# MALLAS DE TIERRA

www.procobre.cl

Adaptación y traducción de la publicación N° 119 de la Copper Development Association, Inglaterra “Earthing Practice”, efectuada por el Ingeniero Civil Electricista, Nelson Morales Osorio, Profesor Asistente del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Asesor del Programa de Investigaciones en Energía (PRIEN), Universidad de Chile, Santiago de Chile.

**Registro de Propiedad Intelectual**
**Inscripción N° 127.374**
**ISBN: 956-7776-13-X**

Primera Edición 1999

Santo Domingo 550, Piso 2
Santiago de Chile
Fonos: 632 2520 - Fax: 638 1200

PN

INDICE


**1. NORMAS Y MARCO LEGAL ..... 2**

**2. METODOS DE PUESTA A TIERRA ..... 3**

**2.1 Puesta a tierra de sistemas de bajo voltaje. ..... 3**
*2.1.1 Opciones para conexión a tierra en bajo voltaje. ..... 3*
*2.1.2 Conexión equipotencial. ..... 6*
*2.1.3 Sistema de protección para remover condición de falla. ..... 6*

**3. MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO ..... 7**

**3.1 Configuración de electrodos para medida. ..... 7**
**3.2 Sondeo Eléctrico Vertical. ..... 8**
**3.3 Interpretación de las curvas de resistividad aparente ..... 8**
*3.3.1 Método de los quiebres de curvas de resistividad. ..... 8*
*3.3.2 Método de Curvas Patrón ..... 8*
**3.4 Resistividad equivalente del terreno. ..... 9**

**4. CONDUCTORES DE TIERRA. ..... 10**

**4.1 Conductor de protección de circuito. ..... 10**
*4.1.1 Conductores de conexión ..... 10*
**4.2 Electrodos de tierra. ..... 11**
*4.2.1 Barras ..... 11*
*4.2.2 Placas ..... 12*
*4.2.3 Electrodos horizontales. ..... 12*
*4.2.4 Mallas de tierra ..... 13*
*4.2.5 Electrodo activo ..... 15*
**4.3 Dimensionamiento de los conductores ..... 16**
*4.3.1 Conductores de servicio y de protección ..... 16*
*4.3.2 Valor mínimo de la sección de los electrodos de tierra. ..... 17*

**5. METODOS DE INSTALACION. ..... 18**

**5.1 Barras. ..... 18**
**5.2 Planchas. ..... 19**
**5.3 Electrodos horizontales. ..... 19**
**5.4 Conexiones ..... 19**
*5.4.1 Conexiones mecánicas ..... 19*
*5.4.2 Conexiones bronceadas ..... 19*
*5.4.3 Uniones exotérmicas ..... 19*
*5.4.4 Conexiones soldadas en forma autógena ..... 20*
*5.4.5 Capacidad de transporte de corriente de falla. ..... 20*
**5.5 Relleno ..... 20**
*5.5.1 Bentonita ..... 20*
*5.5.2 Yeso ..... 21*
*5.5.3 Aporte de sales “gel” ..... 21*

**6. MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA. ..... 21**

**7. MEDICION DE LA IMPEDANCIA DE ELECTRODOS DE TIERRA. ..... 23**

**8. COMPORTAMIENTO DE ELECTRODOS DE TIERRA ..... 25**

**8.1 Efecto de incremento de la profundidad de enterramiento de una barra vertical en suelo uniforme. ..... 25**
**8.2 Efecto de un incremento de longitud de un conductor horizontal. ..... 26**
**8.3 Efecto de incremento de la longitud del lado de una malla de tierra cuadrada ..... 27**
**8.4 Efecto de aumento del radio de un electrodo de sección circular. ..... 27**
**8.5 Efecto de profundidad de enterramiento. ..... 27**
**8.6 Efecto de proximidad de electrodos. ..... 27**

# MALLAS DE TIERRA

## 1. NORMAS Y MARCO LEGAL

Las normas proporcionan los límites de diseño que se deben satisfacer y explican cómo los sistemas de puesta a tierra se pueden diseñar para ajustarse a ellos. Incluyen formulaciones para realizar los cálculos necesarios o una guía detallada sobre aspectos prácticos.

Los sistemas de puesta a tierra deben ser diseñados para asegurar que, durante una falla a tierra, los potenciales tanto en el terreno como en los conductores conectados al electrodo de tierra o en los conductores expuestos en la vecindad, están bajo los límites apropiados.

En nuestro país, dentro de las normas técnicas eléctricas vigentes, aquellas que se refieren específicamente al tema son :

- NSEG 5 E.n. 71 — Instalaciones eléctricas de corrientes fuertes. Capítulo III, Protecciones de las instalaciones.
- NSEG 20 E.p. 79 — Electricidad, Subestaciones transformadoras interiores. Punto 10 Puesta a tierra.
- NCh Eléc. 4/84 — Electricidad. Instalaciones interiores en baja tensión. Punto 10 Puesta a tierra.

La Superintendencia de Electricidad y Combustibles fiscaliza el cumplimiento de las disposiciones contenidas en la reglamentación citada.

A nivel internacional, es muy conocido y empleado, el grupo de estándares del Institute of Electrical and Electronical Engineering (IEEE) :

ANSI / IEEE Standard 80-1986
IEEE Guide for safety in ac substation grounding.

ANSI C114.1-1973 / IEEE Standard 142-1972
IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.

ANSI/IEEE Std. 81: 1983, Guide for measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System.

## 2. METODOS DE PUESTA A TIERRA

La función del sistema de puesta a tierra es doble:

- proporcionar un camino definido de regreso a la fuente de energía y con impedancia suficientemente baja, vía los conductores de tierra, de tal modo que ante el evento de una falla a tierra de un conductor activo, fluya por una ruta predeterminada una corriente suficiente, que permita operar al dispositivo de protección del circuito.

- limitar a un valor seguro la elevación de potencial en todas las estructuras metálicas a las cuales tienen normalmente acceso personas y animales, bajo condiciones normales y anormales del circuito.

Los voltajes de seguridad, $V_s$, establecidos por el reglamento chileno son :

65 Volts en ambiente seco o de bajo riesgo eléctrico
24 Volts en ambiente húmedo o de alto riesgo eléctrico

Considerando como $I_n$ la corriente nominal del dispositivo automático protector del circuito, el valor de resistencia de puesta a tierra requerido para controlar que en todas las estructuras metálicas no se superen estos voltajes de seguridad, es :

$$Rpt = \frac{V_S}{2{,}5\, I_n} \text{ [Ohms]}$$

Por ejemplo, en un recinto seco, donde la instalación eléctrica está protegida por un automático de 10 A, la resistencia de puesta a tierra de dicha instalación debe ser 2,6 Ohms. Este es un valor relativamente difícil de conseguir con electrodos simples. Existen tres formas para enfrentar el problema, que pueden complementarse entre sí :

- aumentar artificialmente los voltajes tolerables, (mediante una operación más rápida del dispositivo protector, o aplicando elementos de seguridad adicionales, por ejemplo un piso más resistivo),

- utilizar mallas de tierra o electrodos especiales, que permitan alcanzar un valor menor de resistencia de puesta a tierra,

- mejorar localmente la resistividad del terreno, con el mismo propósito anterior.

### 2.1 Puesta a tierra de sistemas de bajo voltaje

El principio subyacente es tomar primero todas las precauciones razonables para evitar un contacto directo con las partes eléctricas vivas y, en segundo lugar, proporcionar medidas de protección contra contactos indirectos. Esto último implica puesta a tierra, conexión equipotencial efectiva y un sistema de protección que remueva la condición de falla.

#### *2.1.1 Opciones para conexión a tierra en bajo voltaje.*

Los métodos para efectuar una conexión a tierra en bajo voltaje reciben definiciones estándar. Cada uno se identifica por un código que contiene las siguientes letras :

T : tierra, conexión directa a tierra.
N : neutro
C : combinada
S : separada

*2.1.1.1 Sistema tipo TN-S.*

En este tipo, el neutro de la fuente tiene un único punto de conexión a tierra en el transformador de alimentación.

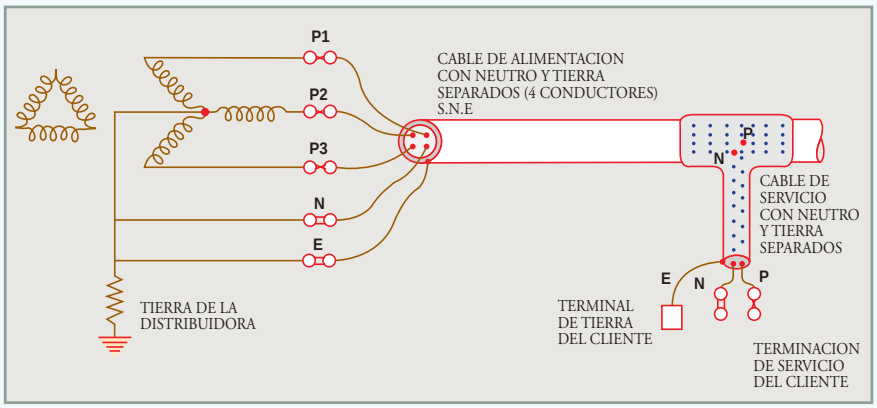



**Figura 1**
*Sistema TN-S típico. Fuente puesta a tierra en único punto*

Los cables de alimentación tienen neutro separado del conductor de tierra de protección. Generalmente el conductor de neutro es un cuarto conductor y el conductor de tierra es la vaina o cubierta protectora (conductor PE).

*2.1.1.2 Sistema tipo TN-C-S.*

En este tipo, el neutro de la alimentación se pone a tierra en varios puntos. El cable de alimentación tiene una pantalla metálica externa que combina neutro y tierra, con una cubierta de PVC (se denominan cables CNE).

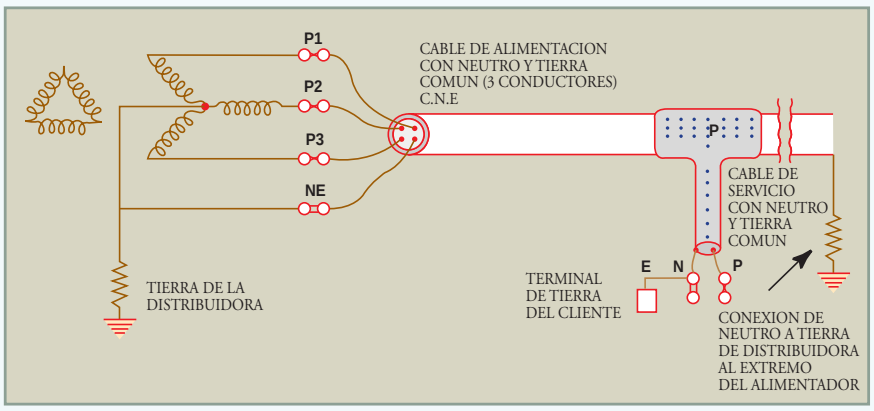



**Figura 2**
*Alimentación Tn-C-S típica (tierra protectora múltiple)*
*Neutro puesto a tierra por el proveedor en varias ubicaciones.*
*Envoltura provista con un terminal de tierra conectado a neutro de servicio*

La alimentación en el interior de la instalación del cliente debiera ser TN-S, es decir, el neutro y la tierra separados, conectados sólo en la posición de servicio.

**Este sistema no es reglamentario en nuestro país: no está autorizado.**

*2.1.1.3 Sistema tipo PNB.*

Este es una variación del sistema TN-C-S en que el cliente dispone de un terminal de tierra conectado al neutro de la alimentación pero el neutro se conecta a tierra en un único punto, normalmente cerca del punto de alimentación al cliente. Se reserva el uso de este arreglo cuando el cliente tiene un transformador particular.

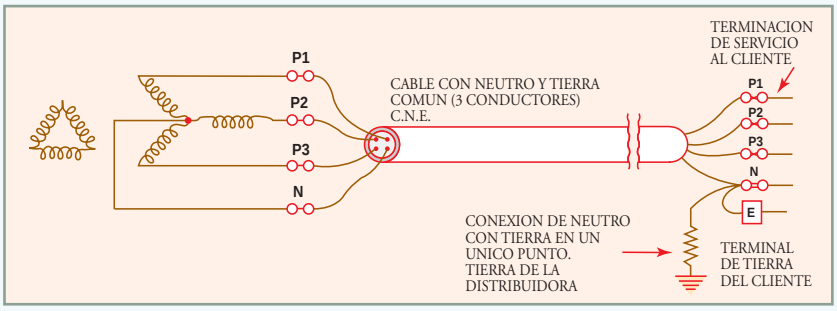



**Figura 3**
*Sistema PNB típico.*
*Cliente tiene transformador propio*

*2.1.1.4 Sistema tipo TT.*

Este en un sistema donde la alimentación se pone a tierra en un único punto, pero la instalación del cliente, la pantalla del cable y las partes metálicas expuestas están conectadas a tierra vía un electrodo separado, que es independiente del electrodo de alimentación.

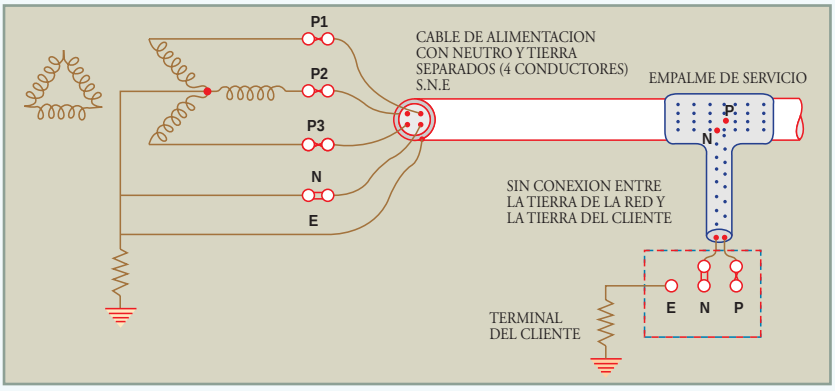



**Figura 4**
*Sistema TT típico.*
*La alimentación se pone a tierra en un punto.*
*Cliente proporciona tierra propia que es independiente de la tierra de la alimentación*

*2.1.1.5 Sistema tipo IT.*

Este es un sistema que no tiene conexión directa entre partes vivas y tierra pero con las partes conductivas expuestas de la instalación conectadas a tierra.

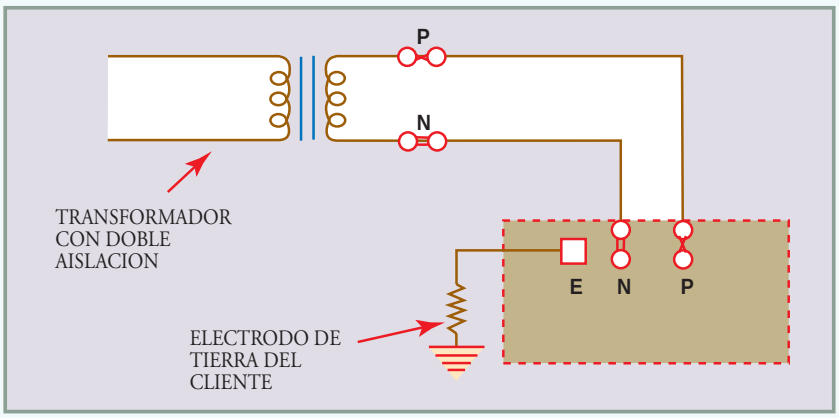
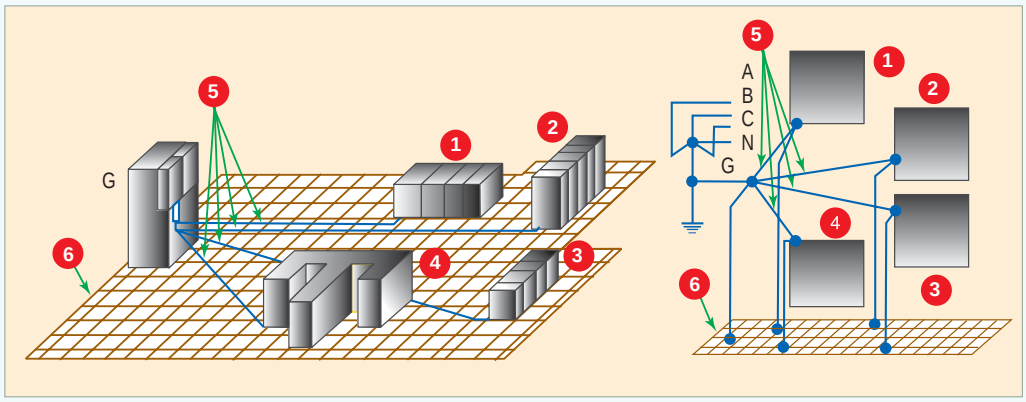



**Figura 5**
*Sistema IT típico.*
*Fuente aislada de tierra o conectada a tierra a través de alta impedancia.*
*Todas las partes conductivas expuestas de la instalación se conectan a una tierra independiente.*

*2.1.2 Conexión equipotencial.*

Consiste en establecer una conexión conductiva directa entre la tierra de protección y todos los elementos conductores expuestos que pudieran quedar energizados bajo una condición de falla.




**Conexión equipotencial**
*1,2,3,4: carcasas o estructuras metálicas 5: conductores de conexión equipotencial*
*6: malla de tierra*

La conexión conjunta de todas las estructuras metálicas normalmente expuestas, y la conexión de éstas al terminal de tierra, previene la posibilidad de una diferencia de potencial peligrosa que surja entre conductores adyacentes ya sea bajo condiciones normales o anormales.

*2.1.3 Sistema de protección para remover condición de falla.*

Se puede usar un detector de fuga a tierra y un interruptor. El dispositivo que incluye ambas funciones se conoce como dispositivo de corriente residual o interruptor diferencial. Esto último porque la unidad opera detectando el residuo, o diferencia, entre la corriente que sale y la que entra a la fuente de alimentación.

Cuando la corriente residual excede un valor predeterminado, el contacto abre. La unidad puede ser diseñada para ser ultrasensible con muy alta velocidad de operación para uso en situaciones especiales, por ejemplo, hospitales. Para aplicaciones domiciliarias se emplea unidades con 10 mA — 30 mA de nivel máximo de diferencia.

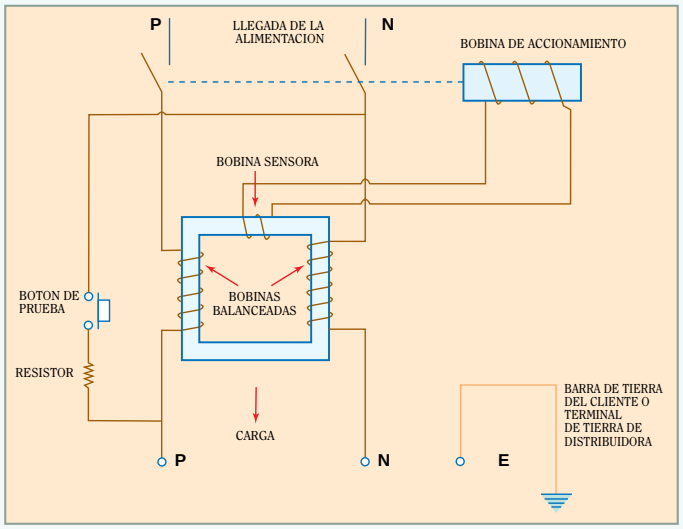



**Figura 7**
*Detector de corriente residual*

Los detectores de corriente residual se usan extensivamente en conjunto con protección convencional, tales como fusibles o interruptores de sobre-corriente.

## 3. MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad del terreno es de importancia decisiva en el diseño de una puesta a tierra y la única forma de conocerla con exactitud es mediante medidas directas de campo. Se considera al terreno formado por capas o estratos homogéneos, de resistividad uniforme y espesor fijo.

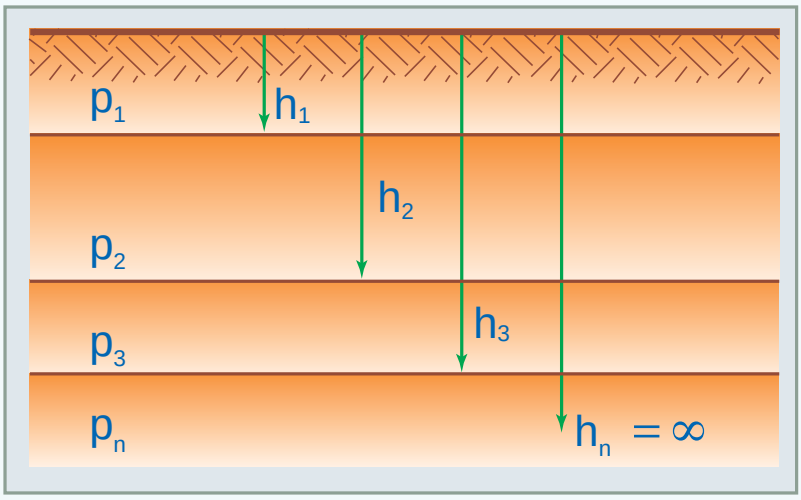



**Figura 8**
*Terreno multiestratificado*

### 3.1. Configuración de electrodos para medida

Una configuración básica de medida es la configuración de Schlumberger.

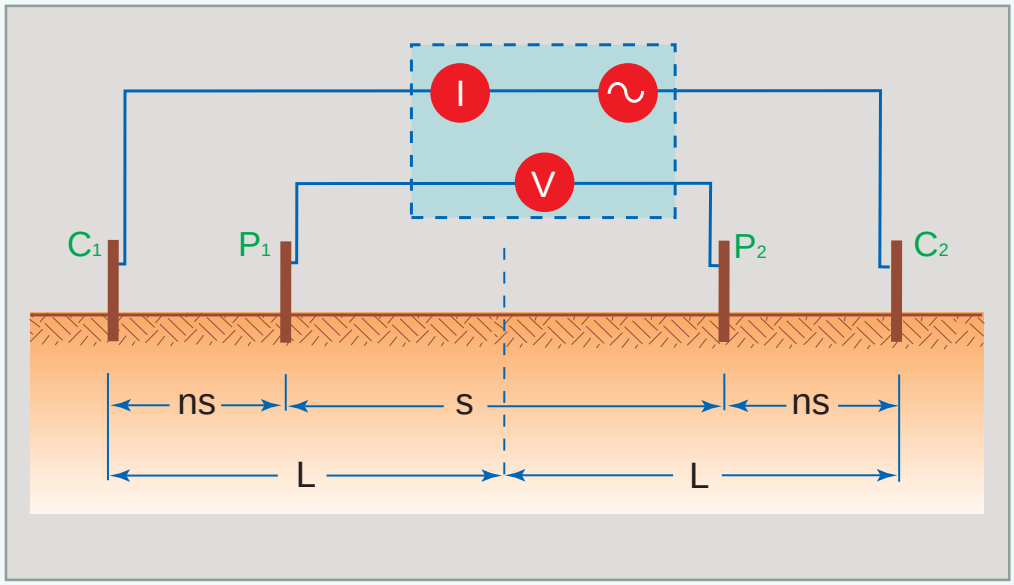



**Figura 9**

*Configuración de Schlumberger*

Los cuatro electrodos, tipo barra corta, se ubican en línea recta, cada par (potencial y corriente) simétricamente ubicados con respecto al centro de medición elegido. Los electrodos se ubican a distancias relativamente grandes comparadas con la profundidad de enterramiento, de modo de suponerse a éstos como

fuentes puntuales de corriente.

Esta configuración conduce a la determinación de una «resistividad aparente», $\rho_a$ , que se define como aquélla correspondiente a un terreno homogéneo en el cual, para la disposición dada de electrodos e igual magnitud de corriente inyectada al medio, se produce una misma elevación de potencial medida en el terreno no homogéneo. Siendo «s» la separación entre electrodos de potencial y «L» la distancia del centro de medición a cada electrodo de corriente, la resistividad aparente medida resulta :

El comportamiento de $\rho_a$ con la separación de los electrodos proporciona una guía para la determinación de las características de resistividad del terreno.

$$\rho_a = \pi \frac{V\,[(L/s)^2 - 0{,}25]s}{I} \quad [Ohm \cdot metro]$$

### 3.2. Sondeo Eléctrico Vertical

El centro y el eje de medición se mantienen fijos mientras se aumenta la separación entre electrodos de corriente. Se grafica una curva de resistividad aparente en función de la separación de los electrodos. Su finalidad es la determinación del número de capas del subsuelo, espesor y resistividad eléctrica de las mismas.

### 3.3. Interpretación de las curvas de resistividad aparente

*3.3.1. Método de los quiebres de curvas de resistividad.*

En general, las curvas de resistividad aparente se aproximan en forma asintótica a los valores de resistividad de la primera y última capa. El número de capas o estratos a que puede asimilarse el terreno se determina por el número de puntos de inflexión que posee la curva de resistividad aparente, aumentado en uno.

*3.3.2. Método de Curvas Patrón.*

La curva de sondeo eléctrico con una configuración electródica determinada, para un modelo geoeléctrico definido, es una función analítica conocida y existen numerosas curvas teóricas de resistividad llamadas «Curvas Patrón», que contemplan combinaciones de capas de diferentes resistividades y espesores.

El problema inverso, dada una curva de sondeo eléctrico vertical obtenida mediante medidas de campo, deducir y conocer la estructura geoeléctrica que la ha producido, no tiene solución única. En la práctica, suponiendo que a cada curva de campo le corresponde una única estructura, se compara la curva de campo con las curvas de resistividad aparente patrón. Si se obtiene un calce perfecto entre la curva de terreno y una curva patrón, se supone que la estructura del terreno es idéntica a la teórica. Las curvas se construyen en papel bi-logarítmico y están normalizadas, con el objeto de independizarse de las unidades y magnitudes de la medición, interesando sólo la forma de ella.

De estas curvas patrón las de mayor uso son las de Orellana y Mooney. También es posible representar computacionalmente estas curvas y efectuar el ajuste por pantalla, ingresando la curva de terreno, o bien proceder a un ajuste automático de los datos de terreno por algún método de adaptación de curvas.

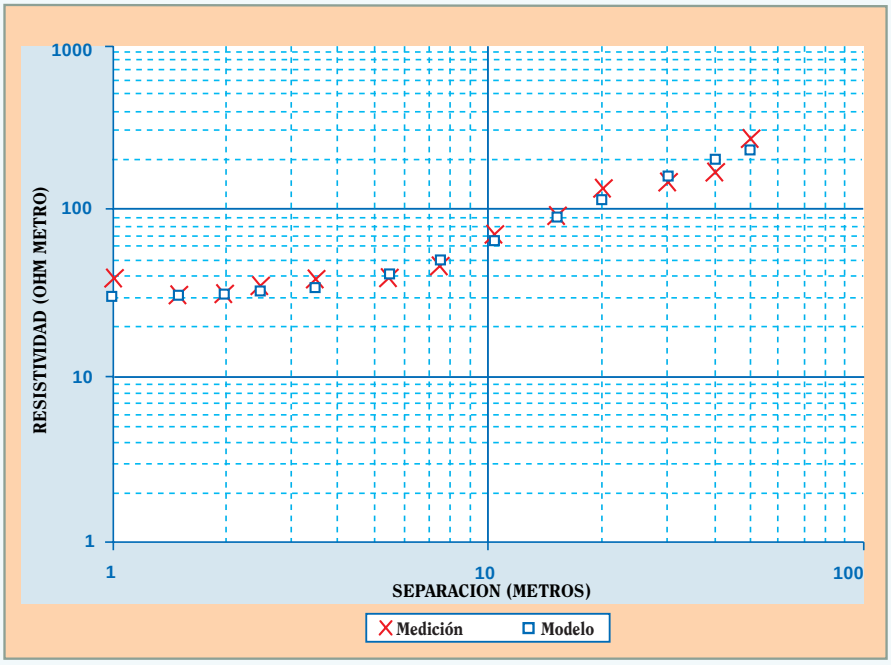



**Figura 10**
*Calce de curva de resistividad aparente por sondeo vertical con Curva Patrón*

### 3.4. Resistividad equivalente del terreno

Los procedimientos simplificados de análisis y diseño de puestas a tierra, están basados en la suposición de terreno homogéneo. Para su aplicación, se debe reducir el modelo de terreno estratificado general, a un modelo práctico de terreno homogéneo equivalente, caracterizado por un sólo parámetro, la resistividad equivalente $\rho_e$.

El método de uso tradicional, propuesto por Burgsdorf-Yakobs, para reducir las n capas desde la superficie de un modelo de terreno estratificado, a un terreno homogéneo equivalente caracterizado por una única resistividad, emplea los siguientes parámetros y expresiones:

$\rho_i$ : resistividad del estrato «i», supuesto uniforme, en Ohm- metro
$h_i$ : profundidad desde la superficie al término del estrato «i», en metros
S : área que cubre el perímetro del electrodo de tierra, en metros cuadrados
b : máxima profundidad de conductor enterrado, medida desde la superficie, en metros; incluye la profundidad de enterramiento de la malla y de las barras verticales si es el caso.

Para i = 1,2,...,n :

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

$$r_o^2 = r^2 - b^2$$

$$q_o^2 = 2r\,(r + b)$$

$$u_i^2 = q_o^2 + r_o^2 + h_i^2$$

$$v_i^2 = 0{,}5\left(u_i^2 - \sqrt{u_i^4 - 4q_o^2\, r_o^2}\right)$$

$$F_i = \sqrt{1 - v_i^2 / r_o^2}$$

Finalmente :

$$\rho_{eq}(1 \rightarrow n) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} (F_i - F_{i-1}) / \rho_i} \; [Ohm \cdot metro],\ con\ F_o = 0$$

La programación de las ecuaciones anteriores es fácil y directa y constituye un método rápido para evaluar el modelo equivalente con calculadoras manuales.

Debe observarse que la resistividad equivalente de un terreno determinado es dependiente de las dimensiones y ubicación del electrodo y se modifica si cambia su área o profundidad. En un terreno de 3 capas con las siguientes características:

| Capa | Resistividad (Ohm-metro) | Espesor (metros) |
|---|---|---|
| 1 | 85,0 | 2,0 |
| 2 | 500,0 | 5,0 |
| 3 | 2.000,0 | infinito |

Una barra de 1,5 metros enterrada desde la superficie, tiene una resistividad equivalente de 85,34 Ohm-metro; en cambio, en el mismo terreno, una malla de 10x10 $m^2$ tiene una resistividad equivalente de 234,9 Ohm-metro.

## 4. CONDUCTORES DE TIERRA

Hay dos tipos principales de conductores de tierra

- los conductores de protección (o de conexión) y
- los electrodos de tierra

### 4.1. Conductor de protección de circuito

Es un conductor separado instalado con cada circuito y está presente para asegurar que parte o toda la corriente de falla regrese a la fuente a través de él. Puede ser un conductor individual, la cubierta metálica exterior de un cable o la estructura de un ducto metálico.

#### *4.1.1. Conductores de conexión.*

Estos conductores aseguran que las partes conductivas expuestas (tales como carcasas metálicas) permanezcan aproximadamente al mismo potencial durante condiciones de falla eléctrica. Las dos formas de conductores de conexión son:

- Conductores de conexión equipotencial principales, que conectan entre sí y a tierra, partes conductivas expuestas que normalmente no llevan corriente, pero podrían hacerlo bajo una condición de falla

- Conductores de conexión suplementarios, para asegurar que el equipo eléctrico y otros ítems de material conductivo en zonas específicas estén conectados entre sí y permanecen sustancialmente al mismo potencial.

Es esencial, para ambos tipos de conductores, que el calibre escogido de conductor sea capaz de llevar el valor total de la corriente de falla estimada, por la duración estimada, sin perjuicio para el conductor o para sus uniones.

### 4.2. Electrodos de tierra

El electrodo de tierra es el componente del sistema de puesta a tierra que está en contacto directo con el terreno y así proporciona un medio para botar o recoger cualquier tipo de corrientes de fuga a tierra.

Los electrodos de tierra deben tener propiedades mecánicas y eléctricas apropiadas para responder satisfactoriamente a las solicitaciones que los afectan, durante un período de tiempo relativamente largo. El material debe tener buena conductividad eléctrica y no corroerse dentro de un amplio rango de condiciones de suelo. El material preferido generalmente es el cobre.

El electrodo puede tomar diversas formas : barras verticales, conductores horizontales, placas, combinación de conductores horizontales y barras verticales (mallas de tierra ).

#### *4.2.1. Barras*

Esta es la forma más común de electrodos, cuando no se requiere controlar los potenciales de superficie. Su costo de instalación es relativamente barato y pueden usarse para alcanzar en profundidad, capas de terreno de baja resistividad.

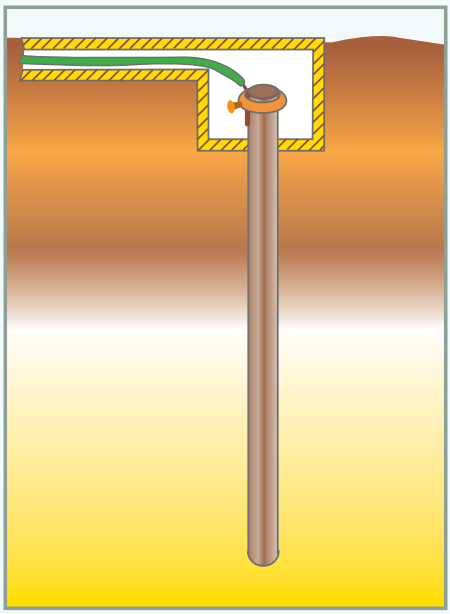


**Figura 11**
*Barra de tierra*

La barra es de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero empleado tiene alta resistencia mecánica. La capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente para que no se deslice al enterrar la barra. Las barras están disponibles en diámetros de 15 mm a 20 mm (cobre sólido) y 9,5 a 20 mm (acero recubierto de cobre) y longitudes de 1,2 a 3 metros.

La resistencia de una barra vertical de radio a [m] y longitud $l$ [m] enterrada desde la superficie en un terreno de resistividad equivalente $\rho_e$ , es :

$$R = \frac{\rho_e}{2\pi l}\left[Ln\left(\frac{4l}{a}\right) - 1\right] [Ohms]$$

Por ejemplo, una barra tipo Copperweld de 1,5 metros de longitud, 8 milímetros de radio, en un terreno de resistividad equivalente 100 Ohm-metro, tiene una resistencia de puesta a tierra de:

$$R = 59{,}63 \ Ohms$$

*4.2.2. Placas*

Los electrodos de placa son de cobre o de acero galvanizado. Las planchas de acero galvanizado tienen un mínimo de 3 mm de espesor y son cuadradas de 915 ó 1220 mm por lado. Las planchas de cobre son típicamente cuadradas de 600 mm ó 900 mm de lado y entre 1,6 mm y 3 mm de espesor.

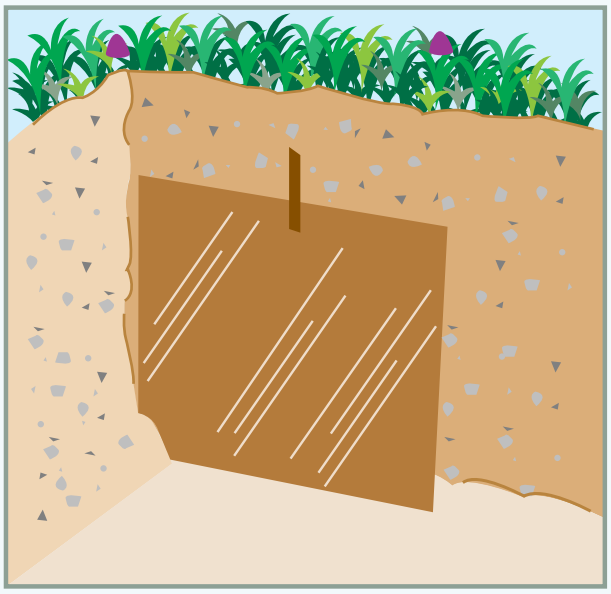


**Figura 12**
*Placas de tierra*

Una expresión simplificada para determinar su resistencia de puesta a tierra es:

$$R = \frac{0{,}8\ \rho_e}{L}\ [Ohms]$$

siendo L [ m ] la profundidad máxima y $\rho_e$ [ Ohm-m ] la resistividad equivalente del terreno.

*4.2.3. Electrodos horizontales.*

Están hechos de cintas de cobre de alta conductividad o conductores retorcidos (cables). La cinta es el material más conveniente pues para una sección dada de material presenta una mayor superficie y se considera que tiene un comportamiento mejor a alta frecuencia. Puede ser más difícil de conectar (por ejemplo a barras verticales), de modo que puede significar un costo de instalación levemente mayor.

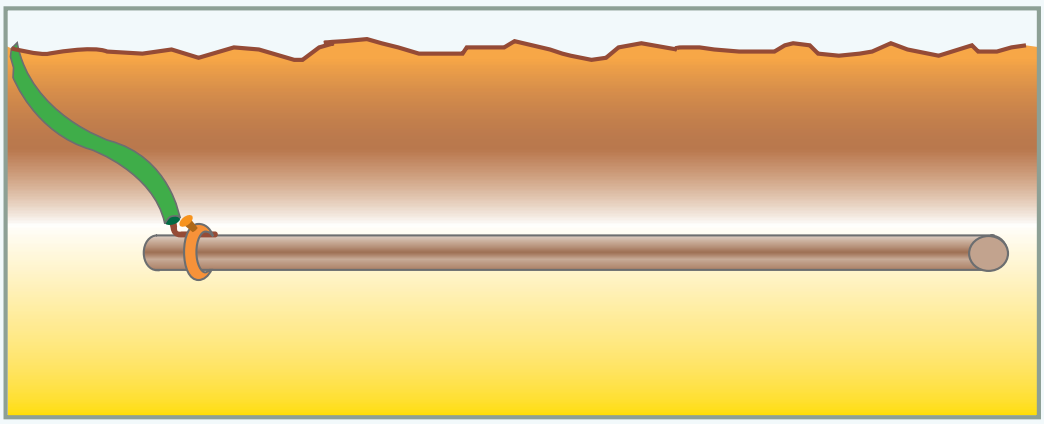


**Figura 13**
*Electrodo horizontal*

La resistencia de un conductor cilíndrico horizontal de radio a[m] y longitud $l$[m] enterrado a un profundidad de h[m], con h < l , es :

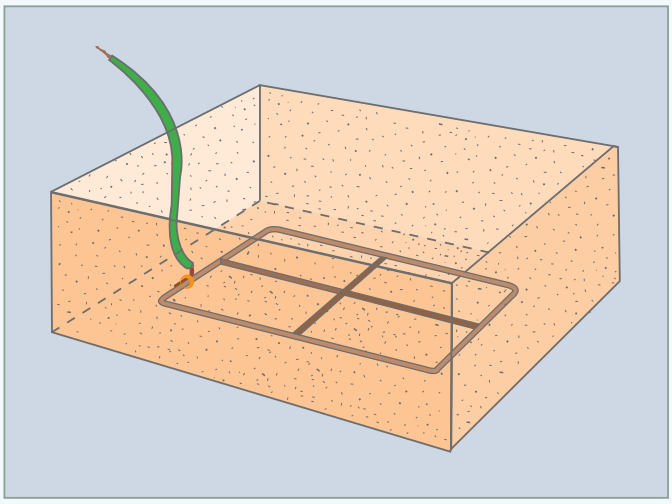
$$R = \frac{\rho_e}{2\pi l}\left[Ln\left(\frac{2\,l^2}{ah}\right) - 2 + 2\frac{h}{l} - \frac{h^2}{l^2} + \frac{h^4}{2\,l^4}\ .....\right][Ohms]$$

En un terreno de 100 Ohm-m de resistividad equivalente, un conductor de 10 metros de longitud y 16 milímetros de diámetro, enterrado a 0,6 metros, tiene una resistencia de :

R = 13,93 Ohms

*4.2.4. Mallas de tierra*

Es un reticulado formado por la unión de conductores horizontales, normalmente según direcciones perpendiculares y uniformemente espaciados, incluyendo eventualmente conductores verticales ( barras ). Se utiliza especialmente cuando el objetivo principal de la puesta a tierra es mantener un control de potenciales en la superficie del terreno, con un bajo valor de resistencia.



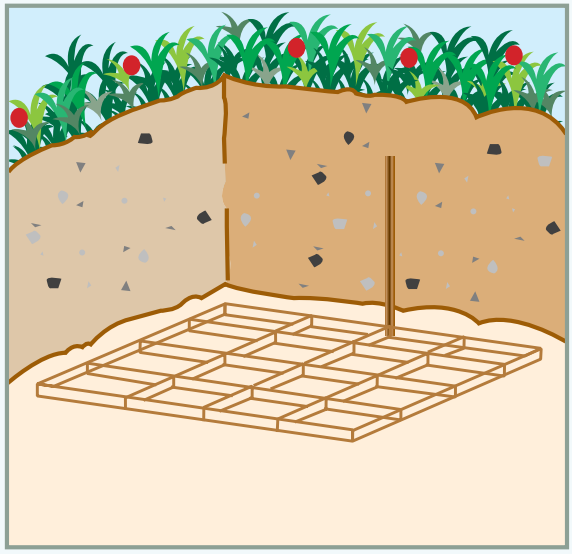


**Figura 14**
*Malla de tierra*

Para efectuar un cálculo aproximado de su resistencia de puesta a tierra, se utiliza la expresión de Laurent :

$$R = \frac{\rho_e}{4\sqrt{S/\pi}} + \frac{\rho_e}{L}\ [Ohms]$$

con :
$\rho_e$ : resistividad equivalente del terreno [ Ohm-m ]
S : superficie que cubre la malla [ $m^2$ ]
L : longitud total de conductor de la malla [ m ]

En un terreno de 100 [ Ohm-m ] de resistividad equivalente, una malla de 10x10 $m^2$, con cuatro retículos (3 conductores en cada dirección, igualmente espaciados) y enterrada a 0,8 metros de profundidad, tiene una resistencia aproximada de :

R = 6,1 Ohms

*4.2.4.1 Voltajes presentes en mallas de tierra*

Consideremos una malla formada por **n** conductores dispuestos en cada dirección, con separación uniforme **D** entre ellos, enterrada a una profundidad fija de **h** metros, siendo **L** la longitud total de conductor enterrado. En el momento en que la malla difunde una corriente de **I** Amperes al terreno, una persona puede quedar expuesta a los siguientes voltajes de riesgo :

**a) Voltaje de paso o voltaje pie-pie**

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

$$V_p = K_s K_i \rho_e \frac{I}{L} \; [Volts]$$

donde :

$$K_i = 0{,}65 + 0{,}172\, n$$

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

**b) Voltaje de contacto o mano-pie máximo, o voltaje de retículo**

El voltaje de contacto o 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 correspondiente al máximo posible, o voltaje de retículo :

$$V_m = K_m K_i \rho_e \frac{I}{L} \; [Volts]$$

donde

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

Estos voltajes presentes en la superficie del terreno, sobre una malla de tierra que difunde una corriente de falla, no deben superar en ningún caso, los voltajes tolerables por el cuerpo humano. La Guía Nº 80 de IEEE define la máxima diferencia de potencial a que puede ser sometido el cuerpo humano, en base a los posibles puntos de contacto, mediante las expresiones :

**a) Máximo voltaje de paso tolerable:**

$$V_p = \frac{116 + 0{,}696\, c\rho_s}{\sqrt{t}} \; [Volts]$$

**b) Máximo voltaje de contacto tolerable:**

$$V_c = \frac{116 + 0{,}174\, c\rho_s}{\sqrt{t}} \; [Volts]$$

en donde : $\rho_s$ [Ω-mt] : 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 voltajes 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 Ohms resistencia de contacto de la mano

se tienen los límites mostrados en la figura 15

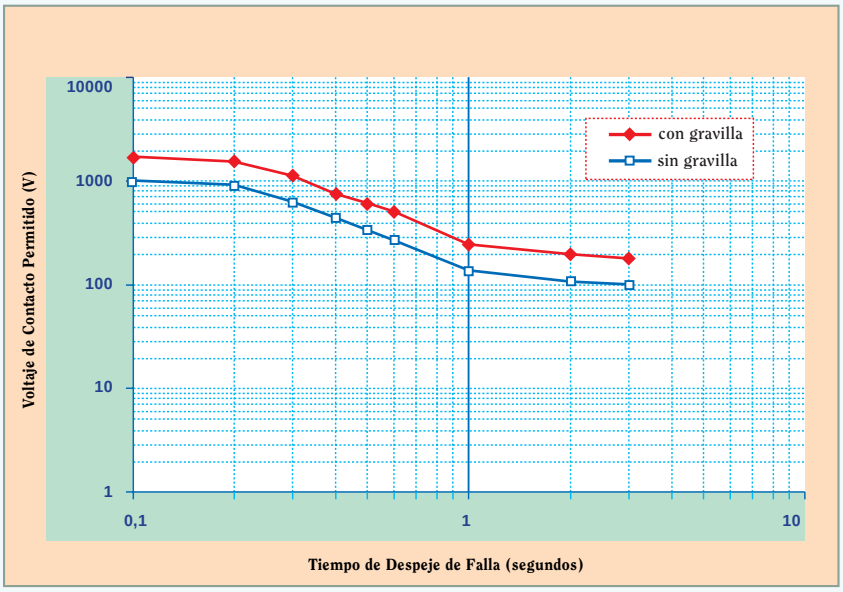



**Figura 15**
*Potenciales de contacto permitidos*

*4.2.5 Electrodo activo.*

Consiste de un tubo de cobre llenado parcialmente con sales o sustancias conductivas, con perforaciones en los extremos superior (para ventilación) e inferior (para drenaje) y sellados ambos extremos con tapas.

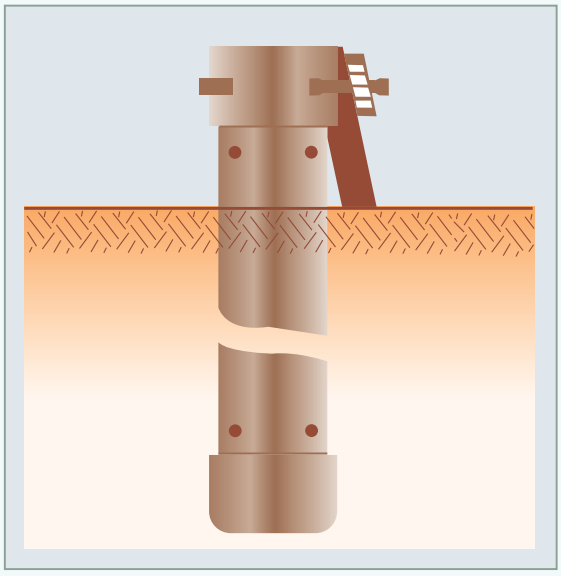


**Figura 16**
*Electrodo activo o raíz electrolítica*

La humedad existente en el aire ingresa por las perforaciones de ventilación, entra en contacto con la sal o sustancia conductiva formando una solución electrolítica que escurre hacia la parte inferior del tubo y fluye a través de las perforaciones de drenaje hacia el suelo circundante, mediante osmosis. De este modo, el electrolito forma "raíces" en el terreno que lo rodea, las cuales ayudan a mantener su impedancia en un nivel bajo.

Es una alternativa atractiva cuando no se dispone de mucho terreno y se desea obtener bajo valor de impedancia, ( se estima del orden o inferior a 10 Ohms) pero tiene el inconveniente que requiere mantenimiento.

### 4.3. Dimensionamiento de los conductores

*4.3.1. Conductores de servicio y de protección*

La dimensión de los conductores de los sistemas de servicio, debe calcularse conforme al valor de la corriente de servicio que circule por ellos. La sección mínima puede determinarse por la fórmula de Onderdonk :

$$I = 1973{,}55 \cdot S \frac{1}{\sqrt{33t}} \log_{10}\left(\frac{Tm - Ta}{234 + Ta} + 1\right) [Amperes]$$

con :

I : corriente, en Amperes

S : sección transversal, en $mm^2$

t : tiempo, en segundos, durante el cual se aplica la corriente I

Tm : máxima temperatura permisible, en °C

Ta : temperatura ambiente, en °C

Normalmente sin embargo, razones mecánicas determinan una dimensión mayor. La Norma chilena para instalaciones de baja tensión recomienda los siguientes valores mínimos, según la dimensión del conductor activo:

**Tabla 1**
**Sección mínima de conductor de tierra de servicio, según norma chilena**

| Sección nominal conductor activo ($mm^2$) | Sección nominal conductor de tierra de servicio ($mm^2$) |
|---|---|
| hasta 6 | 4 |
| entre 10 y 25 | 10 |
| entre 35 y 70 | 16 |
| entre 95 y120 | 35 |
| entre 50 y 240 | 50 |
| entre 300 y 400 | 70 |

Los conductores del sistema de protección se calculan según el siguiente cuadro, en el cual se han reunido recomendaciones de la Norma chilena y otras:

**Tabla 2**
**Sección mínima de conductores de protección, según norma chilena**

| Según $I_P$ (Amperes) | Según $S_c$ ($mm^2$) | Sección nominal conductor de tierra de protección ($mm^2$) |
|---|---|---|
| – | 1,5 | 1.5 |
| – | 2,5 | 1.5 |
| 25 | 4 | 2.5 |
| 35 | 6 | 4 |
| 50 | 10 | 6 |
| – | 16 | 6 |
| 60 | 25 | 10 |
| – | 35 | 10 |
| 80 a 125 | 50 | 16 |
| – | 70 | 16 |
| 160 | 95 hasta 185 | 25 |
| 225 | 240 hasta 300 | 35 |
| 260 | 400 ó más | 50 |
| – | 350 | 70 |
| – | sobre 350 | 95 |

*Notas: $I_p$ : corriente de funcionamiento de los dispositivos de protección, Amperes. $S_c$ : sección nominal de los conductores activos, $mm^2$.*

Para colector de tierra se recomienda emplear conductor o barra de cobre de 50 a 120 $mm^2$ de sección, según la corriente de derivación, aplicando el cuadro anterior.

*4.3.2. Valor mínimo de la sección de los electrodos de tierra.*

Dada la rigidez mecánica necesaria y la capacidad de descarga de corriente que ha de considerarse, se recomienda por lo general los siguientes valores mínimos, para la sección de los electrodos de tierra:

**a) Electrodos en zanjas:**

- Electrodos de acero galvanizado:
  - i) Hilos de 20 $mm^2$
  - ii) Cintas de 125 $mm^2$ y de 5 mm de grosor

- Electrodos de acero recubiertos de cobre:
  - i) Hilos de 50 $mm^2$.

- Electrodos de cobre:
  - i) Hilos de 16 $mm^2$
  - ii) Cintas de 75 $mm^2$ con un grosor de 3 mm.

**b) Electrodos de barra enterrados verticalmente:**

Según la norma chilena, no deben tener una longitud inferior a 2 m y con una separación mínima de 2 m entre dos cualquiera de ellos, si constituyen un electrodo común.

- Electrodos de acero galvanizado:
  - i) Varillas de 10 mm de diámetro
  - ii) Tubos de 20 mm de dimensión comercial
  - iii) Barras de acero en I. de 50 x 50 x 5 mm
  - iv) Barras de acero en U. de 30 x 33 x 5 mm
  - v) Barras de acero en T de 50 x 50 x 6 mm
  - vi) Barras de acero en cruz de 50 x 1 mm

- Electrodos de acero recubiertos de cobre:
  i) Varillas de acero de 10 mm de diámetro recubiertas de una capa de cobre de 0.35 mm.

- Electrodos de cobre:
  i) Tubos de 30 x 3 mm

**c) Electrodos de placa:**

- Placas de acero galvanizado, de 5 mm de grosor

- Placas de cobre, de 2 mm de grosor ( 1mm mínimo según Norma chilena)

**d) Electrodos para subestaciones transformadoras:**

El reglamento chileno establece los siguientes valores mínimos de densidad de corriente, dependiendo del tiempo de despeje de falla y del tipo de unión o conexión del cable:

**Tabla 3**
**Densidad de corriente admisible para cable de electrodo de tierra según norma chilena**

| Tiempo de fallas segundos | Cable solo [A/mm²] | Unión soldada [A/mm²] | Unión apernada [A/mm²] |
|---|---|---|---|
| 0,5 | 333,3 | 250,0 | 200,0 |
| 1,0 | 250,0 | 182,0 | 154,0 |
| 40,0 | 133,3 | 95,24 | 80,0 |
| 30,0 | 47,62 | 38,46 | 30,30 |

## 5. METODOS DE INSTALACION

Cuando se instalan electrodos de tierra, se deben satisfacer tres condiciones:

- El trabajo debe realizarse eficientemente para minimizar costos de instalación.
- El terreno o material de relleno usado no debe tener un índice de acidez pH que cause corrosión al electrodo.
- Todas las uniones o conexiones bajo tierra deben ser construidas de modo que no se presente corrosión en la unión o conexión.

El método de instalación, relleno y conexiones dependerá del tipo de sistema de electrodos que se usará y de las condiciones del terreno.

### 5.1. Barras

Generalmente la instalación de electrodos del tipo barras es la más conveniente y económica. Los métodos de instalación incluyen accionamiento manual, accionamiento mecánico y perforación. Barras cortas (típicamente hasta 3 metros de largo) se instalan a menudo empleando un martillo pesado (combo) operado manualmente. Las barras están acondicionadas con una cabeza endurecida y una punta de acero para asegurar que la barra misma no se dañe durante el proceso. Para barras más largas se emplea un martillo neumático.

Cuando se requiere barras más profundas o en condiciones de suelo difícil donde hay roca subyacente, la forma más efectiva es taladrar una perforación estrecha en la cual se instala el electrodo de barra con material de relleno adecuado. De este modo incluso puede instalarse electrodos de cobre sólido relativamente delgados.

### 5.2. Planchas

Las planchas requieren mayor excavación manual o mecánica y, por lo tanto, el costo de instalación puede ser muy alto. Se instalan normalmente en un plano vertical, desde aproximadamente 0,5 metros bajo la superficie. Debido al elevado costo de instalación, hoy día rara vez se justifica usar planchas, y las existentes, cuando se detecta deterioro, son reemplazadas normalmente por una agrupación de barras.

### 5.3. Electrodos horizontales

Pueden ser instalados en surcos directamente en el terreno o más frecuentemente en zanjas de hasta un metro de profundidad. Lo habitual es entre 60 - 80 centímetros y más si es necesario pasar bajo nivel de cultivo o de escarcha, en zonas heladas.

Una buena oportunidad de instalación es tender el conductor durante las excavaciones para obras civiles, previniendo daño o robo del conductor, una vez tendido.

### 5.4. Conexiones

Las conexiones entre los diferentes componentes deben ser mecánicamente robustas, tener buena resistencia a la corrosión y baja resistividad eléctrica. Es prudente evitar uniones y conexiones innecesarias.

Debe considerarse la duración y el valor de corriente de falla que se espera que soporte el sistema de tierra. Los métodos de unión empleados incluyen métodos mecánicos, soldadura en fuerte (bronceado), soldadura exotérmica y soldadura por fusión autógena.

#### *5.4.1. Conexiones mecánicas*

Las de uso más frecuente son la conexión apernada ( en el caso de cintas o barras de sección rectangular ) y la conexión por compresión (abrazadera). Es esencial una conexión eléctrica de baja resistencia. En las conexiones apernadas, debe tenerse cuidando con el tamaño de las perforaciones taladradas para acomodar el perno, para no perjudicar la capacidad de transporte de corriente de la cinta o barra. El diámetro de esta perforación no debe ser superior a un tercio del ancho de la cinta o barra.

Cuando se apernan metales diferentes (por ejemplo cintas de cobre y aluminio), las superficies deben ser minuciosamente limpiadas y protegidas por un inhibidor de óxido. Una vez hecha la conexión, el exterior debe ser recubierto por pintura bituminosa u otro medio para proteger contra el ingreso de humedad. Cuando se une cobre y aluminio, el cobre primero debe ser estañado. Estas conexiones no pueden ser enterradas.

Para unir distintos tipos de conductores, por ejemplo barras de tierra a cinta o cable, se dispone de abrazaderas apropiadas.

El método de unión por remache no es aceptable, pues los remaches se sueltan y rompen por vibración, oxidación, etc.

#### *5.4.2. Conexiones bronceadas*

La conexión bronceada se aplica ampliamente al cobre y a aleaciones de cobre. Es esencial disponer las superficies planas limpias pues los materiales de bronceado no fluyen como la soldadura. Es esencial además una buena fuente de calor, particularmente para conectores grandes. La técnica emplea alta temperatura y bronce como material de relleno, que es el que más se ajusta al cobre.

#### *5.4.3. Uniones exotérmicas*

Estas uniones se realizan mediante un molde de grafito que se diseña para ajustar el tipo específico de unión y el tamaño de los conductores. Usando una pistola con pedernal se enciende una mezcla de polvos de aluminio y de óxido de cobre y la reacción que se crea forma una unión de cobre virtualmente puro entorno a los conductores. La reacción de alta temperatura se produce en el interior del molde de grafito.

Los metales que pueden conectarse son acero inoxidable, bronce, cobre, acero con recubierta de cobre, acero galvanizado y riel de acero.

*5.4.4. Conexiones soldadas en forma autógena.*

Cuando necesitan unirse componentes de cobre de gran tamaño, se usa soldadura autógena en ambiente gaseoso. El arco eléctrico proporciona el calor, mientras que el área entorno al electrodo y la soldadura es envuelta por un gas tal como argón, helio o nitrógeno. Este último se usa ampliamente como el "gas inerte" cuando se suelda cobre. El aluminio puede soldarse vía arco de gas inerte de tungsteno o arco de gas inerte de metal. También en este caso (aluminio) se usa algunas veces la soldadura en frío a presión.

*5.4.5. Capacidad de transporte de corriente de falla.*

El tipo de unión puede influir en el tamaño del conductor usado debido a las diferentes temperaturas máximas permisibles para las distintas uniones. La tabla siguiente indica la máxima temperatura permisible para diferentes tipos de uniones y el tamaño del conductor requerido según el tipo de unión, para una corriente de falla de 25 kA y una duración de 1 segundo.

**Tabla 4**
**Temperatura máxima permisible para diferentes tipos de uniones**

| Uniones | Apernada | Bronceada | Soldada |
|---|---|---|---|
| Temp. Máxima<br>Calibre conductor | 250ºC<br>152 mm² | 450ºC<br>117 mm² | 700ºC<br>101 mm² |

**5.5. Relleno**

Derramando una mezcla de sustancias químicas y de tierra arneada en el volumen alrededor del electrodo, se obtendrá una reducción inmediata y significativa en su resistencia de puesta a tierra. Sin embargo, si los elementos químicos usados se eligen debido a que son solubles, continuarán diluyéndose progresivamente por agua de lluvia u otra causa y la resistividad del suelo entonces aumentará, hasta eventualmente retornar a su valor original. Se necesita un mantenimiento regular para reaprovisionamiento de los elementos químicos diluidos. Además del costo de mantenimiento, debe considerarse el impacto en el ambiente local de las sustancias químicas incorporadas, lo que puede entrar en conflicto con la legislación de protección al ambiente. Esta razón descarta un grupo de materiales que antiguamente se empleaban como relleno. En particular, materiales que no debieran ser usados como relleno son: arena, polvo de coque, ceniza, y otros materiales ácidos y/o corrosivos.

El material de relleno debe ser no-corrosivo, de un tamaño de partícula relativamente pequeño y, si fuera posible, que ayude a retener la humedad. Si el material previamente excavado es apropiado como relleno, debiera ser arneado previamente y asegurar luego una buena compactación. El suelo debiera tener un índice de pH entre 6,0 (ácido) y 10,0 (alcalino). La arcilla dura no es un material de relleno conveniente ya que si es fuertemente compactada, puede llegar a ser casi impermeable al agua y podría permanecer seca.

En algunas circunstancias, se requiere emplear materiales de relleno especiales, debido a la deficiente conductividad eléctrica del terreno. En estos casos, se agregan deliberadamente algunos aditivos con la intención de reducir la resistividad del suelo en la vecindad del electrodo y de ese modo reducir su impedancia de puesta a tierra. El grado de mejoramiento depende principalmente del valor de resistividad original del terreno, de su estructura y del tamaño del sistema de electrodos.

Materiales especiales de relleno para producir este efecto, son :

*5.5.1. Bentonita*

Es una arcilla de color pardo, de formación natural, levemente alcalina, con un pH de 10,5. Puede absorber casi cinco veces su peso de agua, reteniéndola y de este modo expandirse hasta treinta veces su volumen seco. Su

nombre químico es montmorillonita sódica. En terreno, puede absorber humedad del suelo circundante y ésta es la principal razón para usarla, ya que esta propiedad ayuda a estabilizar la impedancia del electrodo a lo largo del año. Tiene baja resistividad ( aproximadamente 5 Ohm - metro ) y no es corrosiva. Se usa más a menudo como material de relleno al enterrar barras profundas. Se compacta fácilmente y se adhiere fuertemente.

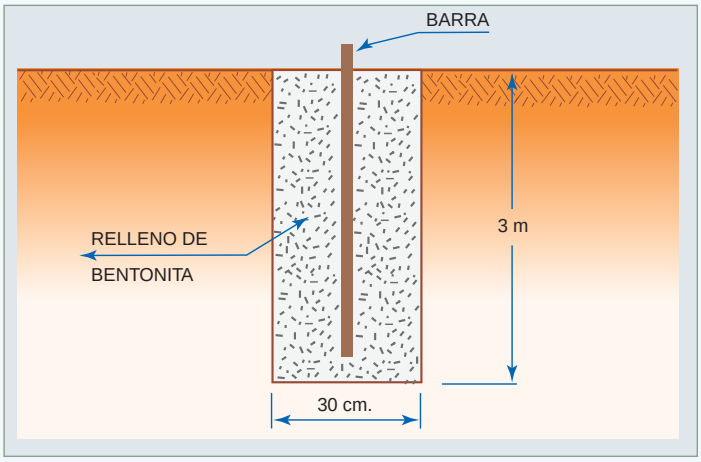



**Figura 17**
*Tratamiento de terreno con material de baja resistividad*

*5.5.2. Yeso*

Ocasionalmente, el sulfato de calcio (yeso) se usa como material de relleno, ya sea solo o mezclado con Bentonita o con el suelo natural del área. Tiene baja solubilidad, y baja resistividad (aproximadamente 5-10 Ohm-metro en una solución saturada). Es virtualmente neutro, con un valor de pH entre 6,2 y 6,9. Se presenta en forma natural y se asegura que no causa corrosión con el cobre, aunque algunas veces el pequeño contenido de $SO_3$ ha causado preocupación por su impacto en estructuras de concreto y fundaciones (cimientos).

El efecto beneficioso en el valor de la resistencia a tierra del electrodo es menor que en el caso de bentonita.

*5.5.3. Aporte de sales "gel".*

Dos o más sales en solución acuosa, acompañadas de catalizadores en la proporción adecuada, reaccionan entre sí formando un precipitado en forma de "gel" estable, con una elevada conductividad eléctrica (resistividad de aproximadamente 1 Ohm-metro), resistente al ambiente ácido del terreno, con buenas cualidades higroscópicas e insoluble al agua. Esta última cualidad le confiere al tratamiento con esos materiales sintéticos su permanencia en el tiempo.

Con estos gel se consigue reducciones en la resistencia de puesta a tierra de electrodos que van del 25% al 80% del valor original sin tratamiento.

## 6. MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

El método aceptado para verificar la condición de un electrodo de tierra es mediante prueba o ensayo desde superficie. Sin embargo, la prueba de impedancia del sistema de tierra no necesariamente detectará, por ejemplo, corrosión en algunas componentes del electrodo o en las uniones y no es suficiente para indicar que el sistema de puesta a tierra está en buenas condiciones.

La frecuencia del mantenimiento y la práctica recomendada en cualquiera instalación depende del tipo y tamaño de la instalación, su función y su nivel de voltaje. Por ejemplo, se recomienda que las instalaciones domésticas se prueben cada cinco años y las instalaciones industriales cada tres. Los locales con acceso de público requieren inspección más frecuente y dentro de los que requieren una inspección anual están las estaciones bencineras, teatros, cines y lavanderías.

Todos los tipos de instalaciones deben ser objeto de dos tipos de mantenimiento:

- Inspección a intervalos frecuentes de aquellas componentes que son accesibles o que pueden fácilmente hacerse accesibles.

- Examen, incluyendo una inspección rigurosa y, posiblemente prueba.

La **inspección** del sistema de tierra en una instalación normalmente ocurre asociada con la visita para otra labor de mantenimiento. Consiste de una inspección visual sólo de aquellas partes del sistema que pueden verse directamente, particularmente observando evidencia de desgaste, corrosión, vandalismo o robo.

El procedimiento en diferentes instalaciones es el siguiente:

- **Instalaciones domésticas y comerciales**. La inspección normalmente toma lugar asociada con otro trabajo en el local, por ejemplo, mejoramiento del servicio, extensiones, etc. El contratista eléctrico debe inspeccionar a conciencia y recomendar cambios donde observe que una instalación no satisface las normas correspondientes. En particular, debe asegurar que la conexión entre los terminales de tierra del proveedor y del cliente es de dimensión suficiente para cumplir la reglamentación.

- **Subestaciones de distribución industriales o de la compañía eléctrica**. Requieren inspección regular, típicamente una vez al año, con inspección visual de todo el arreglo visible de conductores del sistema de tierra. Si la red de bajo voltaje es aérea, el sistema de tierra de la red se revisa como parte de las normas regulares de revisión de línea.

- **Subestaciones principales de compañías eléctricas**. Son monitoreadas continuamente por control remoto e inspeccionadas frecuentemente - típicamente 6 a 8 veces al año. Obviamente algunos casos de deficiencias en el sistema de tierra, tales como el robo de conductores de cobre expuestos, no pueden detectarse por el monitoreo continuo y deberían ser descubiertos durante una de estas visitas.

El **examen** de un sistema de tierra normalmente es parte del examen del sistema eléctrico en su conjunto. Consiste de una muy rigurosa y detallada inspección del sistema de tierra global. En particular, el examinador revisará si el sistema satisface las normas de puesta a tierra vigentes. Además, el sistema debe probarse como se indica, de acuerdo al tipo de instalación :

**Instalaciones domésticas y comerciales**. El examen de estas instalaciones por parte de un contratista eléctrico se hace normalmente a solicitud del cliente. Se recomienda que este examen se realice con frecuencia no inferior a una vez cada 5 años. Como parte del examen se requieren dos tipos de pruebas independientes :

- prueba de impedancia del circuito de tierra. Se dispone de instrumentos de prueba comerciales para este propósito.
- prueba de funcionamiento de todos los interruptores de corriente residual existentes en la instalación. Esta prueba debe ser independiente del botón de ensayo incorporado en el interruptor.

- **Fábricas**. Debe mantenerse un registro detallado de cada examen. El examinador debe revisar que el sistema de tierra existente cumpla con la reglamentación vigente. Además se requieren las siguientes pruebas para el sistema de tierra :

  - Una prueba de impedancia del circuito de prueba.
  - Una prueba de funcionamiento de todos los interruptores de corriente residual.
  - Una prueba de conexión de todas las partes metálicas ajenas al sistemas eléctrico, es decir, tableros metálicos, gabinetes de control, distribuidores automáticos, etc. Esta prueba se realiza usando un Ohmetro para medida de baja resistencia (micro-Ohmetro), entre el terminal de tierra del cliente y todas las partes metálicas respectivas.

- Medida de resistencia del electrodo de tierra, si la instalación tiene su propio electrodo de tierra independiente; y comparar con su valor de diseño. Esto puede significar aislar el electrodo de tierra y puede por lo tanto requerir que se desconecte la energía durante el período de prueba.

- **Instalaciones con protección contra descarga de rayo.** Se recomienda que el examen se realice confrontando con una norma relativa al tema. Incluye una inspección muy rigurosa, para asegurar que la instalación cumple con la reglamentación vigente, y la prueba de resistencia a tierra del electrodo. Esto significa previamente aislar el electrodo de los conductores de bajada del sistema de protección contra rayos. Existen instrumentos de medida de impedancia del tipo tenaza que no requieren desconectar el electrodo . El valor medido de resistencia a tierra del electrodo debe compararse con el valor de diseño, o aquél obtenido durante la prueba anterior.

- **Subestaciones de distribución industriales o de la compañía eléctrica.** El examen se realiza menos frecuentemente - típicamente una vez cada 5 ó 6 años. Se recomienda una inspección muy rigurosa, removiendo cubiertas, etc., donde sea apropiado. Particularmente se requiere que el examinador revise que estén de acuerdo a norma las conexiones de todas las partes metálicas normalmente accesibles, estanques de transformadores, de interruptores, puertas de acero, rejas de acero, etc.

Las siguientes pruebas se realizan típicamente, con el equipo normalmente en servicio (debe usarse un procedimiento especial para resguardarse de posibles voltajes excesivos que ocurran durante la prueba):

- Prueba de conexión entre el electrodo de tierra y partes metálicas normalmente accesibles.
- Recorrido del electrodo enterrado y examen de éste en algunos sitios para asegurar que no ha sufrido corrosión.
- Se mide la resistencia del electrodo del lado de alta tensión y se compara con valores previos o de diseño.
- Se revisa el valor del índice de acidez pH del suelo.
- Una prueba de grado de separación, para asegurarse que el electrodo de alta tensión y el electrodo de baja tensión están eléctricamente separados. Esta prueba no se requiere si las condiciones de diseño permiten conectar ambos sistemas de electrodos.

## 7. MEDICION DE LA IMPEDANCIA DE ELECTRODOS DE TIERRA

La medida del valor óhmico de un electrodo enterrado se realiza por dos razones:

- Confrontar su valor, posteriormente a la instalación y previo a la conexión del equipo, contra las especificaciones de diseño.

- Como parte del mantenimiento de rutina, para confirmar que su valor no ha aumentado sustancialmente respecto del valor medido originalmente o de su valor de diseño.

El método más común para medir el valor de resistencia a tierra de electrodos de pequeño o mediano tamaño, se conoce como el método de “caída de potencial”. En este caso es normalmente suficiente un medidor portátil de resistencia a tierra, también usado para medida de resistividad de terreno, con dos terminales de potencial, P1 y P2 y dos terminales de corriente, C1 y C2.

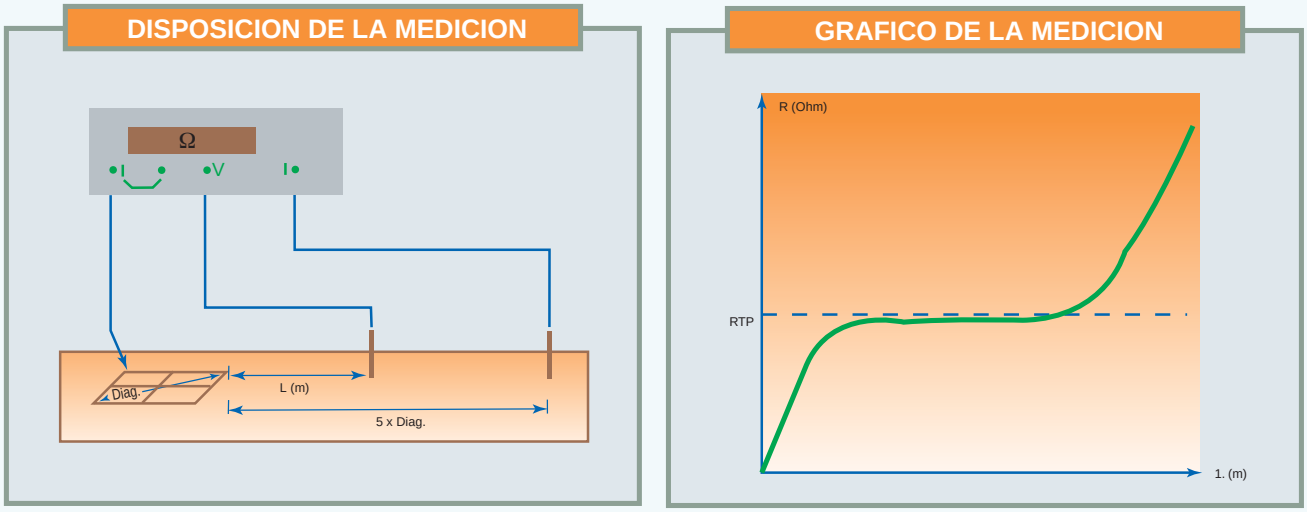



**Figura 18**
*Medida de resistencia de puesta a tierra*

Para sistemas de electrodos de gran área, se requiere normalmente un equipo más sofisticado.

Para la medida de resistencia de puesta a tierra, de preferencia la instalación debe estar desenergizada y el electrodo de tierra desconectado del sistema eléctrico. Si no fuese así, mientras se desarrolla la prueba podría ocurrir una falla a tierra que involucre a la instalación y a su electrodo de tierra y tanto el potencial del electrodo como el potencial del terreno entorno del electrodo se elevarán, provocando una diferencia de potencial posiblemente peligrosa para las personas que participan en la prueba. De no ser posible la desenergización total de la instalación y la desconexión completa del electrodo de tierra, debe seguirse un procedimiento de seguridad rigurosamente organizado, que contemple los siguientes aspectos:

- Una persona a cargo del trabajo.
- Comunicación entre todos quienes participan en la prueba, vía radio o teléfono portátil.
- Uso de guantes de goma y calzado adecuado.
- Uso de doble interruptor con aislación apropiada, a través del cual se conectan los cables al instrumento.
- Uso de una placa metálica para asegurar una equipotencial en la posición de trabajo. La placa debiera ser lo suficientemente grande para incluir al instrumento, al interruptor y al operador durante la prueba.

Debiera tener un terminal instalado, de modo que la placa pueda conectarse al electrodo.

- Suspensión de la prueba durante una tormenta eléctrica u otras condiciones severas de tiempo.

Las causas de error más común son :

- colocar la estaca de corriente demasiado cerca del electrodo bajo prueba.

- colocar la estaca de voltaje demasiado cerca del electrodo de prueba
(la teoría indica que en terreno uniforme, basta una lectura colocando la estaca de voltaje a una distancia del electrodo en prueba igual al 61,8 % de la distancia entre éste y el electrodo de corriente)

- no considerar metales enterrados que se ubican paralelos a la dirección de prueba,

- usar cable con la aislación dañada.

## 8. COMPORTAMIENTO DE ELECTRODOS DE TIERRA

El diseñador de un sistema de puesta a tierra se enfrenta normalmente con dos tareas :

- lograr un valor requerido de impedancia
- asegurar que los voltajes de paso y contacto son satisfactorios.

Los factores que influencian la impedancia son :

- Las dimensiones físicas y atributos del sistema de electrodos de tierra.
- Las condiciones del suelo (composición, contenido de agua, etc.).

El sistema de electrodos metálicos presenta una impedancia al flujo de corriente que consiste de tres partes principales. Estas son la resistividad del material del electrodo, la resistividad de contacto entre el electrodo y el terreno y finalmente una resistividad dependiente de las características del terreno mismo. Esta última normalmente es la más significativa.

### 8.1. Efecto de incremento de la profundidad de enterramiento de una barra vertical en suelo uniforme

La Figura 19 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando la longitud de la barra enterrada. Se observa que el mejoramiento por unidad de longitud disminuye a medida que la barra aumenta.

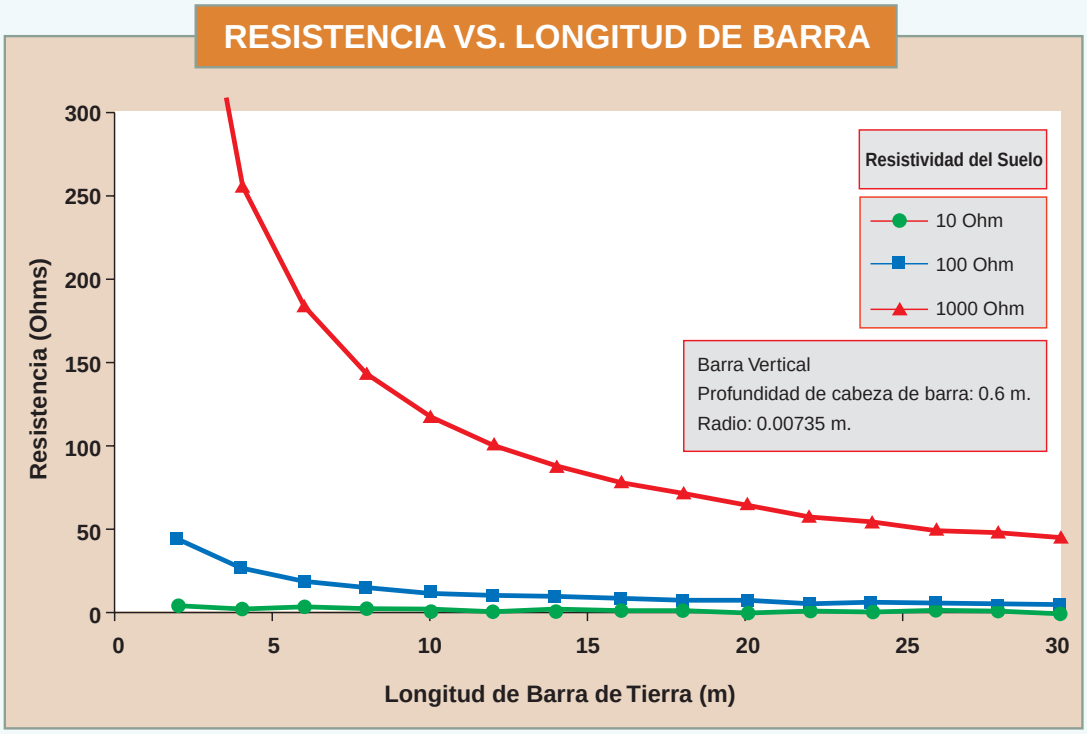



**Figura 19**
*Resistencia vs Longitud de barra*

El decrecimiento en resistencia obtenido con una barra larga puede ser considerable en condiciones de suelo no uniforme. En la figura siguiente, las capas superiores son de resistividad relativamente alta hasta una profundidad de seis metros. La resistencia de la barra es alta hasta que su longitud supera estas capas, debido a la alta resistividad del suelo que la rodea.

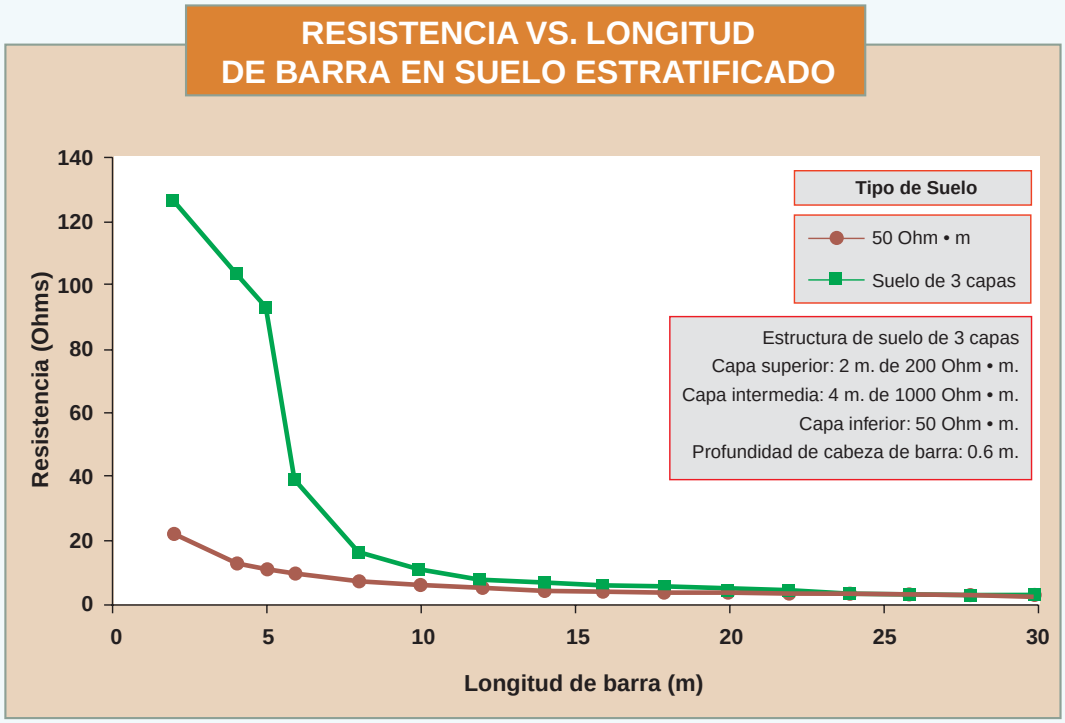



**Figura 20**
*Resistencia vs Longitud de barra en suelo estratificado*

Las barras verticales otorgan un grado de estabilidad a la impedancia del sistema de puesta a tierra: la impedancia será menos influenciada por variaciones estacionales en el contenido de humedad y temperatura del suelo.

### 8.2. Efecto de un incremento de longitud de un conductor horizontal

La figura 21 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando la longitud de un electrodo de tierra tendido horizontalmente a una profundidad de 0,6 metros.

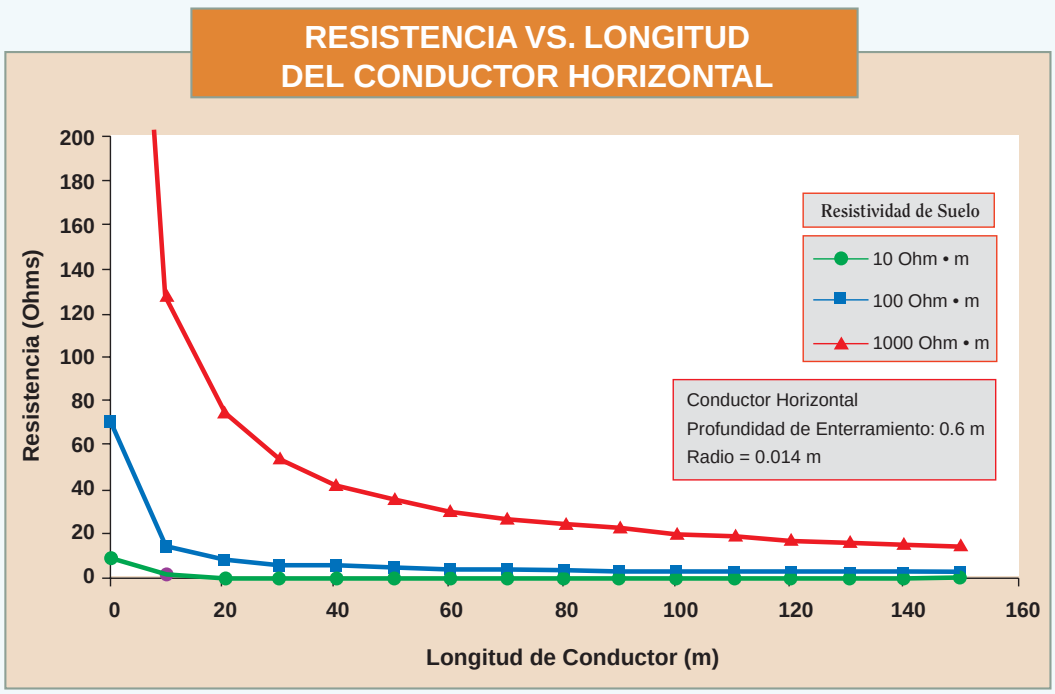



**Figura 21**
*Resistencia vs longitud de conductor horizontal.*

Una cinta tendida horizontalmente se considera generalmente una buena opción, particularmente cuando es posible encaminarla en diferentes direcciones. Para aplicaciones en alta frecuencia, incrementar de esta manera el número de caminos disponibles reduce significativamente la impedancia de onda.

### 8.3. Efecto de incremento de la longitud del lado de una malla de tierra cuadrada

La Figura muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando el área abarcada por un electrodo cuadrado. A pesar de que el mejoramiento por unidad de área disminuye, la reducción en resistencia resulta aún significativa. En realidad ésta es frecuentemente la forma más efectiva para reducir la resistividad de un electrodo de tierra.

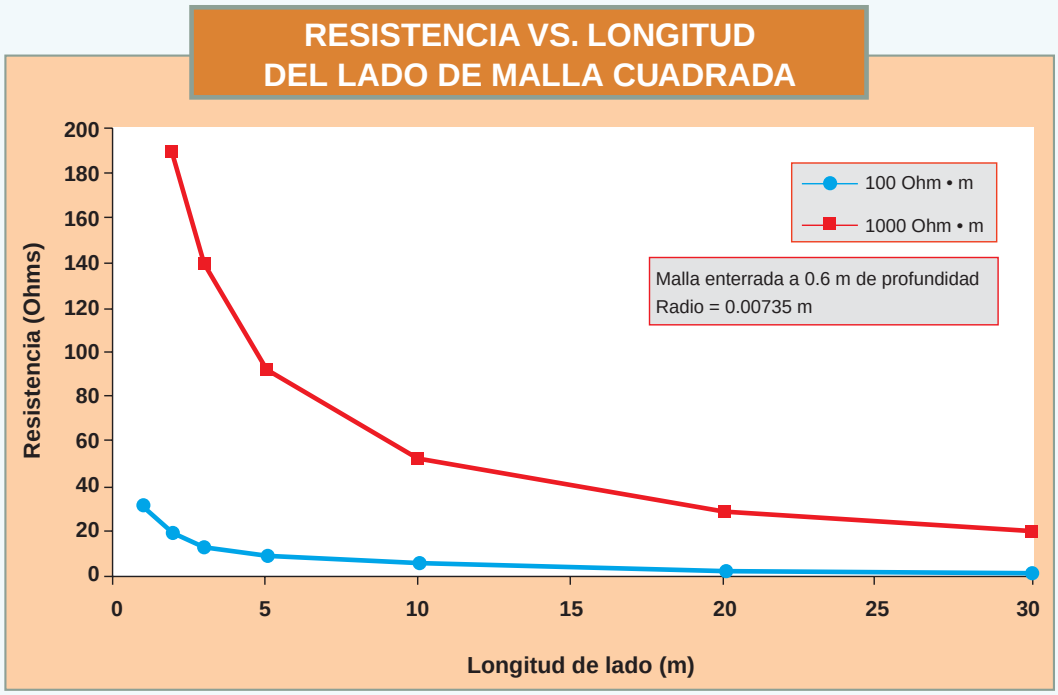



**Figura 22**
*Resistividad vs Longitud de lado de un cuadrado*

### 8.4. Efecto de aumento del radio de un electrodo de sección circular

Normalmente se gana poco en reducción de resistencia de puesta a tierra, aumentando el radio de electrodos por sobre lo necesario de acuerdo a los requisitos mecánicos y por corrosión .

### 8.5. Efecto de profundidad de enterramiento

Este efecto proporciona sólo una reducción marginal en la impedancia, pero a un costo relativamente alto, de modo que normalmente no se considera. Debe recordarse sin embargo, que mientras mayor sea la profundidad de enterramiento, menores son los gradientes de voltaje en la superficie del suelo.

### 8.6. Efecto de proximidad de electrodos

Si dos electrodos de tierra se instalan juntos, entonces sus zonas de influencia se traslapan y no se logra el máximo beneficio posible. En realidad, si dos barras o electrodos horizontales están muy próximos, la impedancia a tierra combinada de ambos puede ser virtualmente la misma que de uno solo, lo cual significa que el segundo es redundante. El espaciamiento, la ubicación y las características del terreno son los factores dominantes en ésto.