tierra y el electrodo de corriente. Dos o tres lecturas constantes y consecutivas pueden asumirse como representativas del valor de resistencia verdadera

La figura 25 muestra una gráfica típica de resistencia contra distancia del electrodo de voltaje (P). La curva muestra como la resistencia es cercana a cero cuando (P) se acerca al sistema de puesta a tierra y se aproxima al infinito hacia la localización del electrodo de corriente (C). El punto de inflexión en la curva corresponderá a la resistencia de puesta a tierra del sistema bajo estudio.

Figura. 25. Resistencia de puesta a tierra versus distancia de (P)

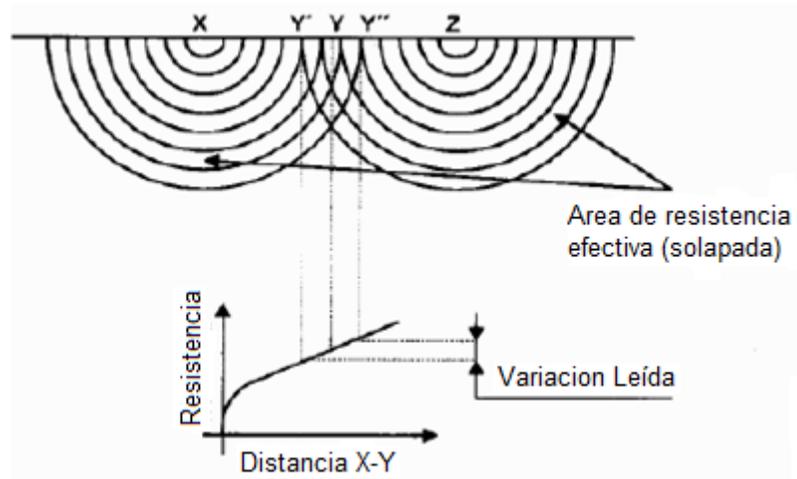


Fuente: EEPP Normas de montajes complementarios medida de la resistencia de puesta a tierra, pág. 7, Última edición agosto-2005

- **Gradientes de Potencial**

La medición de la RPT por el método de Caída de Potencial genera gradientes de potencial en el terreno producto de la inyección de corriente por tierra a través del electrodo de corriente. Por ello, si el electrodo de corriente, el de potencial y el sistema de puesta a tierra se encuentran muy cercanos entre sí, ocurrirá un solapamiento de los gradientes de potencial generados por cada electrodo: resultando una curva en la cual el valor de resistencia medida se incrementará con respecto a la distancia, tal como se muestra en la figura 26.

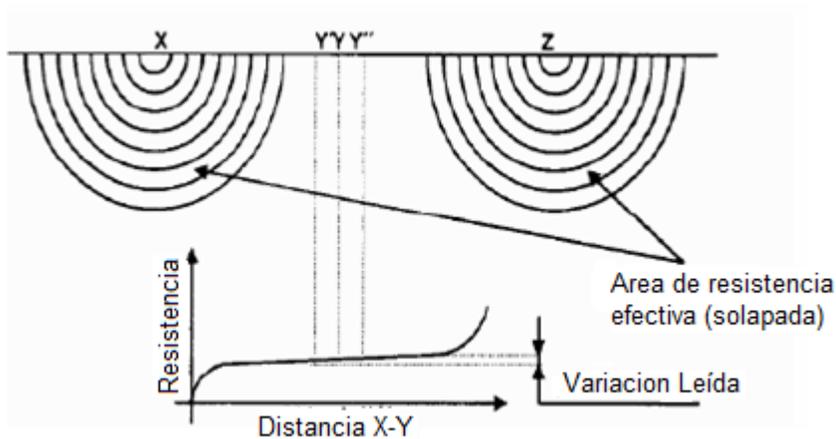
Figura.26. Solapamiento de los gradientes de potencial



Fuente: Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas, Ignacio Agulleiro, pág. 17

Al ubicarse el electrodo a una distancia lo suficientemente lejos del sistema de puesta a tierra a medir, la variación de posición del electrodo de potencial, desde la puesta a tierra hasta el electrodo de corriente, no producirá solapamiento entre los gradientes de cada electrodo, originándose entonces una curva como la mostrada en la figura 27.

Figura. 27. Curvas de resistencia versus distancia sin solapamiento de gradientes de potencial



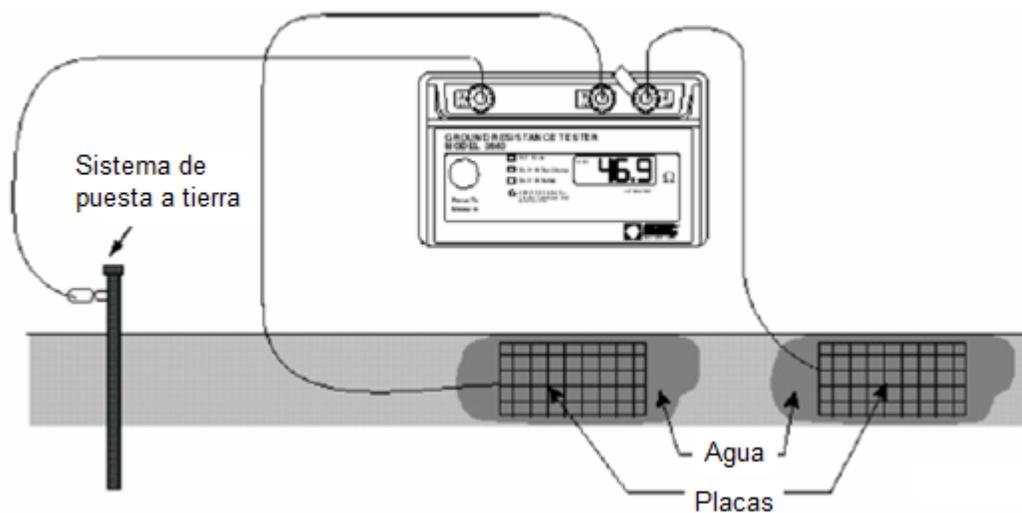
Fuente: Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas, Ignacio Agulleiro, pág. 18

En la figura 27 puede observarse como existe una porción de la curva que permanece casi invariable, la cual será más prolongada o corta dependiendo de la separación de los electrodos de corriente (Z) y bajo prueba (X). El valor de resistencia asociada a este sector de la curva será el correcto valor de resistencia de puesta a tierra.

3.2.3. Medida de resistencia de puesta a tierra sobre pavimentos o suelos de concreto

Algunas veces el sistema de puesta a tierra se encuentra rodeado de suelos cubiertos por pavimentos, concreto o cemento y en los cuales no es fácil la colocación de los electrodos de prueba tipo varilla. En tales casos pueden usarse placas de cobre para reemplazar los electrodos auxiliares y agua para remojar el punto y disminuir la resistencia de contacto con el suelo, como se ilustra en la figura 28.

Figura. 28. Medida de resistencia de puesta a tierra en suelos o pavimentos



Fuente: EEPP Normas de montajes complementarios medida de la resistencia de puesta a tierra, pág. 8, Última edición agosto-2005

Los procedimientos y requerimientos para la implementación de este método de medición deberá estar acorde a lo indicado en la ASTM D 3633-98¹⁰.

Las placas de cobre deberán ser dispuestas a la misma distancia en que se colocarían los electrodos auxiliares de acuerdo al método de la Caída de Potencial previamente descrito. Las dimensiones de la placa deberán ser de 30x30 cm y espesor de 3.8 cm Se debe verter agua sobre las placas y remojar el sitio donde serán ubicadas para mejorar el contacto con el suelo. Las placas realizarán la misma función de los electrodos auxiliares.

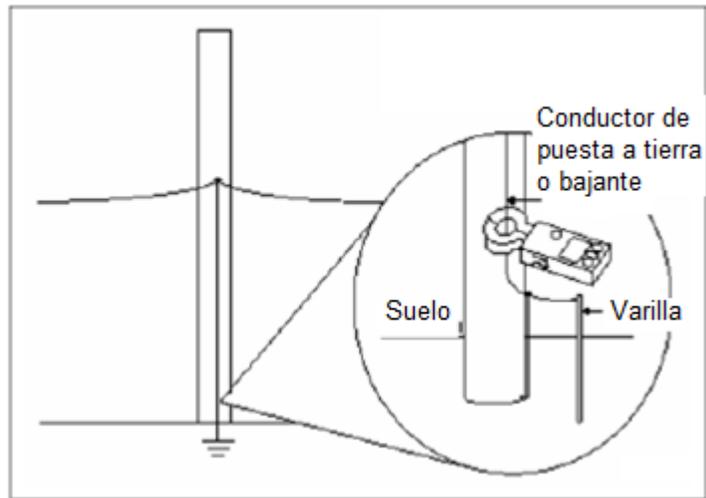
3.2.4. Medida de la RPT mediante medidor tipo pinza

Este es un método práctico que viene siendo ampliamente usado para medir la puesta a tierra en sitios donde es imposible usar el método convencional de caída de potencial, como es el caso de lugares densamente poblados, celdas subterráneas, centros de grandes ciudades, etc.

El medidor tipo pinza mide la resistencia de puesta a tierra de una varilla o sistema de puesta a tierra simplemente abrazando el conductor de puesta a tierra o bajante como lo ilustra la figura 29.

¹⁰ “Estandard Test Method For Electrical Resistivity Of Membrane- Pavement Systems”.

Figura. 29. Medición de la RPT Utilizando pinza



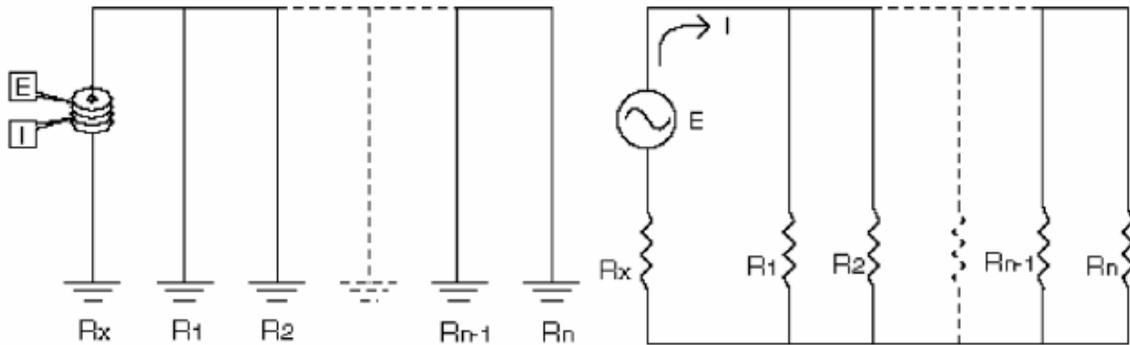
Fuente: EEPP Normas de montajes complementarios medida de la resistencia de puesta a tierra, pág. 9, Última edición agosto-2005

- **Principio de operación**

El neutro de un sistema multi-aterizado puede ser representado como el circuito simple de resistencias de puesta a tierra en paralelo figura 30. Si un voltaje “E” es aplicado al electrodo o sistema de puesta a tierra Rx, la corriente “I” resultante fluirá a través del circuito.

Típicamente los instrumentos poseen un oscilador de voltaje a una frecuencia de 1.6 kHz y la corriente a la frecuencia generada es recolectada por un receptor de corriente. Un filtro interno elimina las corrientes de tierra y ruido de alta frecuencia.

Figura. 30 Circuito equivalente para un sistema multiaterrizado.



Fuente: Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas, Ignacio Agulleiro, pág. 30

La relación entre el voltaje y la corriente es determinada por el instrumento y desplegada en forma digital. El método está basado en la suposición de que la impedancia del neutro del sistema multi-aterrizado, excluyendo el electrodo bajo medida, es muy pequeña y puede ser asumida igual a cero. La ecuación es la siguiente (23):

$$E/I = R_X + \frac{1}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}} \quad (23)$$

Donde usualmente R_X es igual (24):

$$R_X \gg \frac{1}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}} \quad (24)$$

Con esta suposición, la lectura indicada representa la resistencia de puesta a tierra del sistema o electrodo que se está midiendo.

El método posee las siguientes limitaciones:

- La aplicación es limitada a electrodos conectados a sistema multi-aterrizados de baja impedancia.
- Conexiones corroídas o partidas del neutro del sistema (o cable de guarda) pueden influenciar las lecturas.
- No es aplicable a sistemas de puesta a tierra aterrizados en múltiples puntos (torres de transmisión o mallas de subestaciones).
- Ruido de alta frecuencia en el sistema podría influenciar las lecturas.
- Altas resistencias en las conexiones con el electrodo de puesta a tierra.
- El cable de conexión con el electrodo abierto.

Es importante tener muy presente que si se está midiendo en postes donde no es accesible el conductor de puesta a tierra o donde se puede estar midiendo dos electrodos en paralelo, se debe usar un transformador de corriente de gran tamaño disponibles por algunos fabricantes figura 31.

Fig. 31. Transformador de corriente para abrazar todo el poste



Fuente: Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas, Ignacio Agulleiro, pág. 45

Al momento de realizar la medición se debe prestar atención, entre otras cosas, a la colocación de los electrodos de prueba de modo que no se solapen las áreas de influencia de los mismos. De producirse un solapamiento de dichas áreas la lectura de resistencia dada por el equipo de medición no será la correcta, por lo que se debe seguir la recomendación del fabricante y los métodos estándares para la coacción de los electrodos.

La profundidad a la que se entierren los electrodos de prueba no afecta el resultado de la medición. De lo que hay que cerciorarse es de que dichos electrodos hagan buen contacto con tierra, ya sea compactando la tierra alrededor de los mismos o incluso humedeciendo la zona.

La presencia de objetos metálicos enterrados así como la de tendidos eléctricos, según sea el caso, afecta la medición. Por ello, se recomienda realizar varias mediciones en diferentes direcciones para el primer caso y una nueva medición en dirección perpendicular al tendido eléctrico. Así se obtendrá una mejor medición.

Los métodos modernos de medición descritos en este trabajo son en su mayoría variantes de métodos tradicionales. Sin embargo, la introducción del uso de la pinza amperimétrica en conjunto con el método de caída de potencial o la pinza inductora de voltaje en combinación con la amperimétrica, trae una importante ventaja (se deberá prestar atención al punto donde se conectan dichas pinzas, para tener la seguridad de que se está midiendo el electrodo deseado). Al utilizar uno de estos métodos no es necesario realizar la desconexión del electrodo bajo estudio de la barra de principal de tierra del sistema con lo que se ahorra tiempo, se disminuyen los riesgos (una descarga atmosférica podría ocurrir en ese preciso momento y afectar al personal) y se obtiene un valor de resistencia de puesta a tierra del electrodo más real, ya que en condiciones normales éste está conectado al sistema y no aislado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El alcance de este trabajo consistió en conocer los diversos métodos que existen en la actualidad, siendo estas aprobadas por las diferentes normativas eléctricas para un diseño de un Sistema de Puesta a Tierra, lo que se espera que se comprenda es que un sistema de puesta a tierra sirve para proteger los aparatos eléctricos y electrónicos, pero el objetivo principal de este sistema es salvaguardar la vida de los seres vivos que se encuentren cercanos a subestaciones eléctricas, ya que la corriente eléctrica puede tener efectos parciales o totales, e incluso la muerte.

Un sistema de puesta a tierra consta de varios elementos como son: electrodos, conductor, conectores, registros, compuestos químicos, etc.

Para poder instalar un sistema de puesta a tierra, es imprescindible conocer el valor de resistividad que tiene el terreno. Es importante conocer el valor de la resistividad del terreno para que el sistema de puesta a tierra sea eficiente. El valor de la resistividad de un terreno puede variar de acuerdo a ciertos factores como fueron mencionados en este trabajo.

En la instalación de un sistema de puesta a tierra un factor importante es la resistencia que este ofrece ésta al paso de la corriente, dicha resistencia varía según algunos elementos.

En este trabajo se describió lo que es un electrodo de puesta a tierra, las diferentes configuraciones que se pueden realizar con ellos y como afectan estos a la resistencia del sistema de puesta a tierra.

Las condiciones ambientales pueden deteriorar el sistema de puesta a tierra con el tiempo, por lo que se recomienda su monitoreo de vez en cuando para verificar su estado y cerciorarse de que se tiene el valor de resistencia de puesta a tierra deseado. Asimismo, las condiciones ambientales modifican el valor de resistencia de puesta a tierra dependiendo de la estación en que ésta se mida.

Por ello, se recomienda que las mediciones regulares realizadas coincidan con diferentes estaciones del año y así asegurarse que se toman medidas en las condiciones más desfavorables.

Finalmente con la elaboración de este trabajo se espera crear conciencia en el lector, para que se den cuenta de los efectos que puede tener la corriente eléctrica en los seres humanos y en los equipos. Y de esta forma comprendan la importancia de un sistema de protección como lo es un sistema de puesta a tierra.

BIBLIOGRAFÍA

- Documento Curso de puestas a tierras TECSUP.
- Manual técnico elaborado para Procobre-Chile, Primera edición 1999.
- EEP Normas de montajes complementarios medida de la resistencia de puesta a tierra, Última edición agosto-2005
- IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- Subestaciones de alta y extra alta tensión, Mejía y Villegas, Segunda Edición.
- Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE, Colombia.
- Manual para el diseño y construcción de mallas conectadas a tierra para subestaciones y equipos, Impreso 2004.
- Understanding Ground Resistance Testing AEMC.
- Instituto politécnico nacional sistemas de puesta a tierra para edificios inteligentes, edición 3.
- Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas, Ignacio Agulleiro.
- ASTM D 3633-98 “Estandar Test Method For Electrical Resistivity Of Membrane- Pavement Systems”.
- ASTM G57-95a “Estandar Test Method for Field measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four- Electrode Method”. –