



**EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN  
ESP**

Unidad Centro de Excelencia Técnica Normalización  
y Laboratorios

**RA6-014**

**Norma Técnica: Mediciones para el sistema de  
puesta a tierra**

**EPM-UCET-NYL-RA6-014**

**Septiembre 2019**

### Elaboración, Revisión y Aprobación

Actividad	Tema	Nombre
<b>Elaboró</b>	Norma Técnica: Mediciones para el sistema de puesta a tierra	Consultoría Colombiana S.A
	<b>Revisó</b>	José Daniel Acosta Moreno
	<b>Aprobó</b>	Mónica Rueda Aguilar

### Requeridores

Destinatario	Cargo	No. de Copias
Johan Sebastián Higuera Higuera	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería	1
Gabriel Jaime Romero Choperena	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería	1

### Revisiones

Revisión	Fecha dd/mm/aaaa	Descripción de la revisión
01	27/09/2019	Versión inicial

© Copyright: Empresas Públicas de Medellín ESP. No está permitida su reproducción por ningún medio impreso, fotostático, electrónico o similar, sin la previa autorización escrita del titular de los derechos reservados.

## CONTENIDO

1	OBJETO .....	6
2	ALCANCE.....	7
3	DOCUMENTOS DE REFERENCIA .....	8
4	MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA .....	9
4.1	MÉTODO PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	9
4.1.1	Método de Wenner .....	9
4.1.2	Método de Schlumberger-Palmer .....	11
4.1.3	Método de medición de una varilla .....	12
4.1.4	Casos especiales .....	12
4.2	METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.....	13
4.2.1	Método de caída de potencial.....	13
4.2.2	Método de la pendiente .....	16
4.2.3	Métodos especiales para medida de resistencia de puesta a tierra .....	18
5	CONSIDERACIONES PARA APLICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS.....	22
5.1	CONSIDERACIONES DE ORDEN PRÁCTICO.....	22
5.2	CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD.....	23
6	DISPOSITIVOS, EQUIPOS Y MATERIALES.....	24
6.1	TELURÓMETRO .....	24
6.1.1	Electrodos .....	24
6.1.2	Cableado .....	24
6.1.3	Herramienta de hincado .....	25
6.1.4	Calibración de la medida .....	25



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores de k en función de  $\mu$  para el método de la pendiente ..... 17

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Arreglo para la medición de resistividad por el método de Wenner .....	10
Figura 2 Método de Schlumberger-Palmer .....	11
Figura 3 Medida de resistividad del terreno mediante placas de cobre .....	13
Figura 4 Método de la caída de potencial para medir la resistencia de puesta a tierra.....	14
Figura 5 Solapamiento de los gradientes de potencial .....	15
Figura 6 Curva de resistencia con respecto a la distancia sin solapamiento de gradientes de potencial .....	15
Figura 7 Método de la pendiente .....	16
Figura 8 Medida de resistencia de puesta a tierra en suelos o pavimentos.....	18
Figura 9 Medición de la resistencia de puesta a tierra utilizando pinza .....	19
Figura 10 Circuito equivalente para un sistema puesto a tierra en más de un punto.....	19
Figura 11 Transformador de corriente para abrazar todo el poste.....	21



## 1 OBJETO

Establecer los métodos y procedimientos de referencia para la medición de la resistividad del terreno y de la resistencia de puesta a tierra para los sistemas de puesta a tierra de las redes de distribución del Grupo EPM.

## 2 ALCANCE

El documento presenta los procedimientos básicos para la medición de la resistividad del terreno y de la resistencia de puesta a tierra (RPT) en el sistema de distribución del Grupo EPM.

Esta norma cubre la evaluación de la resistencia de puesta a tierra de los equipos de transformación, maniobra y protección instalados en las redes de distribución de energía en media tensión (13,2, 34,5 y 44 kV) y baja tensión, así como de las mallas de puesta a tierra para subestaciones conectadas a la red distribución de energía del Grupo EPM.

### 3 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

- [1] IEEE, Std 81-2012 Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system, 2012.
- [2] IEEE, Std 80-2000 Guide for safety in AC substation grounding, 2000.
- [3] Ministerio de Minas y Energia, Resolucion No 90708, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Bogotá Colombia, 30 de agosto de 2013.
- [4] EPRI Distribution grounding Handbook.
- [5] ASTM G57-95A Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four electrode method.
- [6] ASTM D 3633-98 Standard test method for electrical resistivity of membrane pavement systems.
- [7] ASTM G 71-81 Guide for conducting and evaluating galvanic corrosion tests in electrolytes.
- [8] ASTM G 162-99 Standard practice for conducting and evaluating laboratory corrosion tests in soils.
- [9] IEEE Std 142 Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems.
- [10] IEEE Std 367 Recommended practice for determining the electric power station ground potential rise and induced voltage from a power fault.
- [11] IEEE Std 1100-2000 Recommended practice for powering and grounding electronic equipment, 2000.
- [12] IEEE Std C62.92.4 Guide for the application of neutral grounding in electrical utility systems. Part IV-Distribution.
- [13] IEEE Std C62.92.1 Guide for the application of neutral grounding in electrical utility systems. Part I: Introduction.
- [14] IEEE 1048 Guide for protective grounding of power lines.
- [15] IEEE 524A Guide to grounding during the installation of overhead transmission line conductors.
- [16] ASTM G162 Standard practice for conducting and evaluating laboratory corrosion tests in soils.

## 4 MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

En este capítulo se presentan los procedimientos aprobados para la medición de resistividad del suelo y la resistencia de puesta a tierra en el sistema de distribución del Grupo EPM.

El equipo de medición (telurómetro) debe contar con los siguientes elementos mínimos para realizar los procedimientos:

- Cuatro (4) carretes de cable (normalmente calibre 14 AWG), con longitud suficiente para abarcar el área máxima que podría ocupar el SPT a diseñar o estudiado.
- Cuatro (4) electrodos de material con la dureza suficiente para ser hincados en la tierra con mazo. Dichos electrodos deberán ser de una longitud aproximada de 30 a 60 cm y un diámetro de 16 mm.
- Cinta métrica no metálica de 50 m aproximadamente.

### 4.1 MÉTODO PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Se deben realizar mediciones de resistividad del terreno en cada uno de los puntos donde se vaya a instalar un sistema de puesta a tierra. No se permite hacer mediciones agrupando puntos por zonas ni definir valores de resistividad a partir de mapas o de la geología del terreno.

En el documento *GM-04 Guía metodológica: cálculo del sistema de puesta a tierra*, se presenta un mapa con resistividades del suelo en las zonas de influencia del Grupo EPM, esta información solo se debe emplear como referencia y en ninguna circunstancia reemplaza la respectiva medición.

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

Típicamente, los suelos poseen varias capas horizontales superpuestas, cada una de ellas con diferente resistividad. A menudo se presentan también cambios laterales de resistividad, pero más graduales a menos que se configuren fallas geológicas. Por lo tanto, las mediciones de resistividad deben ser realizadas de tal manera que permita determinar si se presenta alguna variación importante de la resistividad con respecto a la profundidad.

Existen múltiples métodos para la medición de la resistividad del terreno y para efectos de esta norma se recomienda el método de Wenner o método de los cuatro puntos. Sin embargo, se presentan métodos adicionales para los casos en que se dificulte la implementación del método de Wenner.

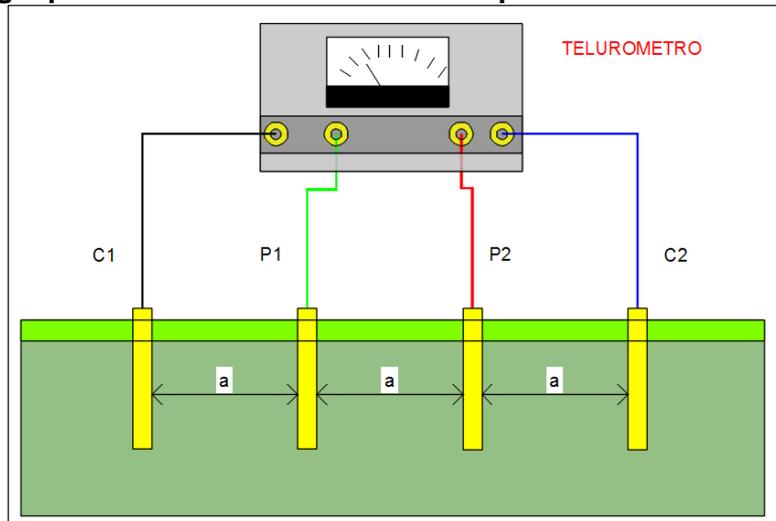
#### 4.1.1 Método de Wenner

El método de los cuatro puntos de Wenner es el método más preciso y más empleado para aplicaciones eléctricas ya que permite obtener la resistividad del suelo para capas profundas sin necesidad de enterrar los electrodos más de unos centímetros. Con este método no es necesario un equipo pesado para realizar las medidas y 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 electrodos tipo varilla de 30 cms, en cuatro puntos sobre el suelo, a una profundidad “b” y espaciados en línea recta una distancia “a”, cómo se ilustra en la Figura 1.

**Figura 1 Arreglo para la medición de resistividad por el método de Wenner**



Entre los dos electrodos externos se inyecta una corriente “I”, mientras que entre los dos electrodos internos el instrumento mide el potencial “V”. El instrumento mide la resistencia ( $R=V/I$ ) del volumen de suelo de lado “a” encerrado entre los electrodos internos y a partir de ésta, se obtiene la resistividad aparente del suelo  $\rho_a$ , a la profundidad “b”, mediante la siguiente ecuación:

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

Ecuación 1

Donde:

$\rho$ : resistividad aparente del terreno en ohmios metro.

R: resistencia eléctrica medida en ohmios.

a: distancia entre electrodos adyacentes en metros.

b: profundidad de enterramiento de los electrodos en metros.

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

$$\rho = 2\pi aR$$

Ecuación 2

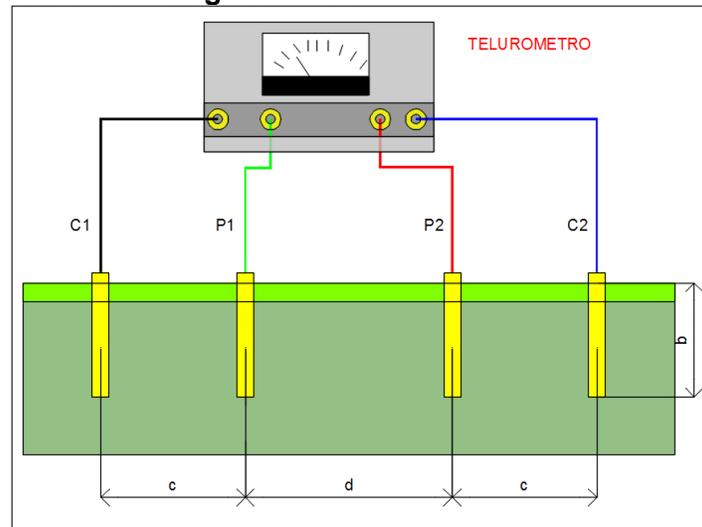
Para determinar el cambio de la resistividad del suelo con la profundidad, el espaciamiento entre electrodos se varía desde unos pocos metros hasta un espaciamiento igual o mayor que la máxima dimensión esperada del sistema de puesta a tierra, dentro de lo cual, el espaciamiento “a” del electrodo se interpreta como la profundidad aproximada a la cual se lee la resistividad del suelo. De acuerdo con lo anterior, 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.

El registro de las mediciones y la resistividad resultante se debe realizar en el documento “Formato para registro de mediciones de resistividad” que se encuentra al final del presente documento. Para mayor detalle en el procedimiento de medición, se puede consultar en la norma IEEE Std 81 [1].

#### 4.1.2 Método de Schlumberger-Palmer

El método de Schlumberger-Palmer es una variación del método de Wenner. En este caso la separación de los electrodos no es la misma (para una medida), aunque su disposición guarda simetría con respecto al centro de la medición, como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2 Método de Schlumberger-Palmer**



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

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

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

d: es la separación entre los electrodos de tensión.

#### 4.1.3 Método de medición de una varilla

También conocido en la norma ANSI/IEEE Std 81 [1] como el método de la variación de profundidad, 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, obtener la resistividad del suelo mediante la Ecuación 4. Se asume que el terreno es homogéneo.

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

Donde:

$\rho$ : resistividad del terreno

L: longitud del electrodo

a: radio del electrodo

R: valor de resistencia leído por el equipo

El procedimiento comúnmente aplicado consiste en disponer una varilla metálica con marcaciones cada 20 o 30 cm, con longitud suficiente como para obtener la mayor información posible de las variaciones de la resistencia leída a medida que penetra la varilla en la tierra (lo que originó el nombre de método de la variación de profundidad). Por cada marca se lee un valor de resistencia y con la fórmula dada por la Ecuación 4 se calcula la resistividad.

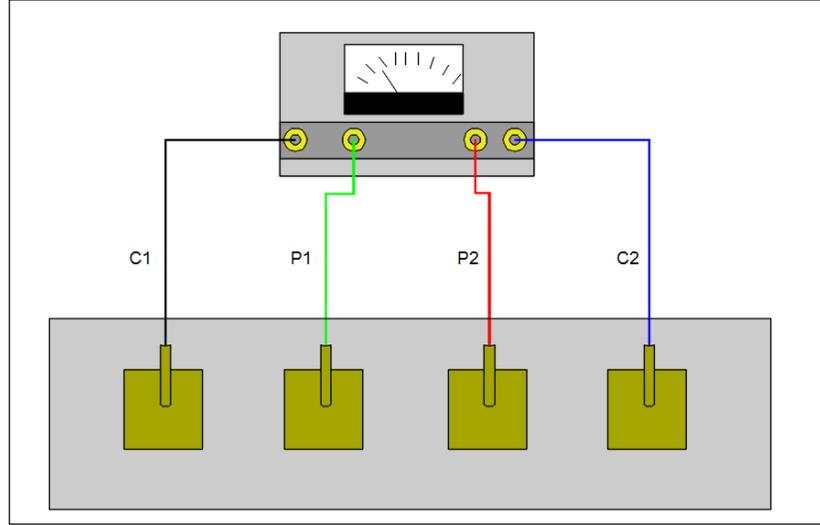
Este método sólo se debe aplicar cuando no se disponga del espacio suficiente para utilizar los métodos de Wenner o de Schlumberger-Palmer o cuando el equipo disponible para realizar la medición así lo requiera.

#### 4.1.4 Casos especiales

En algunas ocasiones las mediciones de resistividad del suelo deben realizarse en suelos cubiertos por pavimento, concreto o cemento, en los cuales se hace imposible hincar los electrodos tipo varilla además que se debe tener precaución por la posible presencia de elementos metálicos enterrados.

En estos casos pueden usarse placas de cobre, de 30 x 30 cms y un espesor de 3,8 cms, para reemplazar los electrodos auxiliares y agua para remojar el punto donde serán ubicadas, como lo ilustra en la Figura 3.

**Figura 3 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 norma ASTM D 3633-98 [6].

En resumen, las placas de cobre deberán ser dispuestas a la misma distancia en que se colocarían los electrodos auxiliares de acuerdo con el método de Wenner previamente descrito, lo cual debe hacerse luego de verter agua sobre las placas y remojar el sitio donde serán ubicadas, vigilando que las áreas humedecidas no se interconecten. Antes de iniciar las mediciones, 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).

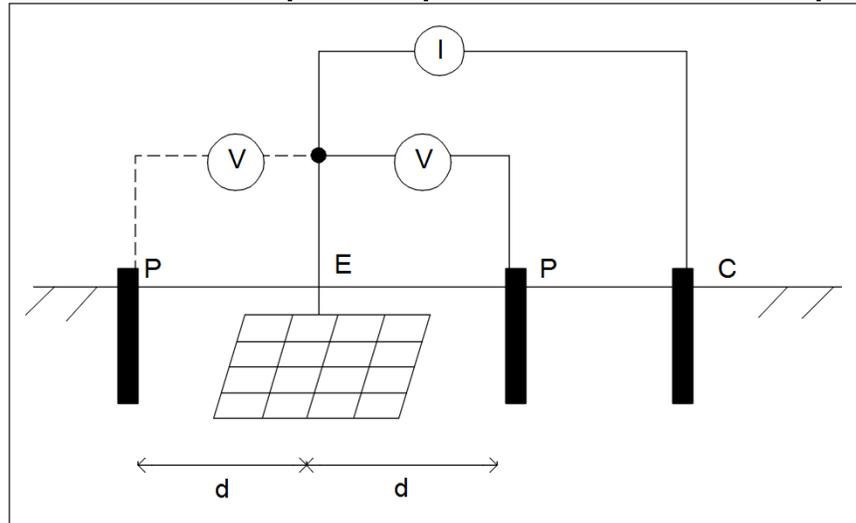
## 4.2 METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

La medición de la resistencia de puesta a tierra se debe realizar una vez culmina el montaje del sistema de puesta a tierra para verificar que las estimaciones asumidas durante el diseño hayan sido acertadas, como parte del proceso de certificación de la instalación (de acuerdo con el RETIE) y durante los mantenimientos que se realicen al sistema eléctrico.

En este capítulo se presentan los métodos aceptados para realizar la medición de la resistencia de puesta a tierra de los sistemas instalados en las redes de distribución del Grupo EPM.

### 4.2.1 Método de caída de potencial

El método consiste en inyectar una corriente entre el electrodo o sistema de puesta a tierra (E) a medir y un electrodo de corriente auxiliar (C), mientras se mide la tensión entre la puesta a tierra bajo prueba y un electrodo de potencial auxiliar (P) como se muestra en la Figura 4.

**Figura 4 Método de la caída de potencial para medir la resistencia de puesta a tierra**

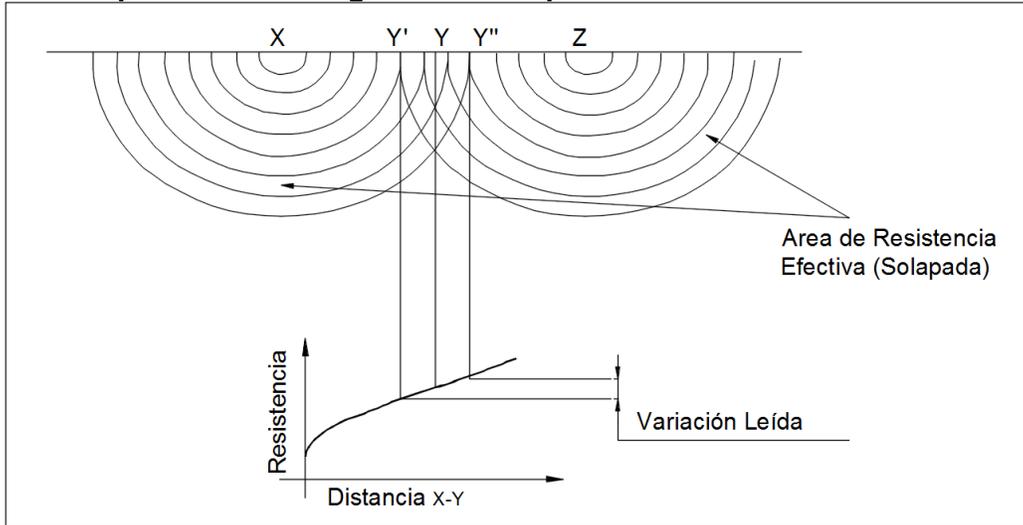
Con el propósito de minimizar la influencia entre electrodos, el electrodo de corriente y la malla de puesta a tierra deben estar separados una distancia mínima de 6,3 veces la mayor dimensión de la puesta a tierra bajo estudio. No mantener una distancia adecuada entre los electrodos puede generar inconvenientes por los gradientes de potencial.

El electrodo de potencial se debe ubicar en la misma dirección del electrodo de corriente, pero también se puede poner en la dirección opuesta como lo ilustra la Figura 4, tomando como punto de referencia el sistema de puesta que se mide. En la práctica, la distancia de ubicación "d" para el electrodo de potencial se elige aproximadamente al 62% de la distancia del electrodo de corriente. Esta distancia está basada en la posición teóricamente correcta (61.8%) para medir la resistencia exacta del electrodo para un suelo de resistividad homogéneo.

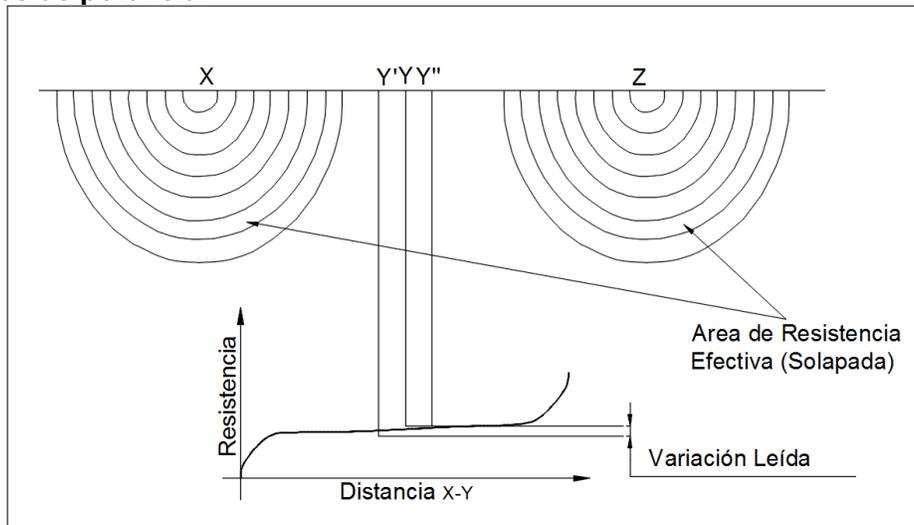
El electrodo de potencial es crítico en la medición de la resistencia de una puesta a tierra, por lo tanto, su localización debe ser libre de cualquier influencia del sistema de puesta tierra bajo medida y del electrodo auxiliar de corriente. La manera más práctica de determinar si el electrodo de potencial está fuera de la zona de influencia de los electrodos, es obtener varias lecturas de resistencias moviendo el electrodo de potencial en varios puntos entre la puesta a tierra bajo prueba y el electrodo de corriente. Si se obtienen dos o tres lecturas consecutivas aproximadamente constantes se pueden asumir como representativas del valor verdadero de la resistencia.

#### 4.2.1.1 Gradientes de potencial

La medición de la resistencia de puesta a tierra 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 lo tanto, si el electrodo de corriente, el de potencial y la puesta a tierra se encuentran muy cercanos entre sí, ocurrirá un solapamiento de los gradientes de potencial generados por cada electrodo, lo que se traduce en medidas de resistencia de puesta a tierra erróneas como se muestra en la Figura 5.

**Figura 5 Solapamiento de los gradientes de potencial**


Al ubicarse el electrodo de corriente a una distancia lo suficientemente lejana de la 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 6.

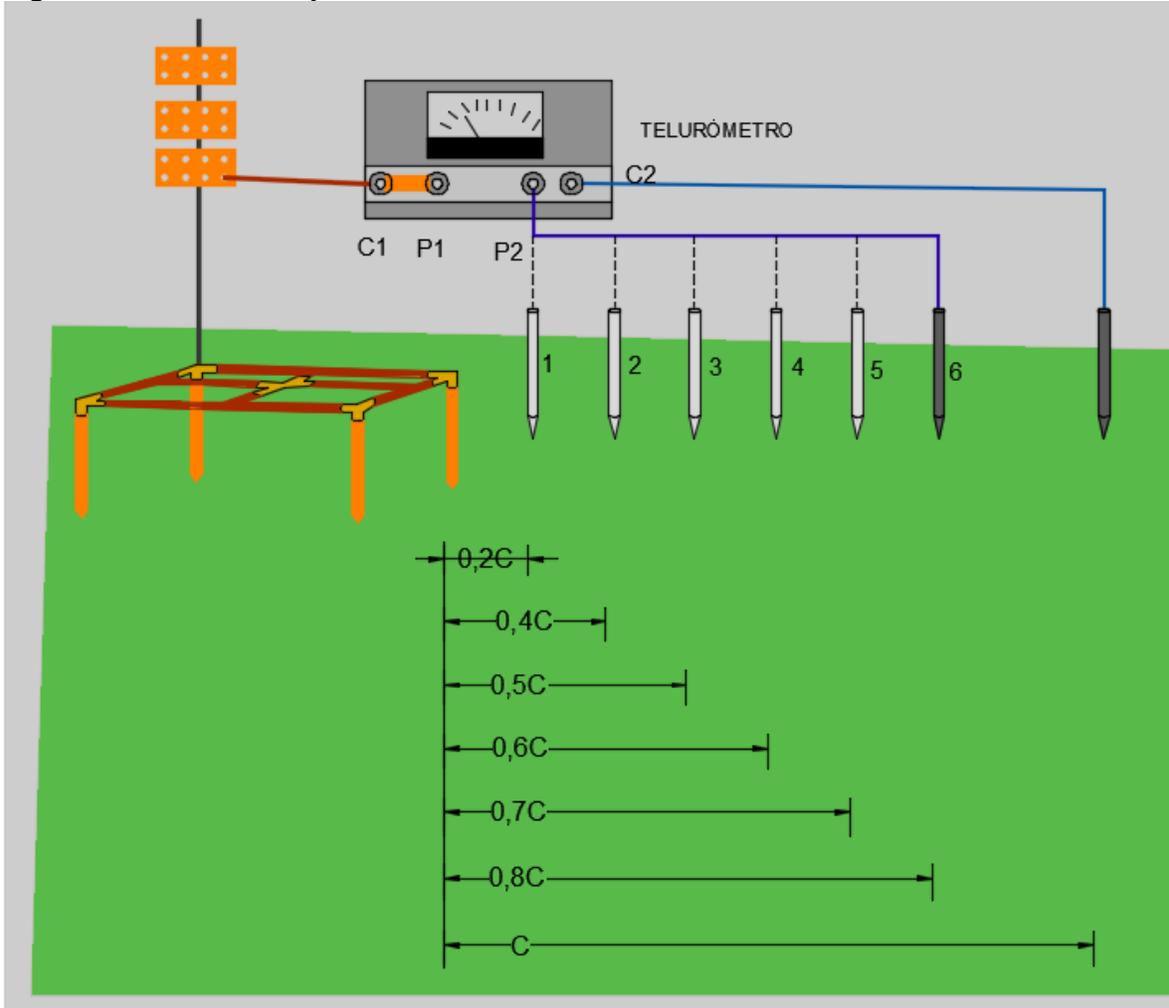
**Figura 6 Curva de resistencia con respecto a la distancia sin solapamiento de gradientes de potencial**


En la Figura 6 se puede observar que existe una porción de la curva que permanece casi invariable, la cual será más prolongada o corta, dependiendo de la separación entre los electrodos de corriente (Z) y bajo prueba (X). El valor de la resistencia asociada a este sector de la curva será el valor correcto de la resistencia de puesta a tierra.

#### 4.2.2 Método de la pendiente

Este método es útil para medir la resistencia en sistemas de puesta a tierra cuya máxima longitud supere los 30 m, o cuando la posición del centro de la puesta a tierra no es conocida o es inaccesible (por ejemplo, el SPT está por debajo de un edificio). También se puede utilizar cuando el área para colocar los electrodos de prueba está restringida o es inaccesible. En la Figura 7 se presenta un esquema de la metodología de medición.

Figura 7 Método de la pendiente



La forma de conexión es similar a la del método de caída de potencial, la diferencia radica en que se toman medidas moviendo el electrodo de potencial (electrodo intermedio) al 20%, 40% y 60% de la distancia entre la malla a medir y el electrodo remoto (a una distancia C de la malla). Se mide la resistencia de puesta a tierra usando cada distancia, obteniéndose respectivamente los valores de R1, R2 y R3, para luego calcular el valor del cambio de la pendiente ( $\mu$ ) con respecto a la distancia de la siguiente forma:

$$\mu = \frac{(R_3 - R_2)}{(R_2 - R_1)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Con el valor de  $\mu$  obtenido se debe consultar el valor correspondiente de  $k$  de acuerdo con las columnas de la Tabla 1. El valor de  $k$  se multiplica entonces por la distancia  $C$  para determinar la distancia a la cual se debe colocar el electrodo intermedio (electrodo de potencial  $pt$ ) con respecto a la malla a medir. Posteriormente, se debe medir la resistencia después de clavar el electrodo intermedio a la distancia calculada, que corresponde al valor más aproximado de resistencia del sistema de puesta a tierra medido.

Si el valor de  $\mu$  obtenido no está en la Tabla 1, se debe ubicar más lejos el electrodo de corriente. Este método se debe aplicar con mayor cuidado en suelos no homogéneos y con cambios bruscos de pendiente.

**Tabla 1 Valores de  $k$  en función de  $\mu$  para el método de la pendiente**

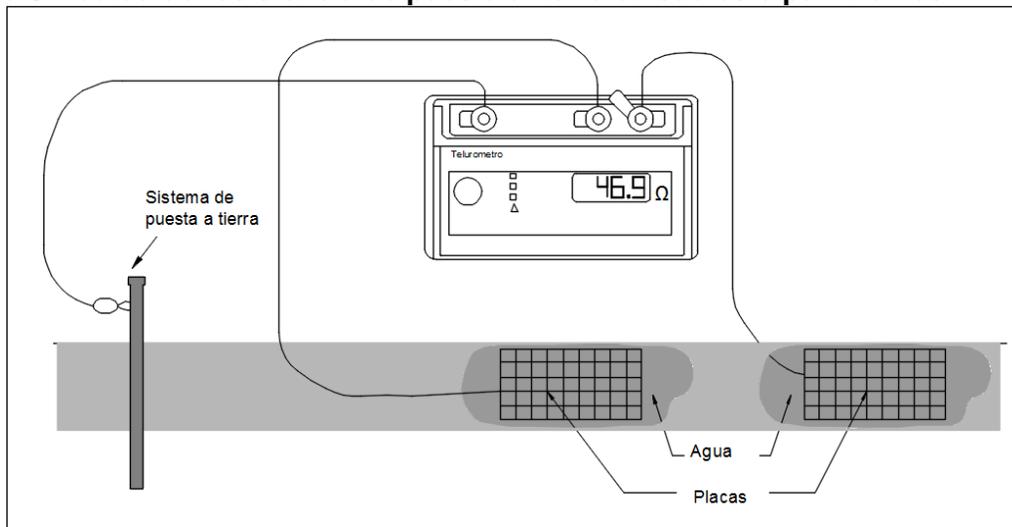
Valores de $k$ en función de $\mu$ para el método de la pendiente									
$\mu$	$k$	$\mu$	$k$	$\mu$	$k$	$\mu$	$k$	$\mu$	$k$
0,01	0,6932	0,3900	0,6446	0,7700	0,5856	1,1500	0,5071	1,5300	0,3740
0,02	0,6921	0,4000	0,6432	0,7800	0,5838	1,1600	0,5046	1,5400	0,3688
0,03	0,6909	0,4100	0,6418	0,7900	0,5821	1,1700	0,5020	1,5500	0,3635
0,04	0,6898	0,4200	0,6404	0,8000	0,5803	1,1800	0,4994	1,5600	0,3580
0,05	0,6886	0,4300	0,6390	0,8100	0,5785	1,1900	0,4968	1,5700	0,3523
0,06	0,6874	0,4400	0,6375	0,8200	0,5767	1,2000	0,4941	1,5800	0,3465
0,07	0,6862	0,4500	0,6361	0,8300	0,5749	1,2100	0,4914	1,5900	0,3404
0,08	0,6850	0,4600	0,6346	0,8400	0,5731	1,2200	0,4887	1,6000	0,3342
0,09	0,6838	0,4700	0,6331	0,8500	0,5712	1,2300	0,4859	1,6100	0,3278
0,10	0,6826	0,4800	0,6317	0,8600	0,5693	1,2400	0,4831	1,6200	0,3211
0,11	0,6814	0,4900	0,6302	0,8700	0,5675	1,2500	0,4802	1,6300	0,3143
0,12	0,6801	0,5000	0,6287	0,8800	0,5656	1,2600	0,4773	1,6400	0,3071
0,13	0,6789	0,5100	0,6272	0,8900	0,5637	1,2700	0,4743	1,6500	0,2997
0,14	0,6777	0,5200	0,6258	0,9000	0,5618	1,2800	0,4713	1,6600	0,2920
0,15	0,6764	0,5300	0,6243	0,9100	0,5598	1,2900	0,4683	1,6700	0,2840
0,16	0,6752	0,5400	0,6228	0,9200	0,5579	1,3000	0,4652	1,6800	0,2758
0,17	0,6739	0,5500	0,6212	0,9300	0,5559	1,3100	0,4620	1,6900	0,2669
0,18	0,6727	0,5600	0,6197	0,9400	0,5539	1,3200	0,4588	1,7000	0,2578
0,19	0,6714	0,5700	0,6182	0,9500	0,5519	1,3300	0,4556	1,7100	0,2483
0,20	0,6701	0,5800	0,6167	0,9600	0,5499	1,3400	0,4522	1,7200	0,2383
0,21	0,6688	0,5900	0,6151	0,9700	0,5479	1,3500	0,4489	1,7300	0,2278
0,22	0,6675	0,6000	0,6136	0,9800	0,5458	1,3600	0,4454	1,7400	0,2167
0,23	0,6662	0,6100	0,6120	0,9900	0,5437	1,3700	0,4419	1,7500	0,2051
0,24	0,6649	0,6200	0,6104	1,0000	0,5416	1,3800	0,4383	1,7600	0,1928
0,25	0,6636	0,6300	0,6088	1,0100	0,5395	1,3900	0,4346	1,7700	0,1797
0,26	0,6623	0,6400	0,6072	1,0200	0,5373	1,4000	0,4309	1,7800	0,1658
0,27	0,6610	0,6500	0,6056	1,0300	0,5352	1,4100	0,4271	1,7900	0,1511
0,28	0,6597	0,6600	0,6040	1,0400	0,5330	1,4200	0,4232	1,8000	0,1352
0,29	0,6583	0,6700	0,6024	1,0500	0,5307	1,4300	0,4192	1,8100	0,1183
0,30	0,6570	0,6800	0,6008	1,0600	0,5285	1,4400	0,4152	1,8200	0,1000
0,31	0,6556	0,6900	0,5991	1,0700	0,5262	1,4500	0,4111	1,8300	0,0803
0,32	0,6543	0,7000	0,5975	1,0800	0,5239	1,4600	0,4068	1,8400	0,0588
0,33	0,6529	0,7100	0,5958	1,0900	0,5216	1,4700	0,4025	1,8500	0,0353
0,34	0,6516	0,7200	0,5941	1,1000	0,5193	1,4800	0,3980		
0,35	0,6502	0,7300	0,5924	1,1100	0,5169	1,4900	0,3935		
0,36	0,6488	0,7400	0,5907	1,1200	0,5144	1,5000	0,3888		
0,37	0,6474	0,7500	0,5890	1,1300	0,5121	1,5100	0,3840		
0,38	0,6460	0,7600	0,5873	1,1400	0,5096	1,5200	0,3791		

### 4.2.3 Métodos especiales para medida de resistencia de puesta a tierra

#### 4.2.3.1 Medida de resistencia de puesta a tierra sobre pavimentos o suelos de concreto

En determinadas ocasiones la puesta a tierra se encuentra rodeada 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 8.

**Figura 8 Medida de resistencia de puesta a tierra en suelos o pavimentos**



Los procedimientos y requerimientos para la implementación de este método de medición deberán estar acorde a lo indicado en la ASTM D 3633-98 [6].

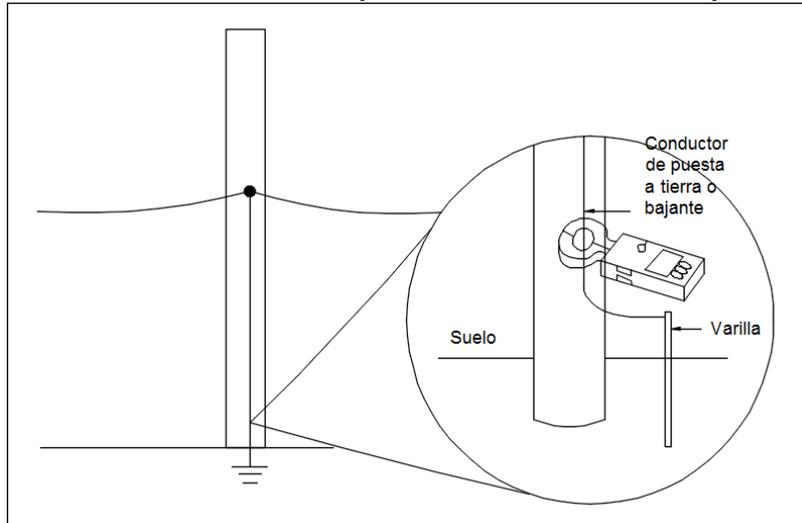
Las placas de cobre deberán ser dispuestas a la misma distancia en que se colocarían los electrodos auxiliares de acuerdo con el método de la caída de potencial previamente descrito. Las dimensiones de la placa deberán ser de 30 x 30 cms y espesor de 3,8 cm. Para su implementación se debe verter agua sobre las placas y remojar el sitio donde serán ubicadas para mejorar el contacto con el suelo teniendo cuidado de que las áreas humedecidas no se traslapen. Se requiere esperar un tiempo prudente para que el agua penetre y la lectura de la resistencia se haya estabilizado, donde el tiempo requerido para la penetración de la humedad variará dependiendo del espesor y de la permeabilidad de la capa del pavimento (30 minutos son normalmente suficientes). De esa manera las placas realizarán la misma función de los electrodos auxiliares.

#### 4.2.3.2 Medida de la resistencia de puesta a tierra mediante medidor tipo pinza

Este es un método práctico que viene siendo 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 o centros de grandes ciudades, entre otros.

En la Figura 9 se muestra la forma de medición con un medidor tipo pinza. Su aplicación consiste en encerrar la bajante o el electrodo de puesta a tierra con la pinza del medidor que funciona como sensor.

**Figura 9 Medición de la resistencia de puesta a tierra utilizando pinza**

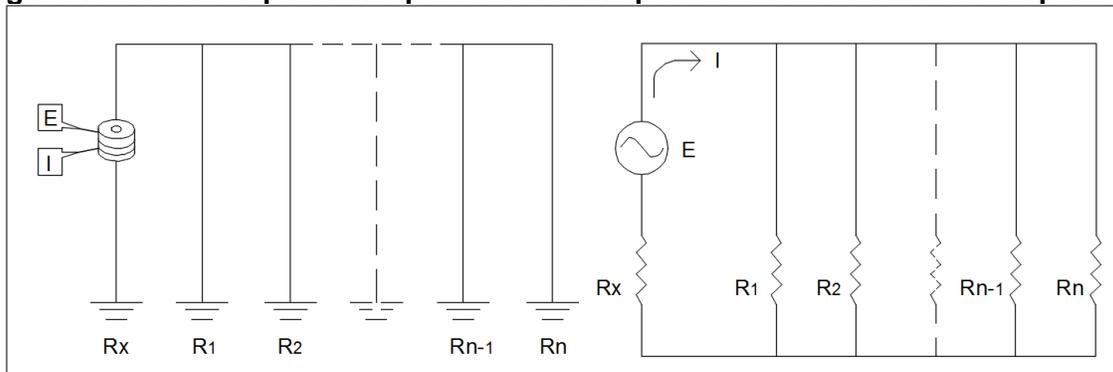


El principio de operación es el siguiente:

Si se asume que todas las resistencias de puesta a tierra en un sistema eléctrico con múltiples puestas a tierra son iguales y que la impedancia del neutro o cable de guarda es despreciable, el sistema puesto a tierra en más de un punto puede ser representado como un circuito simple de resistencias de puesta a tierra en paralelo (ver Figura 10). Si una tensión ( $E$ ) es aplicada al electrodo o sistema de puesta a tierra ( $R_x$ ), la corriente ( $I$ ) resultante fluirá a través del circuito.

Típicamente los instrumentos poseen un oscilador de tensión 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 10 Circuito equivalente para un sistema puesto a tierra en más de un punto**



La relación entre la tensión 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 puesto a tierra en más de un punto, excluyendo el electrodo bajo medida, es muy pequeña y puede ser asumida igual a cero. La ecuación es la siguiente:

$$E/I = Rx + \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{Rk}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde usualmente,

$$Rx \gg \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{Rk}} \quad \text{Ecuación 7}$$

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

Las aproximaciones que se deben considerar para realizar mediciones con medidores tipo pinza pueden ser excesivas para los sistemas de distribución. Debido a factores como la longitud de las redes, condiciones ambientales, problemas durante la instalación y la corrosión, entre otros; es difícil garantizar que todos los sistemas de puesta a tierra en una red de media tensión tengan valores de resistencia comparables.

Por otra parte, los cables de neutro (en los sistemas con neutro corrido) o los de guarda, presentan resistencias relativamente altas comparadas con las resistencias de puesta a tierra de estos sistemas. Estas imprecisiones pueden resultar en valores de medición alejados de la realidad por lo que se recomienda emplear este método como última opción, cuando sea imposible emplear alguno de los otros métodos descritos anteriormente.

El método tiene las siguientes limitaciones:

- La aplicación es limitada a electrodos conectados a sistemas puestos a tierra en más de un punto de baja impedancia.
- Las conexiones corroídas o partidas del neutro del sistema (o cable de guarda) pueden influenciar las lecturas.
- No es aplicable a los sistemas de puesta a tierra en los cuales la corriente inyectada pueda retornar por caminos diferentes a la misma tierra.
- La presencia de ruido de alta frecuencia o campos electromagnéticos altos en el sistema podría influenciar las lecturas.
- La existencia de altas resistencias en las conexiones con el electrodo de puesta a tierra afecta las lecturas.
- Si el conductor de conexión con el electrodo está abierto no se tendría una medida confiable.
- El método solo es aplicable a electrodos de puesta a tierra o mallas de puesta a tierra pequeñas por la capacidad energética que generalmente tienen los equipos de medición.

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, ofrecido por algunos fabricantes ( ver Figura 11).

**Figura 11 Transformador de corriente para abrazar todo el poste**



## 5 CONSIDERACIONES PARA APLICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS

### 5.1 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 por 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 (típicamente 5 a 10 cm). Es aconsejable una mayor profundidad para terrenos arenosos, de tal forma que se asegure un contacto sólido entre el electrodo y el terreno (si esto impide cumplir el límite de 5% para el cálculo no se debe aplicar la ecuación 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.
- Se recomienda efectuar dos conjuntos de mediciones, perpendiculares entre sí, teniendo como eje el mismo punto que se está evaluando. Estas mediciones se deben realizar con las mismas distancias de separación entre electrodos para poder hacer la comparación. Se recomienda promediar los dos conjuntos de mediciones para obtener un solo valor a una distancia entre electrodos
- Si la resistividad varía considerablemente con la profundidad, es aconsejable aumentar el número de mediciones, con el fin de obtener los valores de resistividad de las capas más profundas
- Los objetos conductivos en contacto con el suelo pueden invalidar las lecturas si están lo suficientemente cerca para alterar el flujo de corriente del equipo de prueba, esto aplica para objetos de grandes dimensiones (tuberías y/o cables de guarda). Por esta razón, las medidas se distorsionan donde existan conductores ya instalados. Cuando se trata de cables de guarda, se recomienda su desconexión al momento de la medida y en caso de tuberías u otro tipo de elementos se recomienda el uso de equipos de alta frecuencia.
- Los parámetros como temperatura y humedad del suelo son variables que afectan la medición y la resistividad aparente. Estas variables se utilizan para indicar al constructor que las mediciones fueron realizadas en situación crítica, lo que permitirá prever mejoras al momento de la instalación. En general se recomienda no tomar mediciones en terrenos mojados.

## 5.2 CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD

Cuando se está realizando la medición de la resistencia de puesta a tierra, se podría quedar expuesto a gradientes de potencial letales que pueden existir entre la puesta a tierra a medir y la tierra remota. Para ello es importante tener muy presente las siguientes recomendaciones:

- No deben ser realizadas mediciones en condiciones atmosféricas adversas.
- La puesta a tierra debe estar desconectada de las bajantes de los pararrayos, del neutro del sistema y de las tierras de los equipos.
- Antes de proceder a la medición, debe medirse la tensión originada por corrientes espurias. Si supera los 30 Voltios, no debe medirse la resistencia y debe localizarse la falla.
- Se deben utilizar guantes aislados y calzados con suela dieléctrica. Adicionalmente se deben conocer los requisitos de seguridad establecidos en las normativas aplicables.
- Uno de los objetivos de la medición es establecer la localización de la tierra remota, tanto para los electrodos de potencial como de corriente; Por tanto, las conexiones de estos electrodos deben ser tratadas como una fuente de posible potencial entre los cables de conexión y cualquier punto sobre la malla. Es importante tener precauciones en la manipulación de todas las conexiones.
- En ninguna circunstancia se deben tener las dos manos o partes del cuerpo humano, dispuestas de forma que completen o cierren el circuito entre puntos de posible alta diferencia de potencial.
- Se debe procurar que alrededor del electrodo de corriente no haya curiosos ni animales durante la medida.
- Se deberán tener en cuenta todas las recomendaciones dadas por el fabricante del equipo y que se esté usando el equipo adecuado para la medición.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra para descargadores de sobretensión es de especial cuidado, puesto que pueden aparecer, en el momento de la medida, corrientes extremadamente altas, de corta duración, debido a descargas eléctricas atmosféricas, por el funcionamiento propio del DPS. En un DPS aislado y puesto a tierra, la bajante o conductor de puesta a tierra nunca debe ser desconectada para realizar la medición, porque la base del DPS puede estar al potencial de la línea. La medición debe ser realizada una vez se tengan todas las precauciones de rigor.
- En subestaciones se debe tener presente la posibilidad de presencia de un potencial peligroso entre la malla de puesta a tierra y la tierra remota, si una falla en el sistema de potencia involucra la malla de puesta a tierra de la subestación durante la medida. El personal que realiza las medidas debe utilizar el equipo de protección personal adecuado. En subestaciones de grandes dimensiones (lados superiores a 30 m) deben aplicarse las técnicas establecidas en la norma IEEE 81.2.
- Debe utilizarse calzado y guantes aislados para realizar las medidas.
- Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco.
- No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, debido a la posibilidad de ocurrencia de rayos.

## 6 DISPOSITIVOS, EQUIPOS Y MATERIALES

En los numerales siguientes se presenta la descripción de los equipos y materiales recomendados.

### 6.1 TELURÓMETRO

Equipo utilizado para medición de resistividad del terreno y resistencia de puesta a tierra. Internamente se compone de una fuente de impulsos de corriente y un voltímetro. Se recomienda que este en capacidad de inyectar 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, entre otras), 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. 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.

El equipo deberá funcionar correctamente bajo temperaturas extremas (-10°C a +50°C) y bajo la exposición de radiaciones solares. Por lo expuesto, debe descartarse el empleo de materiales alterables por la humedad, radiación solar y otras condiciones ambientales desfavorables. El telurómetro deberá ser del tipo digital y automático; los mismos permitirán la medición de la resistencia óhmica de las puestas a tierra de las instalaciones y la medición de resistividad del terreno mediante el método de colocación de cuatro picas ubicadas en forma equidistantes entre si (método de Wenner). El equipo y los accesorios deberán estar almacenados en una maleta no metálica, adecuada para su transporte. La misma deberá estar forrada en su interior con un material que amortigüe posibles golpes en su manipulación. El equipo deberá mostrar en su display, una vez que se comienza a inyectar corriente eléctrica al suelo, la estabilización del valor medido, manteniéndolo luego de estabilizado dicho valor, por lo menos 3 segundos. El equipo deberá tener un rango de medidas que irán de 0,1 Ohm a 20 KOhm. Para el rango de 0 a 99 Ohm, el display deberá mostrar por lo menos una cifra después de la coma.

#### 6.1.1 Electrodo

Fabricados de acero estructural de bajo carbón o acero inoxidable tipo martensítico con un diámetro desde 0,475 a 0,635 cms y longitudes desde 30 hasta 60 cms. Las varillas deben tener tratamiento térmico para que tengan suficiente rigidez, para poder ser hincadas en suelos secos o gravilla. Los electrodos deben ser lisos, tener un mango, palanca u otro accesorio para ser hincados y un conector terminal para conectar el cable o alambre. Los electrodos tipo roscado no son recomendados ya que dejan aire atrapado entre la varilla y el suelo, creando una alta resistencia de contacto.

#### 6.1.2 Cableado

Conductor de cobre, cableado B normal según ASTM B8 y de calibre que va desde 18 al 22 AWG. Cuando el equipo viene para distancias normalizadas y fijas en su medición el cable puede ser multiconductor, 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 UL486 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.

### **6.1.3 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.

### **6.1.4 Calibración de la medida**

Para una adecuada medición de la resistividad del terreno y la resistencia de puesta a tierra, es de trascendental importancia que el equipo sea calibrado mínimo cada año o cada 100 mediciones (la que ocurra primero) por un laboratorio acreditado, para garantizar que las mediciones con el equipo presenten un error inferior al 5% del rango del instrumento. Los materiales auxiliares como los electrodos, cables y conectores también requieren verificación en ensayos de laboratorio.

**ANEXO A 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: \_\_\_\_\_

**REGISTRO DE LAS MEDIDAS**

Espaciamiento "a" (m)	Perfil 1		Perfil 2		Perfil 3		Resistividad Promedio
	R1 ( $\Omega$ )	$\rho$ 1 ( $\Omega$ -m)	R2 ( $\Omega$ )	$\rho$ 2 ( $\Omega$ -m)	R3 ( $\Omega$ )	$\rho$ 3 ( $\Omega$ -m)	$\rho=(\rho1+\rho2+\rho3)/3$
1							
2							
4							
6							
8							
10							
32							

Notas:

- De considerarse necesario levantar más perfiles, se puede adicionar columnas similares y ampliar el registro de medidas.
- Para el diseño de puesta a tierra 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 puesta a tierra de instalaciones Industriales, comerciales o residenciales, deben efectuarse medidas que cubran toda el área donde quedara 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 estándar superior al 50%.
- Las medidas a 32 metros son adoptadas en el caso de diseño de sistemas de puesta a tierra de área de gran tamaño ( $> 1000 \text{ m}^2$ ).

## ANEXO B FORMATO PARA REGISTRO DE MEDICIONES DE RESISTENCIA

### 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: \_\_\_\_\_

### REGISTRO DE LAS MEDIDAS

Método	Distancia (C) del electrodo de corriente al SPT (m)	Distancia (d) del electrodo de potencial al SPT (m)	Resistencia medida ( $\Omega$ )
Caída de potencial	C $\geq$ 6 * Max. Long. SPT	$d_1 = d_0 - 1,0$ m	R <sub>1</sub> =
		$d_0 = 0,62 * C$	R <sub>0</sub> =
		$d_2 = d_0 + 1,0$ m	R <sub>2</sub> =
Pendiente	C $\geq$ 6 * Max. Long. SPT	$d_1 = 0,2 * C$	R <sub>1</sub> =
		$d_2 = 0,4 * C$	R <sub>2</sub> =
		$d_3 = 0,6 * C$	R <sub>3</sub> =
	Calcular $\mu = (R_3 - R_2) / (R_2 - R_1)$ De la Tabla 1 obtener k Calcular la distancia del electrodo de potencial como $dp = k * C$ Con esta distancia se lee el valor real de R		R=
Pinza			R=

Notas:

- Para puestas a tierra en postes de distribución la distancia C puede ser asumida en 30 metros.
- Las resistencias medidas R<sub>1</sub> y R<sub>2</sub> no deben variar en más del 10% respecto a R<sub>0</sub> [Desviación (%) =  $[(R_{1,2} - R_0) / R_0 * 100]$ . Si hay un cambio significativo se debe incrementar la distancia C repitiendo el procedimiento anterior, hasta que el valor de resistencia medido se mantenga casi invariable.

- El método de la pendiente puede emplearse en áreas inaccesibles o restringidas en lugar del método de caída de potencial.
- El método de la pinza en general no es recomendado y menos aún en sistemas eléctricos aislados o que no se tenga ruta de retorno.