

1. OBJETO

Servir como documento de referencia para la medición, análisis y modelamiento de la resistividad del suelo en el área donde será ubicada la puesta a tierra.

Conocer los aspectos básicos de los diferentes accesorios que componen el equipo de medida.

Orientar el cumplimiento de los requisitos técnicos estipulados por el Reglamento técnico de Instalaciones Eléctricas, RETIE.

2. ALCANCE

Establece los criterios básicos para la medición, análisis y modelamiento de la resistividad del terreno para el diseño de puestas a tierra que serán instaladas en el sistema de distribución de energía de las Empresas Públicas de Medellín.

Esta norma cubre la evaluación de la resistividad del suelo para el diseño de la puesta a tierra de los dispositivos de maniobra y protección de las redes de distribución de energía en media y baja tensión, así como de las mallas de puestas a tierra para subestaciones industriales, comerciales y residenciales alimentadas de la red de las epm

3. DEFINICIONES

Las definiciones están establecidas de acuerdo a las normas IEEE Std 81-1983 y 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: Electrodos, conexiones y cables enterrados. También se le conoce como toma de tierra o conexión a tierra.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 1 de 20

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, carcasas, 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.

Conductor del Electrodo de Puesta Tierra (Grounding Electrode Conductor): Conductor que es intencionalmente conectado a una puesta a tierra, sólidamente para distribuir la tierra a diferentes sitios de una instalación.

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 (Ωm) o (Ωcm), 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.

Resistividad Aparente: Es la resistividad obtenida con una medida directa en el suelo natural, bajo el esquema geométrico especificado por el método de cuatro (4) electrodos, aplicado con circuitos independientes de corriente y potencial, sólo es representativo para un punto de la característica del suelo estratificado.

Resistencia Mutua de Electrodo: Fenómeno resistivo que aparece entre electrodos de puesta a tierra o puntos próximos en el suelo, mediante el cual, la corriente que se dispersa a través de uno de ellos, modifica el potencial del otro. Su unidad es el (Ohm).

Potencial Eléctrico: Diferencia de potencial entre el punto y alguna superficie equipotencial, usualmente la superficie del suelo, a la cual arbitrariamente se le asigna potencial cero (tierra remota).

Tierra Remota: Es una zona lo suficientemente alejada con respecto a la puesta tierra considerada, en la cual se puede asumir que su potencial es cero y que no cambia aun habiendo inyección de corriente en la puesta a tierra bajo estudio.

Acero inoxidable martensítico: Aceros al cromo (11.5% a 18%) con alto contenido de carbón (0.15% a 1.2%). Presentan elevada dureza y resistencia mecánica, se endurecen por tratamiento térmico y son magnéticos.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 2 de 20

Acero inoxidable Austenístico: Aceros al cromo-níquel (16% a 30% Cr y 6% a 22% Ni) con bajo contenido de carbón (0.20% máximo). Presentan elevada resistencia a la corrosión, ductilidad y gran facilidad de limpieza; se endurecen por trabajo en frío y no son magnéticos.

4. ASPECTOS TÉCNICOS

4.1 Generalidades

El suelo es de naturaleza heterogénea; varía por su composición y según las condiciones del medio. Aunque se pueden clasificar de diversas formas los suelos, por ejemplo en arcilloso, arenoso y rocoso, no se puede atribuir una resistividad específica a un tipo de suelo, y si se realizan mediciones se pueden encontrar diversos valores de resistividad.

Se puede definir la resistividad del suelo ρ como la resistencia eléctrica entre las caras opuestas de un cubo de dimensiones unitarias (aristas = 1 m) llenado con este suelo. Sus unidades serán Ωm .

Varios factores influyen la resistividad del suelo. Entre ellos podemos destacar:

- Tipo de suelo.
- Mezcla de diversos tipos de suelos.
- Suelos con capas estratificadas a profundidades y materiales diferentes.
- Contenido de humedad.
- Temperatura.
- Compactación y presión.
- Composición y concentración de sales disueltas.

La combinación de los anteriores factores da como resultado suelos con características diferentes y consecuentemente, con valores de resistividad distinta.

La conductividad del suelo es esencialmente electrolítica. Por esta razón la resistividad de la mayoría de los suelos aumenta abruptamente cuando el contenido de humedad es menor al 15%, como se observa en la figura 2, curva 2. El contenido de humedad, adicionalmente, depende del tamaño del grano y compactación. Por otra parte, la resistividad varía con la frecuencia (figura 1), aspecto que adquiere gran relevancia en presencia de fenómenos eléctricos muy rápidos, como los rayos.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 3 de 20

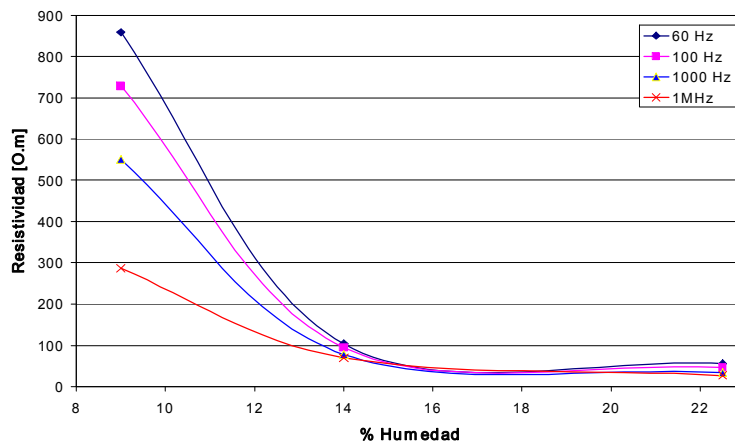


Figura 1. Variación de la resistividad del suelo con respecto a la humedad a diferentes frecuencias.

El efecto de la temperatura en la resistividad del suelo es despreciable para temperaturas por encima del punto de enfriamiento. En 0 grados el agua en el suelo comienza a congelarse y la resistividad se incrementa rápidamente, como puede apreciarse en la figura 2 (curva 3).

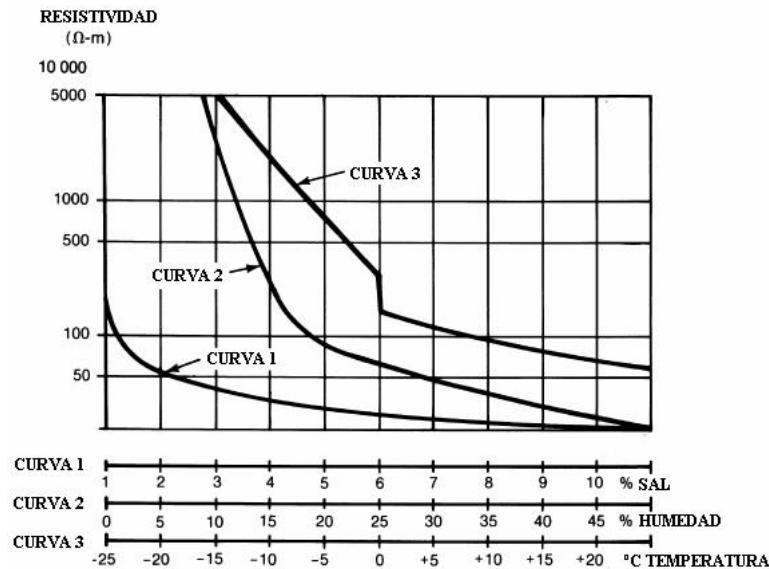


Figura 2 Ilustración de variaciones de resistividad por diversos factores
Fuente: adaptada de (IEEE, 2000).

La composición y cantidad de sales solubles, ácidos o alcalinos presentes en el suelo pueden afectar considerablemente la resistividad. La figura 2 (curva 1) muestra el efecto típico del contenido de sales sobre la resistividad.

5. METODOLOGÍA

PRIMERA EDICIÓN: MAYO-1984	ELABORÓ: ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN	AUTORIZÓ: SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN
ÚLTIMA PUBLICACIÓN: MAYO-2008	REVISÓ: ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN	Página 4 de 20

5.1. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Estimaciones basadas en la clasificación del suelo conducen sólo a valores gruesamente aproximados de la resistividad. Por tanto, es necesario tomar mediciones directamente en el sitio donde quedará ubicada la 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 horizontales superpuestas, cada una teniendo diferente resistividad. A menudo se presentan también cambios laterales de resistividad pero más graduales a menos que se configuren fallas geológicas. 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 esta norma, se asume como adecuado el método de Wenner o método de los cuatro puntos. En caso de ser muy difícil su aplicación, podrá apelarse a otro método referenciado por la IEEE Std 81-1983.

5.1.1. Método de Wenner

El método de los cuatro puntos de Wenner es el método más preciso y popular. Son razones para esto 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 "b" y espaciados (en línea recta) una distancia "a" como se ilustra en la figura 4.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 5 de 20

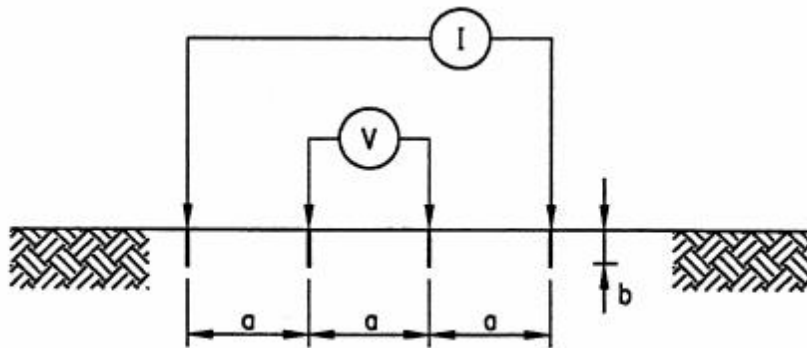


Figura 4. Método de Medición

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:

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

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

$$\rho = 2\pi Ra$$

Para determinar el cambio de la resistividad del suelo con la profundidad, el espaciamiento entre electrodos se varía desde unos pocos metros hasta un espaciamiento igual o mayor que la máxima dimensión esperada del sistema de puesta a tierra (por ejemplo, la mayor distancia posible entre 2 puntos de una malla, o la profundidad de las varillas). El espaciamiento “a” del electrodo se interpreta como la profundidad aproximada 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 (perfiles) en diferentes direcciones.

Diferentes lecturas tomadas con varios espaciamientos alineados dan un grupo de resistividades (perfil), que cuando son graficadas contra el espaciamiento, indican si hay capas diferentes de suelo y dan una idea de su respectiva profundidad y resistividad. La figura 5 ilustra este concepto.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 6 de 20

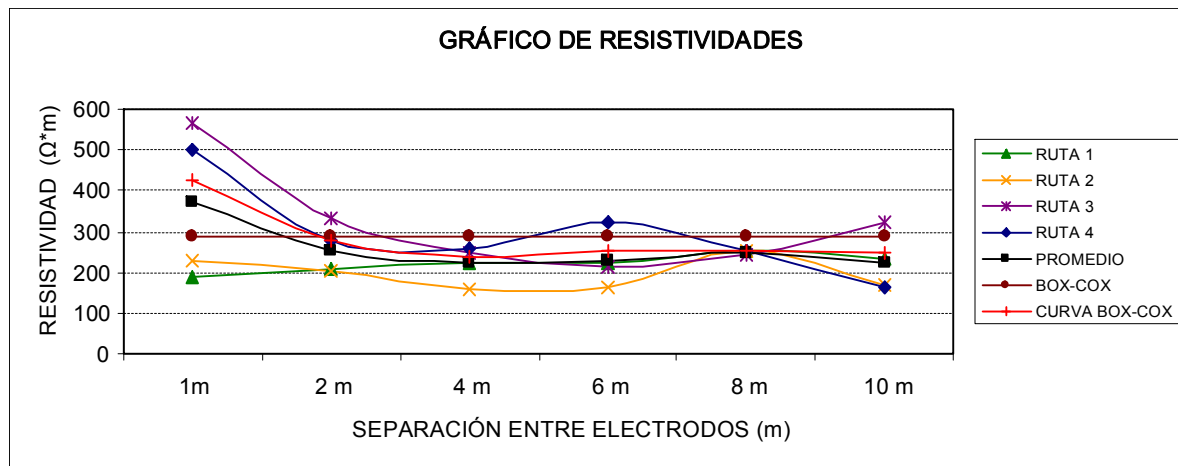


Figura 5. Curva de resistividad típica

5.1.2. Método de Schlumberger-Palmer

En este arreglo, al igual que en el de Wenner, los electrodos de emisión (corriente) y medición (tensión) están situados en línea recta, la variante de este arreglo radica en que la separación entre electrodos es, aunque simétrica, desigual para la correspondiente entre los electrodos de tensión y entre estos y los de corriente.

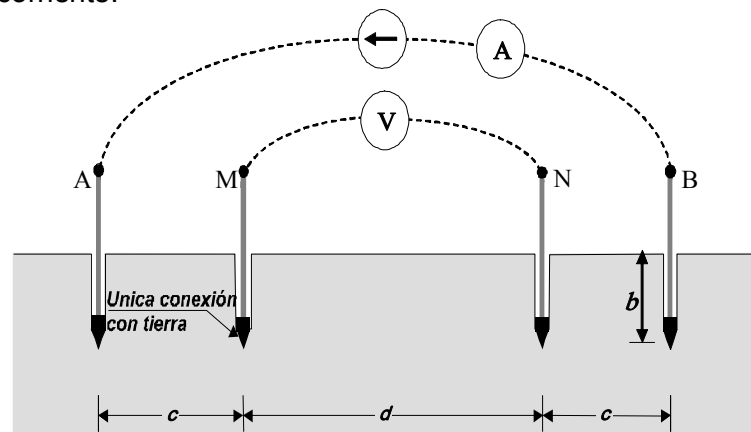


Figura 6. Método de Schlumberger-Palmer

El procedimiento para obtener el modelo del terreno, consiste en separar progresivamente los electrodos, alrededor de un punto central permanente, denominado punto de máxima exploración. La fórmula con la cual se calcula la resistividad aparente del terreno es:

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

Donde:

c: es la separación entre el electrodo de corriente y su correspondiente de tensión.

d: es la separación entre los electrodos de tensión.

5.1.3. Método de medición de resistencia de una varilla (variación con la profundidad)

También conocido en la norma ANSI/IEEE Std 81-1983 como el Método de la Variación de Profundidad (variation of depth method), consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo tipo varilla y, basados en la ecuación de resistencia a tierra de un electrodo vertical en un suelo homogéneo y los datos geométricos de la varilla, derivar la resistividad del suelo. Se asume como en los métodos anteriores, que el terreno es homogéneo.

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

Donde:

ρ : Resistividad del terreno

L: longitud del electrodo

a: radio del electrodo

R: valor de resistencia leído por el equipo

El procedimiento comúnmente aplicado es el de disponer una varilla metálica con marcaciones cada 20 o 30 cm, y cuya longitud debe ser la suficiente como para obtener la mayor información posible de la variaciones de la resistencia leída a medida que penetra la varilla en la tierra (lo que originó el nombre de Método de la Variación de Profundidad), es decir por cada marca se lee un valor de resistencia y con la fórmula anterior se calcula la resistividad.

Este método solo se debe aplicar cuando no se disponga del espacio suficiente para utilizar los métodos de Wenner o de Schlumberger-Palmer, pues la prospección es mucho menor, o en el caso de solo poder disponer de un telurómetro de tres electrodos.

5.1.4. Método de medición de resistencia de electrodos ya enterrados

Si se está en un lugar donde ya se encuentra instalado un sistema de puesta a tierra y se desea modificar el existente o construir uno adicional, es posible, a partir de la configuración del electrodo enterrado, hallar el valor de la resistencia del sistema y calcular el respectivo valor de resistividad con la fórmula de resistencia que le corresponda. Solo es aplicable en configuraciones sencillas para las cuales exista una fórmula al menos aproximada de la resistencia de puesta a tierra (ver por ejemplo Dwight, 1936: 1325). El resultado que se obtiene por este método no es suficientemente confiable y sólo debe usarse como recurso “de emergencia”.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 8 de 20

5.2. Análisis de las medidas de resistividad del suelo

La interpretación de las medidas de resistividad aparente realizadas en el terreno, es quizás la parte más difícil del programa de medición. El objetivo esencial es decidir sobre su aceptación o no, y poder derivar un modelo que sea una buena aproximación del suelo bajo estudio. Debe tenerse presente que el modelo del suelo es sólo una aproximación de las condiciones reales del terreno. La interpretación de las mediciones de resistividad puede hacerse ya sea manualmente o mediante técnicas de análisis por computador.

El procedimiento debe ser realizado de la siguiente manera:

1. Cada uno de las direcciones o perfiles medidos en el área (ver numeral 6), deberá ser tabulado en función del espaciamiento “a”. Para cada espaciamiento “a”, se debe calcular el promedio aritmético de los valores de resistividad aparente ρ_a obtenidos para cada perfil (promedio de la fila, tabla 4 del numeral 6.2).
2. Proceder al cálculo de la desviación en porcentaje de cada medida ρ_a (obtenida a un espaciamiento “a” determinado) en relación a su valor promedio. Se deben descartar los valores de resistividad que tengan una desviación mayor al 50% en relación con su promedio. En este último caso, el promedio correspondiente para cada espaciamiento deberá recalcularse nuevamente.
3. Con los valores de resistividad promedio para cada espaciamiento, se tienen entonces los valores definitivos y representativos para trazar una curva de resistividad en función de la profundidad (espaciamiento “a” en el método de Wenner). La curva resultante indicará visualmente si existen distintas capas de suelos y provee una medida de resistividad eléctrica del área bajo estudio.

5.3. MODELAMIENTO DEL SUELO

Los modelos de resistividad del suelo mayormente usados son los de suelo homogéneo y de dos capas. El modelo de dos capas es normalmente una buena aproximación si el terreno posee varias capas de resistividad. Modelos de suelos multicapas suelen emplearse para condiciones de suelo más complejas.

Un modelo de suelo uniforme u homogéneo puede ser usado sólo cuando hay una moderada variación en la resistividad aparente. Si hay una gran variación en la resistividad aparente medida, el modelo homogéneo es poco probable que produzca resultados precisos.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 9 de 20

Una representación más aproximada de las reales condiciones del suelo puede obtenerse mediante el uso de un modelo de suelo de dos capas. El modelo de dos capas consiste de una capa superior de profundidad finita y con diferente resistividad que la capa inferior de profundidad infinita. Existen varias técnicas para determinar un modelo equivalente de dos capas a partir de los datos de resistividad aparente obtenidos de las mediciones de campo. En algunos casos, un modelo de dos capas puede determinarse por inspección visual de la gráfica de resistividad aparente contra la profundidad obtenida mediante el método de Wenner.

5.3.1. Modelo de suelo homogéneo

Para efectos de esta norma, se considerará un suelo como homogéneo cuando los valores definitivos y representativos de resistividad aparente obtenidos para cada espaciamiento “a”, no se apartan en más de un 30% del valor máximo de los mismos. Para efectos de modelación del suelo, se asume entonces el valor promedio como la resistividad del terreno. Alternativamente puede aplicarse el método estadístico de **Box-Cox** (ver libro “Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra. Respuestas ante Fallas Eléctricas y Rayos”), que busca un valor con probabilidad de 70% de ser el real, valor que se utilizará luego en los cálculos necesarios para el diseño de la puesta a tierra.

El método de Box Cox se aplica como se describe a seguir, partiendo de los datos de resistividad obtenidos de todas las lecturas:

- En una columna se tabulan los datos de resistividad aparente medida ρ_i .
- En otra columna se colocan los logaritmos naturales de cada una de las medidas $X_i = \ln \rho_i$.
- Se halla la resistividad promedio x como:

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

- En otra columna se coloca el resultado de $(X_i - x)^2$
- Se calcula la desviación estándar S como:

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

- De la distribución normal se toma Z para 70%, que da 0.524411

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 10 de 20

- g. Se halla la resistividad (con probabilidad del 70% de no ser superada) por la siguiente fórmula:

$$\rho = \text{Anti Ln}(S*Z + x)$$

Para mayor claridad se presenta el siguiente ejemplo:

Las siguientes tablas muestran los valores de resistividad aparente calculada para dos diferentes rutas. En este caso se realizaron medidas a 1, 3, 5 y 7 m de separación entre electrodos.

Separación (m)	RUTA 1	RUTA 2
1	32,54	36,13
3	64,84	57,68
5	75,71	69,42
7	93,24	81,36

Aplicando la transformación de Box-Cox para todas las medidas, se tiene:

	ρ_i	$X_i = \text{Ln}\rho_i$	$(X_i - x)^2$
	32,54	3,48	0,38
	64,84	4,17	0,01
	75,71	4,33	0,05
	93,24	4,54	0,19
	36,13	3,59	0,26
	57,68	4,05	0,00
	69,42	4,24	0,02
	81,36	4,40	0,09
SUMA	510,92	32,80	1,00
PROMEDIO	63,87	$x = 4,10$	0,13
DESV STAND			0,35
RESISTIVIDAD CON EL 70%		72,24	

$$\rho = \text{Anti Ln}(S*Z + x) = \text{Anti Ln}(0.35 * 0.524411 + 4.10)$$

$$\rho = \text{Anti Ln}(S*Z + x) = \text{Anti Ln}(4.28) = 72.24 \Omega\text{-m.}$$

Luego se puede modelar el suelo como homogéneo con una resistividad de aproximadamente de 73 Ωm . Este método solo se debe aplicar cuando no sea posible modelar el terreno a capas (dos capas).

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 11 de 20

5.3.2. Modelo de suelo de dos capas

Para efectos de caracterizar el suelo en un modelo de dos capas, se recomienda emplear una de las siguientes alternativas:

- Emplear el método gráfico aproximado de Sunde descrito en la IEEE Std 80-2000 página 58 sección 13.4.2.2.
- Implementar el método matemático descrito en el Anexo B de la IEEE Std 81-1983.
- Utilizar un software de ingeniería, adecuado para el modelamiento del suelo.

Es de resaltar que **epm**, independientemente de los métodos utilizados, verificará los resultados obtenidos del modelo de suelo de dos capas presentado por el proyectista, mediante un software de diseño de mallas de puesta a tierra que posee para tal fin. En caso de encontrarse serias discrepancias en los datos del modelo presentado, el diseño del sistema de puesta a tierra deberá modificarse de acuerdo a los resultados obtenidos por **epm**.

6. PROCEDIMIENTOS DE APLICACIÓN

6.1. Consideraciones de orden práctico

Para las mediciones de resistividad del suelo aplicando el método de Wenner, deberán tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Realizar una inspección visual del área para identificar obstáculos inmediatos o previsibles, tanto para la medición como para la construcción o el mantenimiento de la puesta a tierra.
- Los electrodos a utilizar con el método de Wenner deben estar bien alineados e igualmente espaciados.
- Los electrodos deben ser enterrados (en lo posible) a una misma profundidad. La profundidad no debe exceder el 5% de la separación mínima de los electrodos (5 a 10 cm). Es aconsejable una mayor profundidad para terrenos arenosos, de tal forma que se asegure un contacto íntimo entre el electrodo y el terreno (si esto impide cumplir el límite de 5%, para el cálculo se debe aplicar la ecuación no simplificada).
- Los electrodos y placas deben estar bien limpios y exentos de óxido para posibilitar un buen contacto con el suelo.
- Durante la medida, deben registrarse datos que ayuden a una caracterización estacional, como fecha de la medición, fecha de la última lluvia acontecida, periodo seco o lluvioso.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 12 de 20

- Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.
- Debe utilizarse calzado y guantes aislados para realizar las medidas.

6.2. Espaciamiento y dirección de las medidas

Para cada dirección o perfil, deben usarse los espaciamientos recomendados en las tablas 1, 2 y 3, usadas para consignar los datos entregados por equipos que entregan los valores en unidades de resistencia; en la columna de al lado se pasan a resistividad. Si se considerase necesario levantar más perfiles, pueden adicionarse tablas similares y ampliar la tabla 4. La tabla 4 se utiliza para escribir los datos de resistividad calculada o entregada directamente por el equipo en valores de Ωm . Las tablas mencionadas se muestran a continuación:

Espaciamiento "a" (m)	Lectura Perfil 1 $R_1 (\Omega)$	Resistividad calculada $\rho (\Omega m)$ $\rho_1 = 2\pi a R_1$
1		
2		
4		
6		
8		
10		
16		
32		

Tabla 1. Perfil 1 y espaciamientos recomendados para las medidas.

Espaciamiento "a" (m)	Lectura Perfil 2 R_2 (Ω)	Resistividad calculada ρ (Ωm) $\rho_2 = 2\pi a R_2$
1		
2		
4		
6		
8		
10		
16		
32		

Tabla 2. Perfil 2 y espaciamentos recomendados para las medidas.

Espaciamiento "a" (m)	Lectura Perfil 3 R_3 (Ω)	Resistividad calculada ρ (Ωm) $\rho_3 = 2\pi a R_3$
1		
2		
4		
6		
8		
10		
16		
32		

Tabla 3. Perfil 3 y espaciamentos recomendados para las medidas.

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1 ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	Perfil 2 ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	Perfil 3 ρ_3 ($\Omega \cdot m$)	Resistividad promedio ρ ($\Omega \cdot m$) $\rho = (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3) / 3$
1				
2				
4				
6				
8				
10				
16				
32				

Tabla 4. Espaciamientos y perfiles de resistividad.

Se debe procurar realizar mediciones en el sitio, empleando separaciones que aumenten progresivamente hasta ser comparables a las mayores longitudes de electrodo previsible en el diseño de la malla o sistema de puesta a tierra.

Distancias mayores a 32 metros son adoptadas en el caso de diseño de instalaciones de gran tamaño. Es importante que para la determinación precisa de la resistividad del terreno, se utilicen los mismos espaciamientos "a" en cada perfil o dirección; el número de perfiles a realizar debe ser al menos tres, para puestas a tierras medianas.

Para el caso de una configuración de puesta a tierra pequeña, puesta a tierra de equipos de distribución tales como: reguladores de tensión, reconectores, transformadores, descargadores de sobretensión, interruptores, etc; debe medirse como mínimo en dos direcciones perpendiculares, hacia la parte central del terreno.

En el caso de áreas mayores, deben efectuarse medidas en varios puntos cubriendo toda el área donde quedará la malla o sistema de puesta a tierra. Como mínimo deberá medirse en dos direcciones perpendiculares hacia la parte central del área del terreno y en dos direcciones o perfiles hacia la periferia, paralelos a los lados del área.

En caso de que el área sea cruzada por líneas de alta tensión, deben realizarse las mediciones en forma transversal a la trayectoria de las líneas con el fin de disminuir la posibilidad de interferencia sobre la medición.

Si las condiciones del suelo, el conocimiento y la experiencia de otras medidas y las prácticas de mantenimiento insinúan que el suelo es corrosivo, además de las medidas del campo es conveniente recolectar muestras del suelo para realizar ensayos de corrosión y para determinar qué tipo de

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 15 de 20

mejoramiento de suelo y/o material del electrodo se debe utilizar. Las pruebas se deben realizar de acuerdo con lo establecido en las normas ASTM G 71-81 “Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes” y ASTM G 162 -99 “Standard Practice for Conducting and Evaluating Laboratory Corrosions Tests in Soils”.

7. METODOLOGÍA PARA CASOS ESPECIALES

7.1. Medida de resistividad sobre pavimentos o concreto

Algunas veces las mediciones de resistividad del suelo deben realizarse en suelos cubiertos por pavimentos, concreto o cemento y en los cuales se hace imposible hincar los electrodos tipo varilla (se debe tener cuidado con la presencia de elementos metálicos enterrados).

En tales casos pueden usarse placas de cobre para reemplazar los electrodos auxiliares y agua para remojar el punto donde serán ubicadas, como lo ilustra en forma general la figura 6.

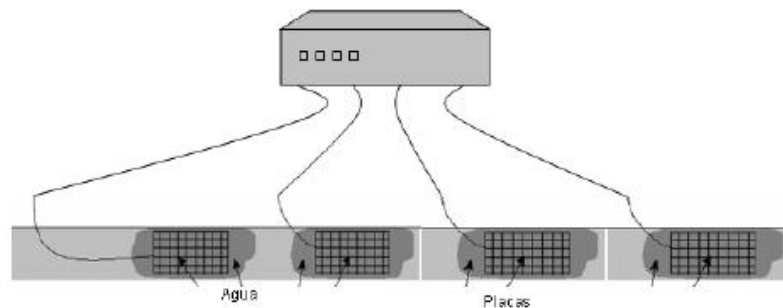


Figura 6. Medida de resistividad del terreno mediante placas de cobre.

Los procedimientos y requerimientos para la implementación de este método de medición deberán estar acordes con lo indicado en la ASTM D 3633-98 “Standard Test Method For Electrical Resistivity Of Membrane- Pavement Systems”.

Las placas de cobre deberán ser dispuestas a la misma distancia en que se colocarían los electrodos auxiliares de acuerdo al método de Wenner 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; es necesario esperar un tiempo prudente para que el agua penetre y la lectura de la resistencia se haya estabilizado. El tiempo requerido para el proceso de penetración de la humedad variará, dependiendo del espesor y de la permeabilidad de la capa del pavimento (30 minutos son normalmente suficientes).

Se debe tener cuidado de que las áreas humedecidas no se interconecten. Las placas realizarán la misma función de los electrodos auxiliares.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 16 de 20

7.2. Medición de resistividad mediante muestras del suelo

Este método deberá utilizarse sólo en casos donde las condiciones del sitio, ya sea por espacio o difícil acceso, no permitan aplicar el método de Wenner para caracterizar con más precisión la resistividad del terreno.

El método consiste en recolectar una muestra representativa del área de interés o, en su defecto, de un terreno aledaño con características similares al sitio cuya resistividad se desea conocer. Esta porción de suelo debe ser recogida a una cierta profundidad en donde el terreno quede más inmune a las variaciones de las condiciones ambientales procurando no alterar las condiciones de compactación y, sobre todo, de humedad de la muestra. El proceso se basa en la medición de la resistencia de la muestra del suelo que llena un recipiente de dimensiones conocidas. La figura 7 ilustra la forma elemental del proceso.

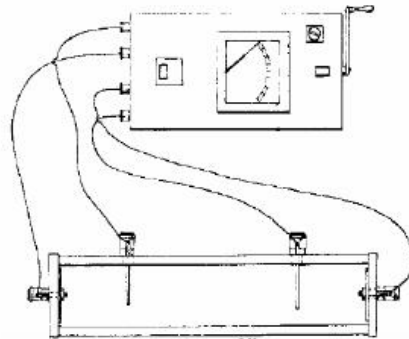


Figura 7. Medición de resistividad mediante muestras del suelo.

En algunos casos es difícil obtener una aproximación útil de la resistividad del suelo mediante muestras debido a la dificultad de obtener muestras representativas y homogéneas y en duplicar la compactación original y contenido de humedad.

Por tanto, para estos casos especiales, sólo serán aceptados valores de resistividad para muestras obtenidas de acuerdo al procedimiento, requerimientos e instrumentación establecidos en la norma ASTM G57-95a “Standard Test Method for Field measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four- Electrode Method”.

PRIMERA EDICIÓN: MAYO-1984	ELABORÓ: ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN	AUTORIZÓ: SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN
ÚLTIMA PUBLICACIÓN: MAYO-2008	REVISÓ: ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN	Página 17 de 20

8. DISPOSITIVOS, EQUIPOS Y MATERIALES

Los diferentes equipos y accesorios requeridos para medir la resistividad del suelo consisten generalmente de una fuente de corriente, un voltímetro adecuado, amperímetro, o un galvanómetro, cuatro (4) electrodos tipo varilla y cable suficiente para realizar las conexiones.

8.1. Fuente de Corriente: Es recomendada una fuente de corriente generalmente en AC que inyecte una onda de corriente cuadrada, con una frecuencia que no sea múltiplo de 60 Hz (por ejemplo 97 Hz, 111 Hz, 128 Hz, 1470 Hz, etc), dado que la corriente directa DC puede causar error por la polarización que se presenta en casi todos los electrodos metálicos. La corriente puede ser suministrada por un generador AC o una fuente en DC, equipada con un oscilador electrónico.

8.2. Voltímetro: El circuito del voltímetro no debe tener una caída apreciable de la corriente para evitar efectos de polarización. La impedancia de entrada del medidor debe tener al menos una impedancia de 10 MΩ. Este puede ser del tipo galvanómetro o electrónico.

8.3. Electrodo: Fabricados de acero estructural de bajo carbón o acero inoxidable tipo martensítico con un diámetro desde 0.475 a 0.635 cm y longitudes desde 30 hasta 60 cm. Las varillas deben tener tratamiento térmico para que tengan suficiente rigidez, para poder ser hincadas en suelos secos o gravilla. Los electrodos deben tener un mango, palanca u otro accesorio para ser hincados y un conector terminal para conectar el cable o alambre. El electrodo varilla debe ser liso. Los electrodos tipo roscado no son recomendados ya que dejan aire atrapado entre la varilla y el suelo, creando una alta resistencia de contacto.

8.4. Cableado: El calibre del cable va desde 18 a 22 AWG de cobre, conductor de cableado B normal según ASTM B8. Cuando el equipo viene para distancias normalizadas y fijas en su medición el cable puede ser multiconductor y apantallado y con los terminales de conexión. Los terminales de conexión para el cable deberán ser de buena calidad y asegurar una baja resistencia de contacto de acuerdo con lo especificado en la UL-486 B. El aislamiento del cable debe ser para uso pesado, no se debe desgastar contra el roce o abrasión que sufre el cable contra el piso. El cable debe estar empacado en carretes para su fácil transporte y manipulación.

8.5. Herramienta de Hincado: En suelos normales es recomendado un martillo de mano de 2 a 4 kg, para hincar el electrodo tipo varilla en el suelo a profundidades de 2 a 3 m.

8.6. Calibración de la medida: Para una adecuada medición de resistencia de puesta a tierra, es de trascendental importancia que el equipo sea calibrado mínimo cada año o cada 100 mediciones (de las dos, la que ocurra primero) por un laboratorio acreditado, y además tener presente las recomendaciones del fabricante del equipo. El equipo debe ser bien seleccionado cuando se adquiere, para tener medidas de alta calidad; también los materiales auxiliares como los electrodos auxiliares, cables y conectores requieren verificar su aptitud en ensayos de laboratorio. El error del medidor no debe exceder el 5% sobre el rango del instrumento; si el error del medidor excede este límite, se debe enviar el equipo a ajuste para recobrar la calibración perdida.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

Página 18 de 20



9. NORMAS DE REFERENCIAS

IEEE Std 80-2000 “Guide for Safety In AC Substation Grounding.”

IEEE Std 81-1983 “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System”.

EPRI Distribution grounding Handbook.

ASTM G57-95a “Standard Test Method for Field measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four- Electrode Method”.

ASTM D 3633-98 “Standard Test Method For Electrical Resistivity Of Membrane- Pavement Systems”.

ASTM G 71-81 “Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes.”

ASTM G 162 -99 “Standard Practice for Conducting and Evaluating Laboratory Corrosions Tests in Soils”.

PRIMERA EDICIÓN:
MAYO-1984

ELABORÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

AUTORIZÓ:
SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN

ÚLTIMA PUBLICACIÓN:
MAYO-2008

REVISÓ:
ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN

10. FORMATO PARA REGISTRO DE MEDICIONES DE RESISTIVIDAD

DATOS DEL SITIO

Fecha: _____
 Subestación: _____ Circuito: _____ Poste: _____
 Municipio: _____ Dirección: _____ Barrio/Vereda: _____
 Proyecto: _____ Cliente: _____

DATOS COMPLEMENTARIOS

Responsable de la medida: _____
 Equipo de medida utilizado: _____
 Condiciones del terreno: Seco: _____ Húmedo: _____
 Observaciones del sitio: _____

REGISTROS DE LAS MEDIDAS

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1		Perfil 2		Perfil 3		Resistividad promedio
	R ₁ (Ω)	ρ ₁ (Ω*m)	R ₂ (Ω)	P ₂ (Ω*m)	R ₃ (Ω)	P ₃ (Ω*m)	ρ = (ρ ₁ +ρ ₂ +ρ ₃)/3
1							
2							
4							
6							
8							
10							
16							
32							

NOTAS:

- Para las mediciones de resistividad del suelo debe aplicarse el método de Wenner.
- Los electrodos y placas deben estar bien limpios y exentos de óxido para posibilitar un buen contacto con el suelo.
- Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.
- Debe utilizarse calzado y guantes aislados para realizar las medidas.
- De considerarse necesario levantar más perfiles, pueden adicionarse columnas similares y ampliar la anterior.
- Para diseño de puesta a tierras de equipos de distribución (Equipos de transformación, maniobra o protección) debe caracterizarse la resistividad como mínimo en dos direcciones perpendiculares, hacia la parte central del terreno.
- Para el diseño de mallas de puesta a tierra de instalaciones industriales, comerciales o residenciales, deben efectuarse medidas que cubran toda el área donde quedará la malla. Como mínimo deberá medirse en dos direcciones perpendiculares hacia la parte central del área del terreno y en dos direcciones o perfiles hacia la periferia, paralelos a los lados del área.
- Se deben descartar los valores de resistividad que tengan una desviación mayor al 50% en relación con su promedio. En este último caso, el promedio correspondiente para cada espaciamento deberá recalcularse nuevamente.
- Distancias mayores a 32 metros son adoptadas en el caso de diseño de instalaciones de área de de gran tamaño (> 1000 m²).

PRIMERA EDICIÓN: MAYO-1984	ELABORÓ: ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN	AUTORIZÓ: SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN
ÚLTIMA PUBLICACIÓN: MAYO-2008	REVISÓ: ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN	Página 20 de 20