

**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.**

**ESCUELA DE FORMACION DE TECNOLOGOS**

**ELABORACION DE UN MANUAL PARA EL  
DISEÑO Y MANTENIMIENTO DE MALLAS DE  
PUESTA A TIERRA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TITULO DE TECNOLOGO EN  
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**CARLOS EUGENIO CANGO ANDRANGO  
CARLOS ADRIÁN PICHOGAGÓN PULAMARÍN**

**Carlitos\_cc00@hotmail.com  
C\_adries@hotmail.com**

**DIRECTOR: ING. MARCO TORRES**  
**maratorna@hotmail.com**

**Quito, Enero 2009**

## DECLARACIÓN

Nosotros, **CARLOS EUGENIO CANGO ANDRANGO Y CARLOS ADRIÁN PICHOGAGÓN PULAMARÍN**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra auditoria; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

-----  
Carlos Cango A.

-----  
Carlos Pichogagón P.

## **CERTIFICACIÓN.**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **CARLOS EUGENIO CANGO ANDRANGO Y CARLOS ADRIÁN PICHOGAGÓN PULAMARÍN**, bajo mi supervisión.

-----  
ING. MARCO TORRES  
DIRECTOR DE PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestros mas sinceros agradecimientos a todos quienes de una u otra manera colaboraron con la obtención de este sueño, a nuestras familias que han sido un apoyo constante, a nuestros padres que confiaron en nosotros y nos brindaron su desinteresada ayuda, de manera especial al ING. Marco Torres por su acertada dirección, y sobretodo a Dios por estar con nosotros a cada momento y darnos fortaleza para seguir adelante.

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres, en especial a mi adorada madre que es un angel guardián y por quien ahora estoy aquí por que supo guiarme con su corazón, educarme con cariño y mucha paciencia y aunque a veces no lo podía ver, sentía su presencia como un abrigo en mi corazón, también a las personas que me apoyaron y creyeron en mi siempre aunque no estuvieron a mi lado este sueño por ustedes.

Carlos Cango A

## DEDICATORIA

Antes que nada agradezco a Dios por la fuerza y sabiduría que me supo regalar en todo este trayecto de la vida además por los padres, hermano y todas las personas que el puso en mi camino para bien y para mal.

A mis padres Carlos y Aurora por todo el apoyo brindado, por sus consejos y regaños que a lo largo de mi vida han ido formándome.

A mi hermano y amigo David por sus palabras de aliento y confianza en momentos en cuando mas lo necesite.

A mi abuelita Sara por sus enseñanzas de vida y de amor hacia mi prójimo.

A todas las personas que me ayudaron a salir adelante en cada momento de mi vida gracias por sus apoyo y comprensión.

Y a mis compañeros y amigos de carrera que a lo largo de mi vida politécnica supieron convertirse en mi familia cuando estuve lejos de mi vida.

Adrian Pichogagon

*“El fracaso jamás me alcanzara si mi determinación de triunfar es lo  
suficientemente fuerte ”*

# INDICE

## CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN A LAS PROTECCIONES DE PUESTA A TIERRA.

	Pag.
1.1	Mallas de puesta a tierra.....1
1.1.1	Tipos de mallas.....3
1.2	Objetivos de mallas de puesta a tierra.....4
1.3	Sistemas y equipos que conforman la malla de tierra.....5
1.3.1	Tomas de tierra.....6
1.3.1.1	Electrodos.....6
1.3.1.2	Comportamientos del electrodo de puesta a tierra.....11
1.3.1.2.1	Efecto de incremento de la profundidad de enterramiento de una barra vertical en suelo uniforme.....11
1.3.1.3	Efecto de un incremento de longitud de un conductor horizontal.....13
1.3.1.4	Efecto de incremento de la longitud del lado de una malla de tierra cuadrada.....13
1.3.1.5	Efecto de aumento del radio de un electrodo de sección circular....14
1.3.1.6	Efecto de profundidad de enterramiento.....14
1.3.1.7	Efecto de proximidad de electrodos.....14
1.3.1.8	Calibre del conductor de puesta a tierra de los equipos eléctricos...15
1.3.2	Anillos de enlace con tierra.....16
1.3.3	Punto de puesta a tierra.....17
1.3.4	Líneas principales de tierra.....17
1.3.5	Relleno.....18
1.4	Aplicaciones de las mallas de puesta a tierra.....20
1.4.1	Mallas de puesta a tierra para hospitales.....20
1.4.1.1	Consecuencias de no tener una puesta a tierra.....22
1.4.1.2	Ruido eléctrico.....22
1.4.1.3	Corrientes espúreas.....22
1.4.1.4	Exigencias de las puestas a tierra.....23
1.4.1.5	Excepciones.....26
1.4.1.6	Tomacorrientes con terminal de puesta a tierra aislado.....26
1.4.1.7	Camino efectivo de la puesta a tierra.....26
1.4.2	Sistemas de tierras para electrónica.....26
1.4.3	Sistemas de tierras para fuerza.....27
1.4.4	Sistemas de tierra en pararrayos.....28
1.4.5	Sistema de tierras para señales electromagnéticas y cargas estáticas.....28

## CAPÍTULO 2: CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

2.1	Resistencias de mallas de puesta a tierra.....30
2.2	Resistencia del suelo.....31
2.3	Medición de la resistividad del suelo.....35
2.3.1	Método WENNER.....36
2.3.2	Método de SCHLUMBERGER.....38
2.3.3	Perfil de resistividad.....39
2.3.3.1	Datos de resistividad de suelos típicos.....39

2.3.3.2	Ejemplos de perfiles de resistividad.....	40
2.3.4	Métodos para la reducción de la resistencia eléctrica.....	42
2.3.4.1	El aumento del número de electrodos en paralelo.....	42
2.3.4.2	El aumento de la longitud y el diámetro de los electrodos.....	43
2.3.4.3	El aumento de la distancia entre ejes de los electrodos.....	44
2.3.4.4	Cambio de terreno.....	44
2.3.4.5	Tratamiento químico del suelo.....	45
2.3.4.5.1	Tipos de tratamiento químico.....	46
2.3.4.5.2	Características principales de los tratamientos químicos.....	46
2.4	Voltajes de Toque.....	49
2.5	Voltajes de Paso.....	51

### **CAPÍTULO 3: CALCULO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA.**

3.1	Método de calculo.....	54
3.1.2	La corriente de cortocircuito.....	54
3.1.2	Corriente total o máxima a evacuar hacia tierra.....	55
3.1.3	Sección de cobre de cable o pletina.....	55
3.1.4	Largo “teórico” aproximado de los conductores de la malla, asumiendo que toda la icc es dispersada por ella.....	56
3.1.5	Resistencia de la malla (rm) Sólo con cables de cobre.....	56
3.1.6	Resistencia de la jabalina (rj).....	57
3.1.7	Corriente dispersada por la malla propuesta: im.....	57
3.1.8	Número de jabalinas necesarias (n).....	58
3.1.9	Distribución de la corriente evacuada en conjunto (parte por malla y parte por jabalinas).....	58
3.1.10	Verificación de la tensión de contacto máxima exigida en proyecto (del orden de 125v).....	59
3.1.11	Verificación de la tensión de paso (up) máxima exigida en proyecto (del orden de 125 volt/metro).....	60
3.1.12	Especificaciones técnicas constructivas.....	60
3.2	Diseño de una malla a tierra.....	61
3.2.1	Selección del conductor de la malla.....	61
3.2.2	Tensiones reales de paso y de contacto.....	62
3.2.3	Determinación de los coeficientes km, ki, ks.....	63
3.2.4	Valor de la resistencia de puestas a tierra.....	64
3.2.4.1	Método de LAURENT y NIEMANN.....	64
3.2.4.2	Método de DWIGHT.....	65
3.2.5	Cálculo del número de varillas de puestas a tierra verticales.....	67
3.2.5.1	Cálculo de la resistencia de una varilla.....	68
3.2.5.2	Número mínimo de varillas.....	68
3.2.6	Otras consideraciones.....	69
3.3.	Programa computacional del diseño de mallas de puesta a tierra.....	70
3.3.1	Descripción del programa.....	71



## **CAPÍTULO 4: MANTENIMIENTO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA.**

4.1	Mantenimiento de mallas de puesta a tierra.....	74
4.2	Mantenimiento de puestas a tierra según su instalación.....	74
4.2.1	Instalaciones domésticas y comerciales.....	74
4.2.2	Subestaciones de distribuciones industriales o de la compañía eléctrica.....	75
4.2.3	Subestaciones principales de compañías eléctricas.....	75
4.2.4	Instalaciones domésticas y comerciales.....	75
4.2.5	Fábricas.....	75
4.2.6	Instalaciones con protección contra descarga de rayo.....	76
4.2.7	Subestaciones de distribución industrial o de la compañía eléctrica.....	76
4.3	Medición de la impedancia de electrodos de tierra.....	77
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>78</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>79</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>		<b>80</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>81</b>

# INTRODUCCIÓN

En Ecuador, el sector eléctrico, es un importante generador de nuevas actividades, inversiones, tecnología y empleo directo para miles de personas, porque constituye una de las principales ramas que gracias a sus diferentes aplicaciones, proyectos y demás, incentiva el desarrollo tecnológico y por ende una mejora sustancial de proceso y productos.

La rama de la electricidad abre varias posibilidades de estudios, análisis y proyectos industriales, el hombre desde el descubrimiento de la electricidad ha buscado llegar con este a todos los lugares del mundo y así llevar tecnología, y por esto a buscado nuevas formas de generación o producción de la misma, pero así mismo ha buscado las mejores formas para proteger los sistemas eléctricos y es por esto que nuestro objetivo es elaborar un manual que permita tener una visión más amplia, completa, actualizada y total de las protecciones de puesta a tierra. Los objetivos que se desea conseguir con nuestro proyecto, clarifican detalladamente la importancia de la elaboración de este manual que constituye una valiosa herramienta como base para el diseño de protecciones de puesta a tierra.

La importancia de las protecciones, no sólo radica en un área determinada, sino que también hay que considerar sus múltiples aplicaciones en todo tipo de industrias y sistemas eléctricos.

En todos los países día a día se intenta crear una nuevos dispositivos eléctricos y a su vez nuevas maquinarias que poco a poco desarrollan y en otros casos facilitan nuestro trabajo y a su vez aportan al avance de la tecnología, razón por la cual las protecciones eléctricas es una actividad que exige total compromiso y un constante mejoramiento.

La información recopilada y su puesta en marcha ya sea para el dimensionamiento o revisión de protecciones ya existentes en el sector productivo o en el sector residencial, permitirán de sobremanera mejorar y

garantizar que los sistemas eléctricos estén bien protegidos, y facilitar su mejoramiento o restitución de protecciones defectuosas o inadecuadas.

Finalmente el presente proyecto servirá como: una guía no tan solo para los estudiantes ni a su vez solo para ingenieros, sino para toda persona que este vinculada directa o indirectamente con el sector eléctrico, para conocer los diferentes métodos de protecciones de puesta a tierra y su importancia, y a su vez saber aplicarlos en los diferentes sectores; su aporte para el desarrollo productivo del país y servirá también como apoyo a las empresas que aspiren a mejorar su eficiencia y productividad.

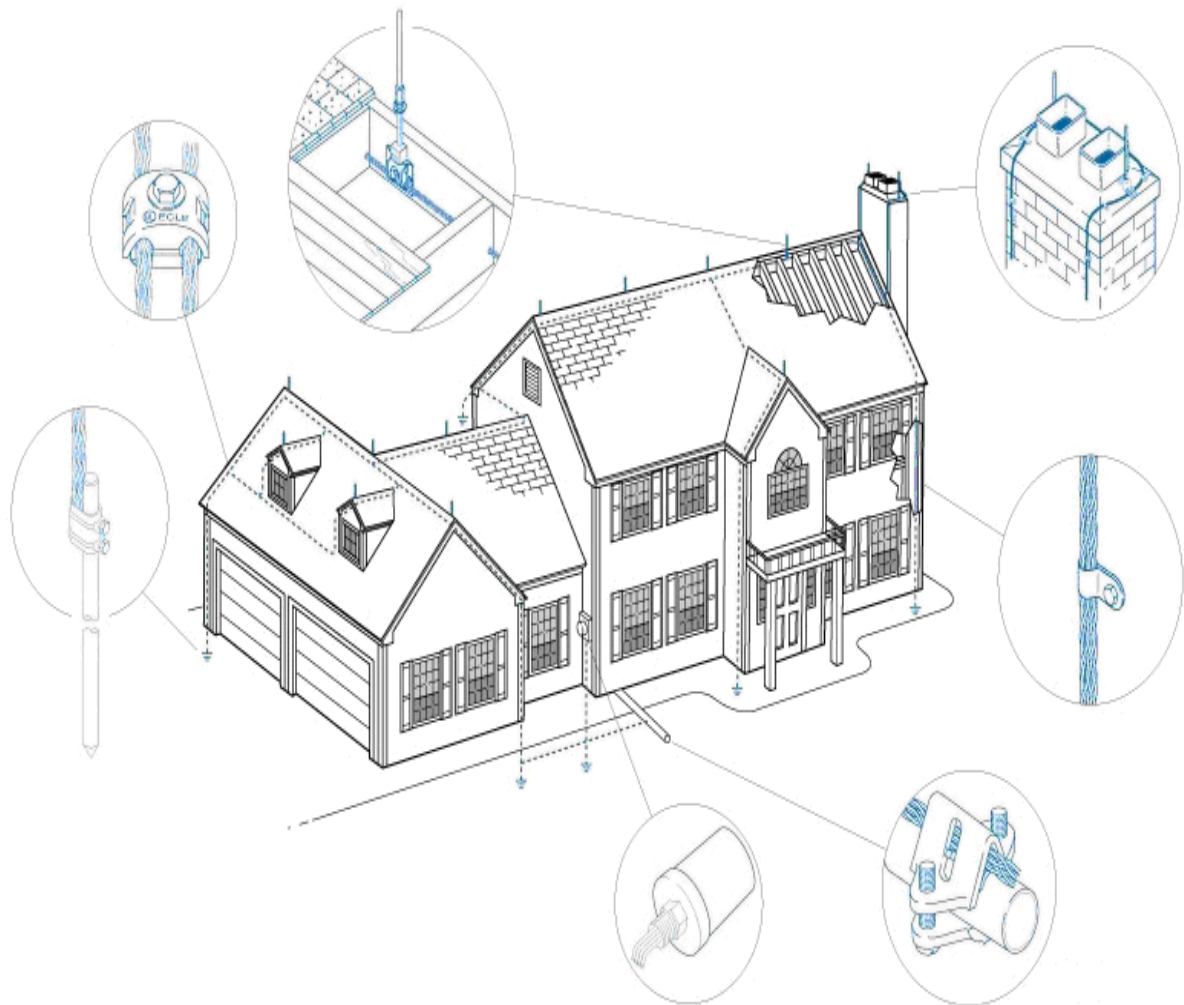
# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN A LAS PROTECCIONES DE PUESTA A TIERRA.

### 1.1. MALLAS DE PUESTA A TIERRA.

La malla de puesta tierra es un conjunto de conductores desnudos por lo general de cobre que permiten conectar los equipos que componen una instalación a un medio de referencia, en este caso la tierra.

Figura N° 1



### Protecciones contra descargas eléctricas

Tres componentes constituyen la malla de tierra, cada uno con una resistencia eléctrica

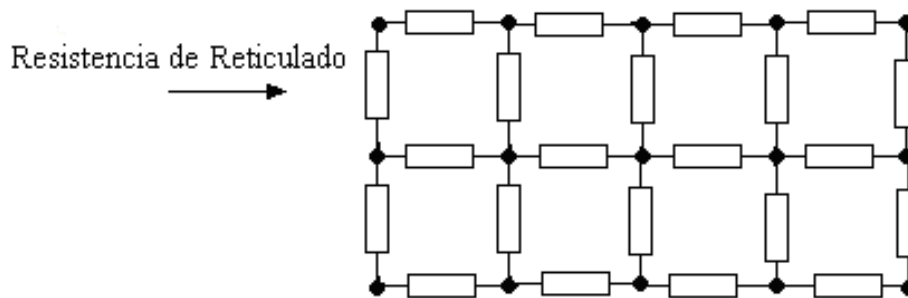
- La resistencia del conductor que conecta los equipos a la malla de tierra.
- La resistencia de contacto entre la malla y el terreno.
- La resistencia del terreno donde se ubica la malla.

Una malla de tierra puede estar formada por distintos elementos:

- Una o más barras enterradas.
- Conductores desnudos instalados horizontalmente formando diversas configuraciones.
- Un reticulado instalado en forma horizontal que puede tener o no barras conectadas en forma vertical en algunos puntos de ella.

En la figura N° 2 se muestra un esquema general de una malla de puesta a tierra.

**Figura N° 2**



Las barras verticales utilizadas en la construcción de las mallas de tierra reciben el nombre de barras copperweld y están construidas con alma de acero revestidas en cobre con un proceso de galvanoplastia con un mínimo de 6mm de revestimiento de cobre.

El valor de la resistencia de una malla de tierra depende también de la resistividad del terreno.

El método más usado para determinar la resistividad del terreno es el de **Schlumberger**<sup>1</sup>, el cual permite determinar las capas que componen el terreno, como también la profundidad y la resistividad de cada uno de ellos.

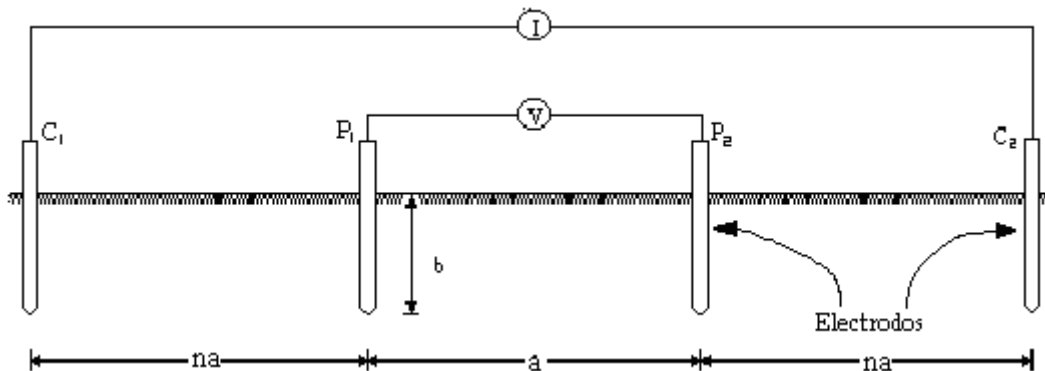
El método de Schlumberger es una modificación del método de **Wenner**<sup>2</sup>, emplea 4 electrodos, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial (a), que podrían ser picas las cuales se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos (na) de la separación base de los electrodos internos (a).

---

**Schlumberger**<sup>1</sup> .- Ver pagina 37  
**Wenner** <sup>2</sup>.- Ver pagina 35

La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la figura.

**Figura N° 3**



Con este método la resistividad esta dada por:

$$\rho := 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (n + 1) \cdot na$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad, [ohmio-metro ]

$n$  = separación de C1 y C2.

$na$  = separación de C1 y P1 ó P2 y C2.

C1, C2 = electrodos exteriores.

P1, P2 = electrodos interiores.

Un correcto diseño del sistema de puesta a tierra es fundamental para asegurar la correcta conducción de la descarga eléctrica del rayo. Para ello, debemos asegurarnos que el conjunto del sistema de puesta a tierra debe tener una resistencia menor de 10  $\Omega$ , así como asegurarnos de que no existan bucles o rizados que produzcan tensiones inducidas.

### 1.1.1 TIPOS DE MALLAS.

Las mallas de tierra se clasifican por su uso y por su voltaje.

- Mallas de alta tensión (de 460V a 22860V)
- Mallas de baja tensión (de 0V a 460V)

Ambas mallas deben estar separadas de modo que la inducción de voltajes de la malla de alta en la de baja sea de 125 V, a menos que la resistencia de cada una de ellas, en forma separada, sea inferior a 1  $\Omega$  , en este caso pueden las mallas conectarse entre sí.

La resistencia de una malla de baja tensión, según la norma editada por la Superintendencia de Servicios Eléctricos y Combustibles queda limitada como se muestra la siguiente fórmula según la Superintendencia de Servicios Eléctricos y Combustibles.

$$R = \frac{65}{2.5 \cdot I} (\Omega)$$

Donde:

65V: valor de tensión máximo a que puede quedar sometida una persona cuando sucede un cortocircuito a tierra, el cual es conocido como voltaje de toque

I: valor máximo de la corriente de falla monofásica, definida por la corriente de operación de las protecciones del circuito donde ocurre la falla.

Por Ejemplo:

Para una corriente de falla monofásica de 32 A se tiene

$$R = \frac{65}{2.5 \cdot (32)}$$

$$R = 0.81\Omega$$

## **1.2 OBJETIVOS DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA.**

Los objetivos fundamentales de una malla de tierra son:

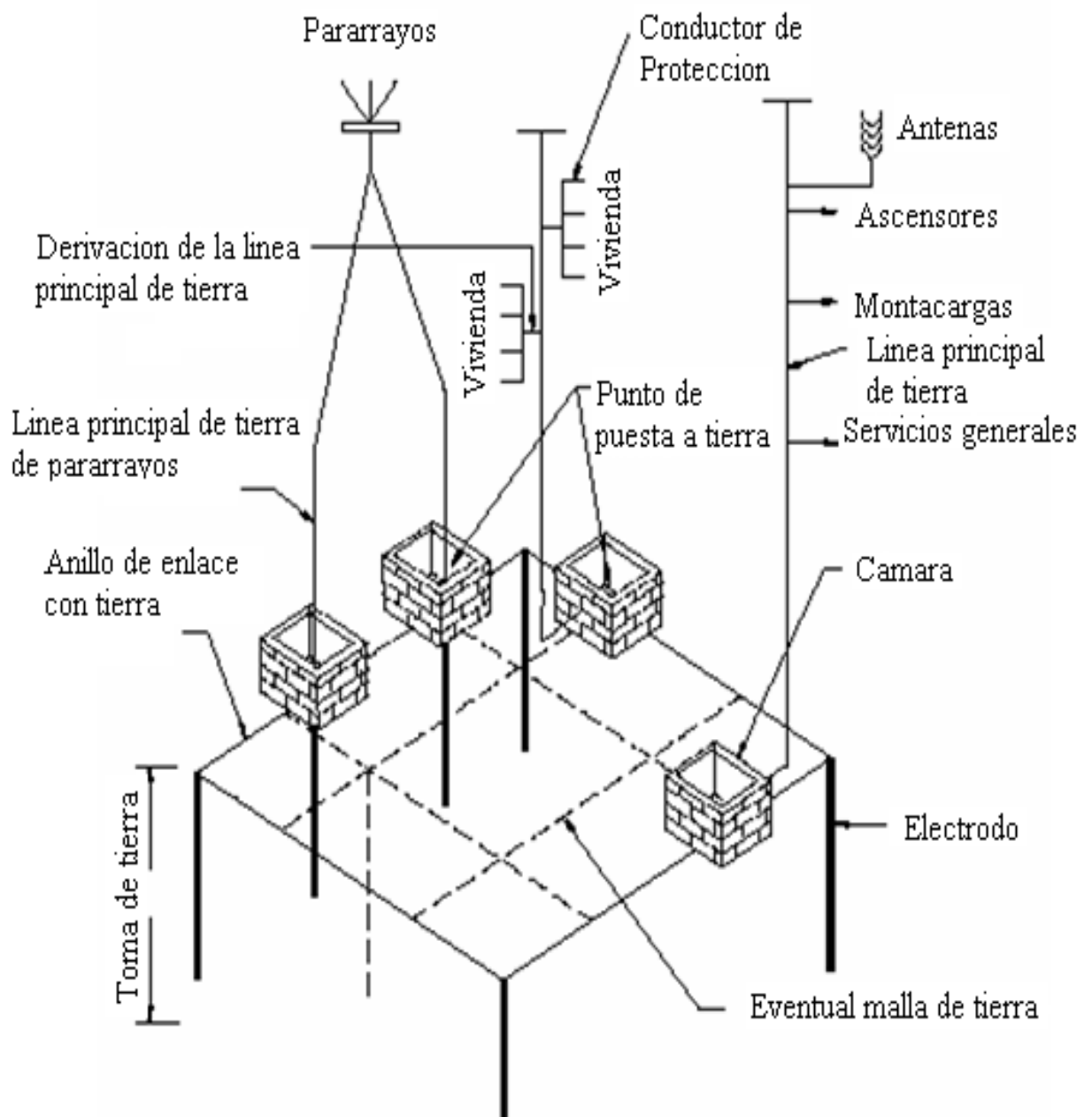
- Evitar tensiones peligrosas entre estructuras, equipos y el terreno durante cortocircuitos a tierra o en condiciones normales de operación.
- Evitar descargas eléctricas peligrosas en las personas, durante condiciones normales de funcionamiento.
- Proporcionar un camino a tierra para las corrientes inducidas. Este camino debe ser lo más corto posible.
  
- Protección para el personal operativo, autorizado o no autorizado.
- Protección a los equipos e instalaciones contra tensiones peligrosas.
- Evitar que durante la circulación de falla a tierra, se produzcan diferencias de potencial entre distintos puntos de la instalación, proporcionando para esto, un circuito de muy baja impedancia para la circulación de estas corrientes.
- Apego a normas y reglamentos públicos en vigor.

### 1.3 SISTEMAS Y EQUIPOS QUE CONFORMAN LA MALLA DE TIERRA.

El sistema de puesta a tierra consta, principalmente, de:

1. Tomas de tierra.
2. Anillos de enlaces.
3. Punto de puesta a tierra.
4. Líneas principales de tierra.
5. Relleno.

**Figura N° 4**  
**ESQUEMA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**





### **1.3.1 TOMAS DE TIERRA:**

Las tomas de tierra están formadas por los siguientes elementos:

#### **1.3.1.1 ELECTRODOS:**

Los electrodos son elementos metálicos desnudos de varios materiales que permanecen en contacto directo con el terreno.

El conductor del electrodo de puesta a tierra debe estar sin ningún empalme puede llevarse a cualquiera de los electrodos disponibles del sistema de puesta a tierra y es dimensionado según el mayor calibre requerido para todos los electrodos disponibles. Excepto en el caso de un único electrodo del [tipo varilla](#), que consiste en utilizar en las estructuras nuevas, el acero del concreto armado como electrodo principal, siempre y cuando la cimentación haya sido diseñada para este fin con los cables de tierra adecuados soldados a las varillas, el concreto tiene una estructura química ligeramente alcalina e higroscópica. La combinación de estas características provee iones libres que permiten al concreto exhibir una resistividad consistentemente de unos 30 ohm-m. Los electrodos de concreto tienen una resistencia a tierra menor o igual que las varillas de cobre de un tamaño comparable, siempre que estén en contacto con suelos con resistividad de 50 ohm-m ó menor, donde se permite que el conductor del electrodo no sea mayor de calibre 6 en cobre.

Este conductor, si es de calibre 4 ó mayor, no requiere de protección, excepto en casos donde esté expuesto a daño físico severo.

En caso de ser calibre 6 debe fijarse a la construcción o, debe correr por un tubo conduit que es una tubería galvanizada. Y, los calibres menores a 4, deben estar siempre con la protección de una tubería conduit. En el caso de las tuberías conduit, éstas deben ser eléctricamente continuas; esto es, deben estar conectadas a tierra en ambos extremos con el uso de abrazaderas. Inclusive las que cubren el cable de puesta a tierra de las acometidas residenciales.

Los electrodos estarán contruidos con materiales inalterables a la humedad y a la acción química del terreno. Por ello, se suelen usar materiales tales como el cobre, el acero galvanizado y el hierro zincado.

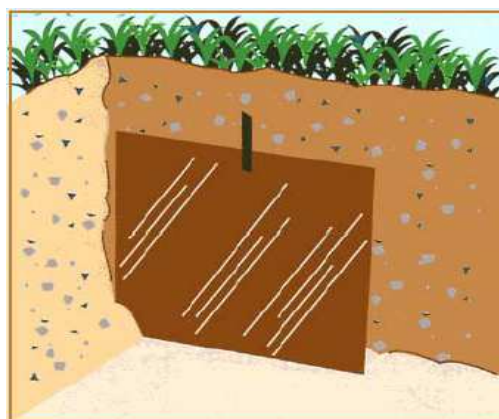
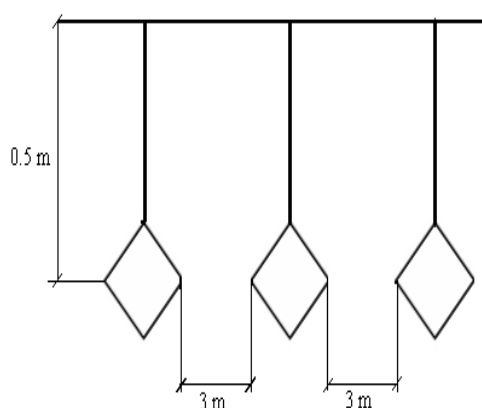
**Tabla N° 1**

Tamaño nominal del mayor conductor de entrada a la acometida o sección equivalente de conductores en paralelo mm <sup>2</sup> (AWG o kcmil)		Tamaño nominal del conductor al electrodo de tierra mm <sup>2</sup> (AWG o kcmil)	
Cobre	Aluminio	Cobre	Aluminio
33,62 (2) o menor	53,48 (1/0) o menor	8,367 (8)	13,3 (6)
42,41 o 53,48 (1 o 1/0)	67,43 o 85,01 (2/0 o 3/0)	13,3 (6)	21,15 (4)
67,43 o 85,01 (2/0 o 3/0)	4/0 o 250 kcmil	21,15 (4)	33,62 (2)
Más de 85,01 a 177,3 (3/0 a 350)	Más de 126,7 a 253,4 (250 a 500)	33,62 (2)	53,48 (1/0)
Más de 177,3 a 304,0 (350 a 600)	Más de 253,4 a 456,04 (500 a 900)I	53,48 (1/0)	85,01 (3/0)
Más de 304 a 557,38 (600 a 1100)	Más de 456,04 a 886,74 (900 a 1750)	67,43 (2/0)	107,2 (4/0)
Más de 557,38 (1100)	Más de 886,74 (1750)	85,01 (3/0)	126,7 (250)

**a) Placas:**

Serán placas de cobre o hierro con baño de zinc, de al menos 4 mm de grosor, y una superficie útil nunca inferior a 0.5 m<sup>2</sup>. Se colocarán enterradas en posición vertical, de modo que su arista superior quede, como mínimo, a 50 cm bajo la superficie del terreno. En caso de ser necesarias varias placas, están se colocarán separadas una distancia de 3 m.

**Figura N° 5**



**Placas**

**b) Picas:**

Pueden estar formadas por tubos de acero zincado de 60 mm de diámetro mínimo, o de cobre de 14 mm de diámetro, En el caso de ser necesarias varias picas, la distancia entre ellas será, al menos, igual a su longitud.

Los electrodos de varilla y tubo, no deben tener menos de 1.80 m de largo y deben instalarse de tal modo que por lo menos 1.80 m de su longitud esté en contacto con la tierra.

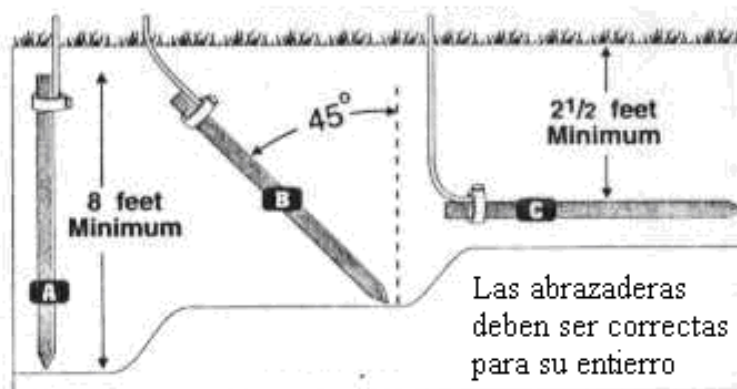
Las varillas de metales no ferrosos deben estar aprobadas y tener un diámetro no inferior a 13 mm de diámetro, y las demás de por lo menos 16 mm. Las tuberías deben tener un diámetro no inferior a 19 mm, y si son de hierro, deben tener una protección contra corrosión en su superficie.

Las varillas de acero con un recubrimiento de cobre de 10 milésimas duran un promedio de 35 años en un suelo promedio; si tiene un recubrimiento de 13 milésimas dura hasta 45 años. En cambio, una varilla de acero galvanizado tiene una vida estimada de 15 años.

Estos electrodos se aplican al suelo mediante percusión hasta que alcanzan la profundidad adecuada. En caso de terrenos rocosos, las varillas no pueden meterse de esa manera; se doblan o solamente no pueden entrar. Ocasionalmente se ha sabido de casos donde las varillas han sido regresadas hacia la superficie después de haber tratado de clavarlas en terrenos rocosos.

Cuando la roca está a menos de 2,40 m, estos electrodos pueden meterse en diagonal hasta con un ángulo de 45 grados de la vertical. Pero, si no es este el caso, se deben enterrar horizontales en una trinchera abierta para el caso a 800 mm de profundidad por lo menos.

**Figura N° 6**



**Electrodos**

La alternativa al golpeado es perforar un agujero, instalar la varilla y rellenar nuevamente el agujero, aunque no se obtiene la compactación para bajar la resistencia de contacto de la varilla golpeada.

La resistencia de contacto de una varilla está dada por la fórmula de Dwight.

$$R := \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left( \ln \left( 4 \cdot \frac{L}{r} \right) - 1 \right)$$

Donde:

$\rho$  es la resistividad del terreno medida en ohm - m.

L es el largo de la varilla en m

r es el radio de la varilla en m

La fórmula de **Dwight**<sup>3</sup> para el caso de varilla enterrada en doble capa de tierra:

$$R := \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot (\ln(a_1) - \ln(a_0)) + \frac{\rho_1}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot (\ln(4 \cdot L) - 1 - \ln(a_1))$$

Donde:

$\rho_0$  es la resistividad del terreno adjunto en ohm - m

$\rho_1$  es la resistividad del terreno circundante en ohm - m

L es el largo de la varilla en m

$a_0$  es el diámetro de la varilla en m

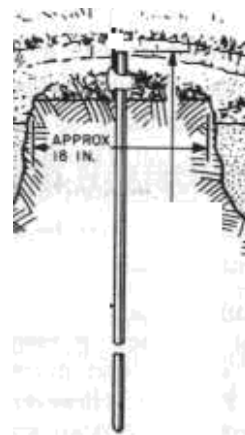
$a_1$  es el diámetro del terreno adjunto a la varilla en m

Según su estructura, los electrodos pueden ser:

### c) Conductores Enterrados:

Se usarán cables de cobre desnudo de al menos 35 mm<sup>2</sup> de sección, o cables de acero galvanizado de un mínimo de 2.5 mm de diámetro. Estos electrodos deberán enterrarse horizontalmente a una profundidad no inferior a los 50 cm.

Figura N° 7



Conductores Enterrados

#### d) Mallas Metálicas:

Formadas por electrodos simples del mismo tipo unidos entre sí y situados bajo tierra.

En todos los casos, la sección del electrodo debe ser tal que ofrezca menor resistencia que la del conductor de las líneas principales de tierra. Puesto que la resistencia del electrodo depende de su forma, de sus dimensiones y de la resistividad del terreno, podemos usar como una primera aproximación los valores de la siguiente tabla.

**Tabla Nº 2**

Naturaleza del terreno	Resistividad media, $\rho_a$ ( $\Omega \times m$ )
Terrenos cultivables fértiles y terraplenes húmedos	50
Terrenos cultivables poco fértiles y terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos y arenas secas	3000

Tipo de electrodo	Resistencia de Tierra ( $\Omega$ )
Placa vertical	$R = 0.8 \times \rho_a / P$
Pica vertical	$R = 2 \times \rho_a / L$
Conductor enterrado horizontalmente	$R = 2 \times \rho_a / L$

Donde:

$\rho_a$  = resistividad media del terreno ( $\Omega \times m$ )

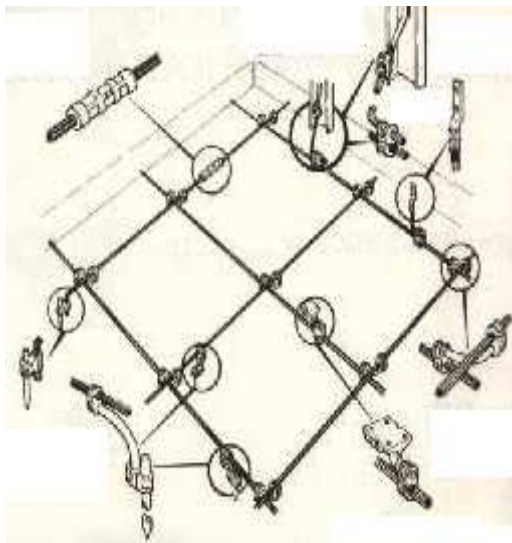
P = perímetro de la placa (m)

L = longitud de la pica o cable (m)

Como la tierra no tiene la misma resistividad en todos los puntos, pueden existir distintos potenciales entre dos placas de metal enterradas. Por eso en un sistema de protección formado por múltiples placas, conectadas entre sí mediante una malla, se pueden originar campos electromagnéticos generados por la corriente de descargas a través del pararrayos y los electrodos de la toma de tierra.

Además, con la caída de un rayo en las inmediaciones de un edificio, y fluir la corriente de descarga por la tierra, esta diferencia de potencial entre las tomas de tierra hará que por la malla circule una corriente, que puede crear campos eléctricos y magnéticos que afectarán negativamente a los aparatos electrónicos que se encuentren en el edificio. Para intentar reducir estos efectos, será necesario hacer uso de protecciones secundarias.

**Figura N° 8**



Mal  
las  
Met  
alic  
as

1.3  
.1.  
2  
CO  
MP  
OR  
TA  
MI  
EN



## **TO 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 influyen la impedancia son:

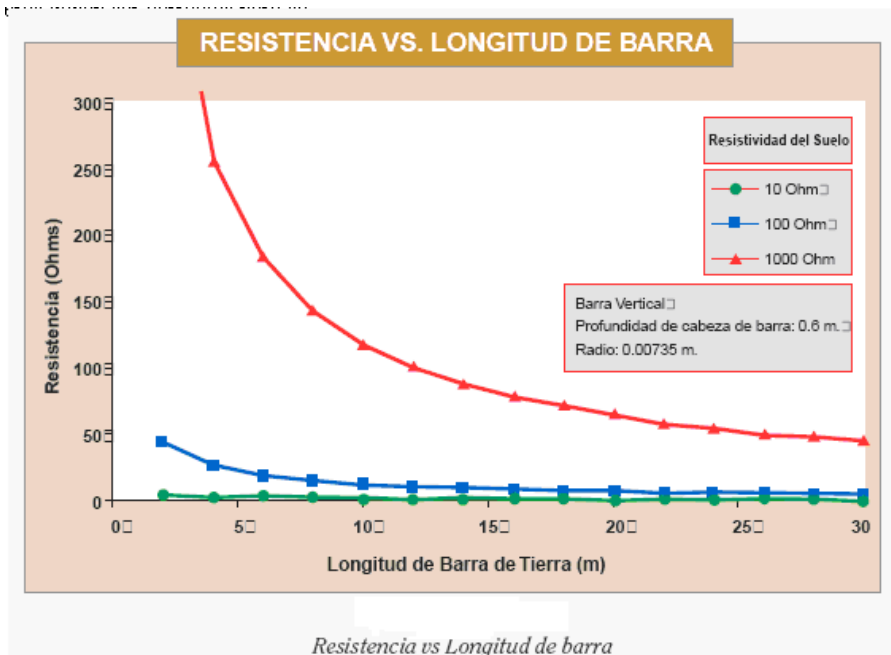
- Las dimensiones físicas y atributos del sistema de electrodos de tierra.
- Las condiciones del suelo (composición, contenido de agua, etc.).

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.

### **1.3.1.3 EFECTO DE INCREMENTO DE LA PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO DE UNA BARRA VERTICAL EN SUELO UNIFORME**

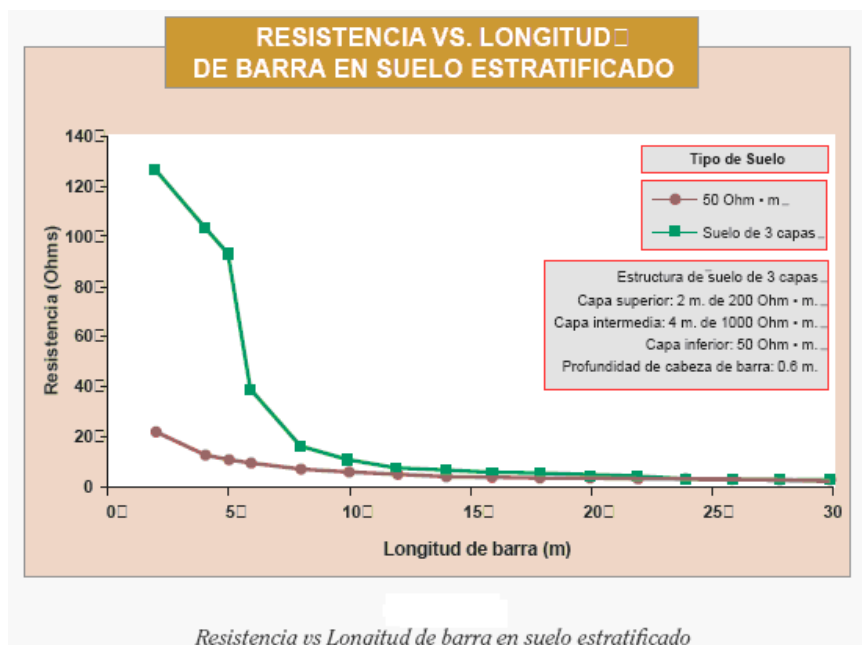
En la figura N° 9 se muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando la longitud de la barra enterrada. Se observa que el mejoramiento por unidad de longitud disminuye a medida que la barra aumenta.

**Figura N° 9**



El decrecimiento en resistencia obtenido con una barra larga puede ser considerable en condiciones de suelo no uniforme. En la figura N° 10, 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 N° 10**



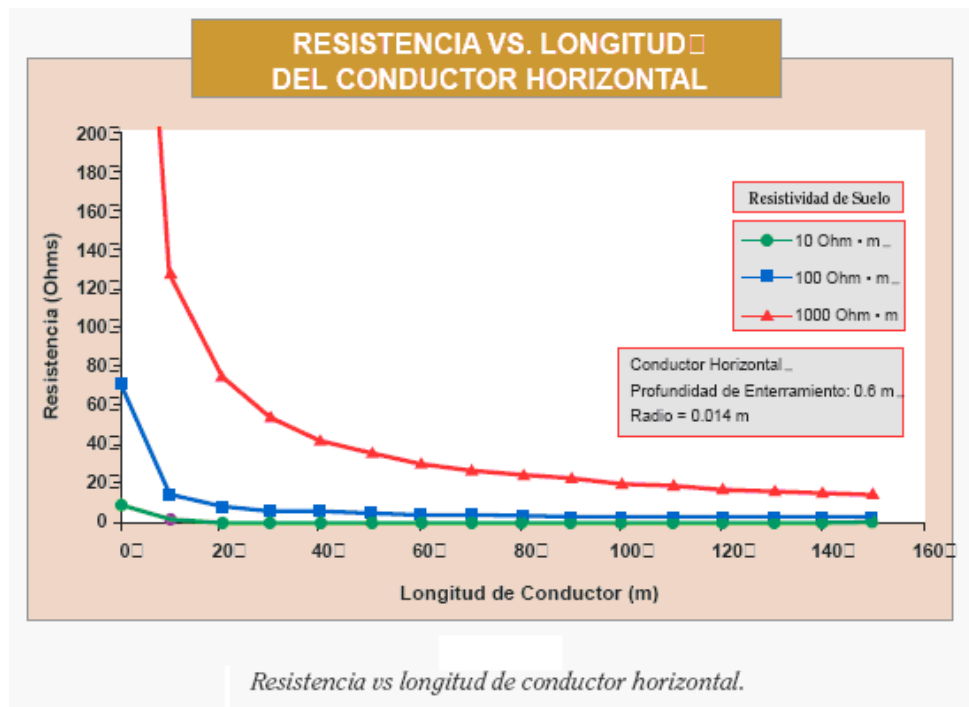
Las barras verticales otorgan un grado de estabilidad a la impedancia del sistema de puesta a tierra: la impedancia será menos influenciada por variaciones estacionales en el contenido de humedad y temperatura del suelo.



### 1.3.1.4 EFECTO DE UN INCREMENTO DE LONGITUD DE UN CONDUCTOR HORIZONTAL

En la figura N° 11 se 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 N° 11



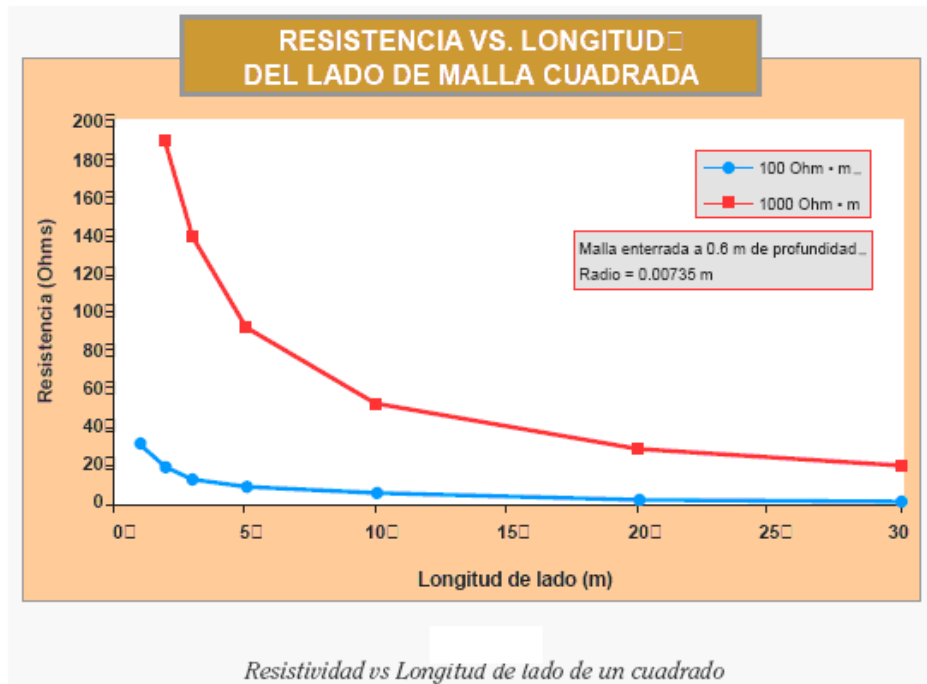
Una cinta tendida horizontalmente se considera generalmente una buena opción, particularmente cuando es posible encaminarla en diferentes direcciones. Para aplicaciones en alta frecuencia, incrementar de esta manera el número de caminos disponibles reduce significativamente la impedancia de onda.

### 1.3.1.5 EFECTO DE INCREMENTO DE LA LONGITUD DEL LADO DE UNA MALLA DE TIERRA CUADRADA

En la figura N° 12 se 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 N° 12





### 1.3.1.6 EFECTO DE AUMENTO DEL RADIO DE UN ELECTRODO DE SECCIÓN CIRCULAR:

No es muy aconsejable ya que 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.

### 1.3.1.7 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 o caídas de voltaje en la superficie del suelo.

### 1.3.1.8 EFECTO DE PROXIMIDAD DE ELECTRODOS:

Si dos electrodos de tierra se instalan juntos es decir la distancia entre ellos menor a 3m, 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 no hace nada. El espaciamiento, la ubicación y las características del terreno son los factores dominantes en esto.

### 1.3.1.9 CALIBRE DEL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS ELECTRICOS.

De acuerdo con la **NOM-001-SEDE-1999<sup>4</sup>** en su sección **{250-95}** **Tamaño nominal de los conductores de puesta a tierra de equipo**, el tamaño nominal de los conductores de puesta a tierra de equipo, de cobre o aluminio, no debe ser inferior a lo especificado en la Tabla 250-95 siguiente.

Cuando haya conductores en paralelo en varias canalizaciones o cables, como se permite en {310-4}, el conductor de puesta a tierra de equipo, cuando exista, debe estar instalado en paralelo. Cada conductor de puesta a tierra de equipo instalado en paralelo debe tener un tamaño nominal seleccionado sobre la base de la corriente eléctrica nominal del dispositivo de protección contra sobrecorriente que proteja los conductores del circuito en la canalización o cable, según la **Tabla 250-95<sup>5</sup>**.

### 1.3.2 ANILLOS DE ENLACE CON TIERRA:

El anillo de enlace con tierra está formado por un conjunto de conductores que unen entre sí los electrodos, así como con los puntos de puesta a tierra. Suelen ser de cobre de al menos 35 mm<sup>2</sup> de sección.

**Figura N° 13**



**Molde para conexión exotérmica**

Los conectores de conductores de puesta a tierra con los electrodos pueden ser del tipo de soldadura exotérmica, conectores a presión, abrazaderas u otros

**NOM-001-SEDE-1999<sup>4</sup>** .- Norma Mexicana

**Tabla 250-95. Tamaño nominal mínimo de los conductores de tierra para canalizaciones y equipos<sup>5</sup>** .- Ver anexos

medios aprobados. Y no deben tener soldaduras con materiales de puntos de baja fusión por ejemplo del estaño que tiene un punto de fusión de 232 °C o del plomo que su punto de fusión es de 328 °C para así evitar falsos contactos, ya que pierde características de seguridad la malla, si se llegara a abrir.

En nuestro país, se prefieren las conexiones exotérmicas [De marcas: Cadweld, Thermoweld, o Mexweld] para redes de tierras de subestaciones de alta potencia.

Para fabricar una conexión exotérmica no es necesaria una fuente de energía externa. Al encender una chispa sobre el polvo ignitor, se inicia una reacción química, donde el óxido de cobre es reducido por el metal aluminio produciendo cobre fundido a unos 1400 °C y escoria de aluminio. Este cobre fluye sobre los conductores soldándolos en la forma del molde de grafito, obteniendo una unión metálica sólida en unos 20 segundos. Es importante notar que una buena unión depende del ajuste del molde a los conductores.

**Figura Nº 13**



**Tipos de abrazaderas**

Las abrazaderas a usarse en sistemas de puesta a tierra deben ser adecuadas para el número y tipo de conductores a conectarse a la varilla o jabalina. Además, deben ser compatibles con los materiales de los conductores ya que si esto no es así no se lograra una buena descarga de la corriente de falla los electrodos de puesta a tierra, y cuando se usen enterradas, deben ser del tipo apropiado. Estos conectores apropiados tienen marcada la leyenda *BURIED*.

### **1.3.3 PUNTO DE PUESTA A TIERRA:**

Un punto de puesta a tierra es un punto, generalmente situado dentro de una cámara, que sirve de unión entre el anillo de enlace y las líneas principales de tierra.

#### **1.3.4 LÍNEAS PRINCIPALES DE TIERRA:**

Son los conductores que unen al pararrayos con los puntos de puesta a tierra. Por seguridad, deberá haber al menos dos trayectorias (conductores) a tierra por cada pararrayos para asegurarnos una buena conexión.

Así mismo, se deben conectar a los puntos de toma de tierra todas las tuberías metálicas de agua y gas, así como las canaletas y cubiertas metálicas que pudieran ser alcanzadas por un rayo.

Para reducir los efectos inducidos, estos conductores estarán separados un mínimo de 30 m, y cualquier parte metálica del edificio no conductora de corriente estará a un mínimo de 1.8 m

#### **1.3.5 RELLENO:**

Derramando una mezcla de sustancias químicas y de tierra armada o esparcida 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 son solubles continuarán diluyéndose progresivamente por agua de lluvia u otra causa y la resistividad del suelo entonces aumentarán, 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 por filtración a aguas subterráneas. 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 tales como anticongelantes o sustancias que tengan alto porcentaje de fosfato, nitrato.

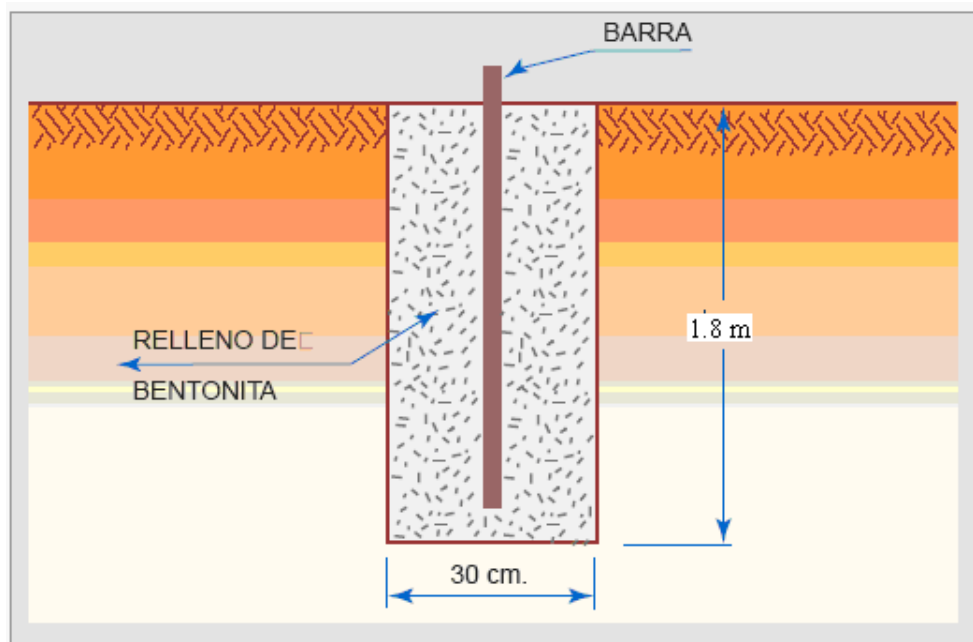
El material de relleno debe ser no-corrosivo, de un tamaño de partícula relativamente pequeño y, si fuera posible, que ayude a retener la humedad. Si el material previamente excavado es apropiado como relleno, debiera ser armada previamente y luego compactamos. El suelo debiera tener un índice de pH 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 la estructura de la malla de puesta a tierra y del tamaño del sistema de electrodos. Los materiales especiales de relleno para producir este efecto, son:

**a) 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 Nº 15**



*Tratamiento de terreno con material de baja resistividad*

**b) 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<sub>3</sub> ha causado preocupación por su impacto en estructuras de concreto y fundaciones (cimientos), ya que puede corroerlo.

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

### **c) APORTE DE SALES “GEL”.**

Existen en el mercado local, y se componen de 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 es decir de absorber y exhalar la humedad del medio que los rodea 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.

## **1.4 APLICACIONES DE LAS MALLAS DE PUESTA A TIERRA**

### **1.4.1 MALLAS DE PUESTA A TIERRA PARA HOSPITALES**

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de equipos médicos cada vez más sofisticados y sensibles, lo que implica mejorar la seguridad de los pacientes y equipos, mejorando entre otros las puestas a tierra de los mismos.

Una de las características fundamentales de un adecuado sistema de protección y puesta a tierra, es el garantizar la operación de las instalaciones dentro de los parámetros normalizados y asegurar el resguardo del personal y los equipos.

Por lo anterior los sistemas de puesta a tierra (SPT) han de ser considerados justo antes de toda ampliación ó implementación de sistemas eléctricos en general, y no solo cuando ocurren fallas.

La posibilidad de electrocución es mayor en los hospitales, por tener dos tipos

de pacientes: los que manipulan equipos eléctricos como parte de su actividad normal, cuyo valor mínimo de peligro es de 25 mA y los que están sometidos a tratamientos invasivos con catéteres al corazón, cuyo umbral es del orden de 100  $\mu$ A.

Puede considerarse que un paciente está conectado a tierra debido a la transpiración, a la posible incontinencia y al simple hecho de que se encuentra sobre una cama de armazón metálico. Por este motivo en algunos centros asistenciales se prohíbe el uso de aparatos eléctricos particulares.

Otros centros asistenciales limitan su admisión, solamente a aparatos que funcionan con pilas.

La conexión a tierra de todos los equipos eléctricos- electrónicos es requerida tanto por seguridad como punto de referencia en todo sistema de puesta a tierra.

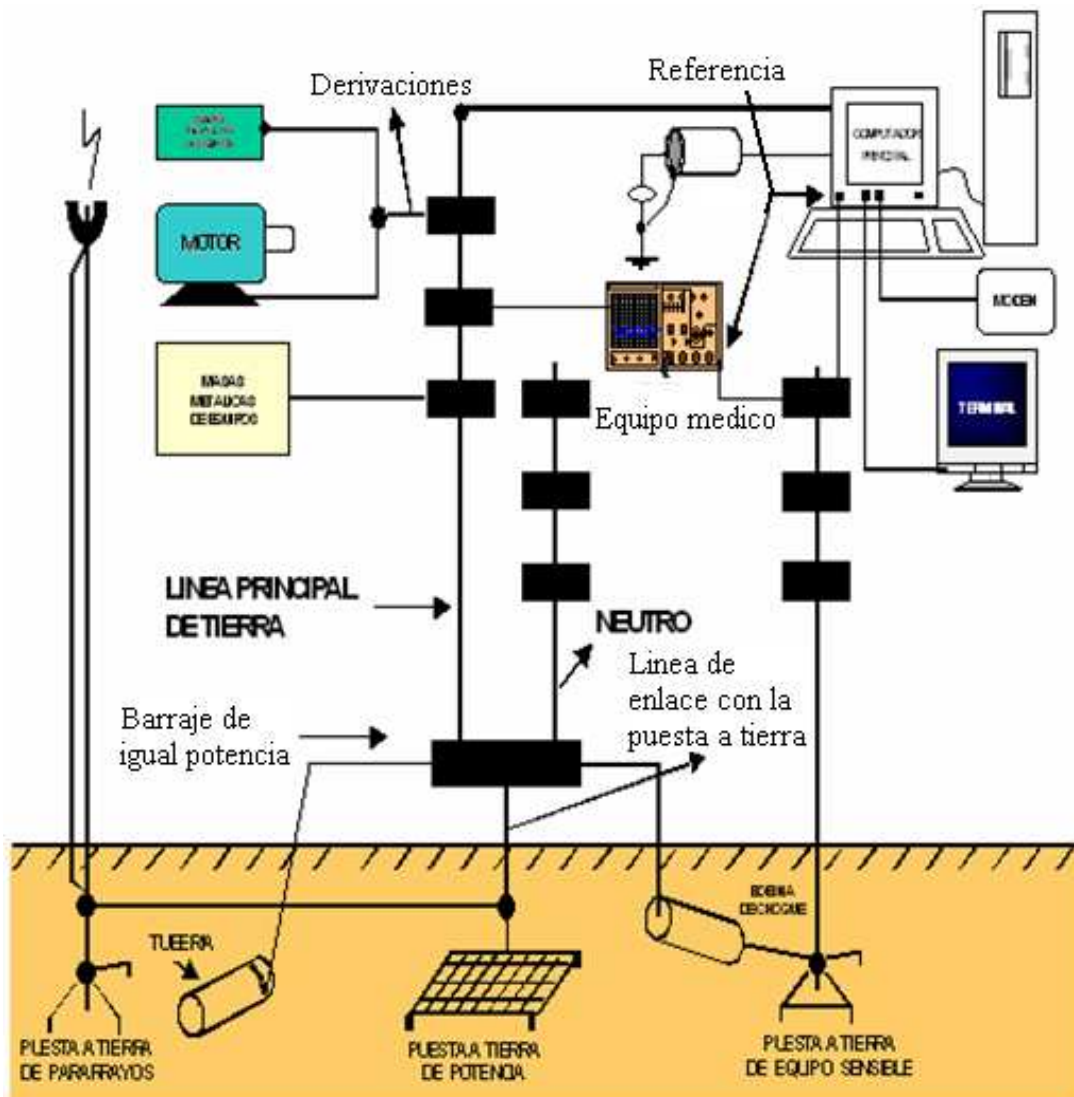
Debe existir una perfecta equipotencialidad entre todos los componentes del sistema y tierra.

Es una práctica común encontrar en los hospitales, sistemas de puesta a tierra de una referencia general aislada (varillas individuales) la cual nunca debe ser usada por la inseguridad que representa. Una adecuada conexión a tierra y equipotencialidad de los componentes del sistema garantizan una operación limpia, libre de ruidos electromagnéticos y una alta confiabilidad.

Es importante considerar que basados en la complejidad de los sistemas, las soluciones deberán ser específicas y realmente adaptadas a los requerimientos locales y características de instalación y operación. Todo esto sin olvidar las características regionales y geográficas que nos definen las condiciones de riesgo y bondades de la zona ó sector.

Los sistemas de puesta a tierra (SPT) son componentes cada vez más importantes de los sistemas eléctricos, puesto que deben permitir la conducción hacia el suelo, de corrientes eléctricas originadas por rayos, electricidad estática o fallas del sistema. En el caso de hospitales las puestas a tierra se constituyen en el verdadero y más tangible seguro de vida de los pacientes.

## DIAGRAMA DE PUESTAS A TIERRA PARA HOSPITALES.



### 1.4.1.1 CONSECUENCIAS DE NO TENER PUESTA A TIERRA

El no poseer puestas a tierra trae como consecuencia:

- ⊖ Discontinuidad en el servicio.
- ⊖ Fallas múltiples a tierra (fase- tierra; fase- fase)
- ⊖ Posibilidad de incendios por arcos
- ⊖ Hace más difícil la localización de fallas
- ⊖ Puede generar tensiones anormales
- ⊖ Sobretensiones del sistema de potencia
- ⊖ Incremento de costos
- ⊖ Quema o daño de los equipos



### 1.4.1.2 RUIDO ELÉCTRICO

El ruido eléctrico consiste en cualquier voltaje de CA, voltaje de ruido o voltaje de sobretensión que ocurre entre los conductores de tierra (cable verde) de los receptáculos de CA en diferentes partes de un edificio. Existe como resultado de la inyección de ruido en los cables de tierra, fallas de cableado o circuitos de potencia sobrecargados. Existen tres clases de ruido eléctrico a saber: de la red, intrínsecos al dispositivo (equipo) y de por interferencia.

Los tipos de ruidos los podemos clasificar por:

- ⇒ Impedancia común
- ⇒ Acople capacitivo
- ⇒ Acople magnético
- ⇒ Transitorios en las líneas de transmisión
- ⇒ Cables largos
- ⇒ Cables móviles
- ⇒ AM, FM y RF

### 1.4.1.3 CORRIENTES ESPÚREAS

Las posibles fuentes de las corrientes espúreas son:

- ⇒ Desbalance de los transformadores
- ⇒ Cables rotos
- ⇒ Aislamientos inadecuados
- ⇒ Aislamientos desgastados
- ⇒ Cortocircuitos
- ⇒ Vías electrificadas
- ⇒ Cercas electrificadas
- ⇒ Acción galvánica
- ⇒ Protecciones galvánicas
- ⇒ Tensiones inducidas
- ⇒ Circuitos de baterías
- ⇒ Rayos
- ⇒ Electricidad estática
- ⇒ Radio frecuencia

### 1.4.1.4 EXIGENCIAS DE LAS PUESTAS A TIERRA

A continuación se enuncian las más importantes exigencias que se deben tener en cuenta en las puestas a tierras hospitalarias:

- a) **Redundantes.** El principal criterio sobre tierras para hospitales que las hace diferentes a otras instalaciones es el de construirlas redundantes es decir repetirlas o lo que comúnmente se conoce como sobre proteger a los equipos.

- b) El neutro.** Debe conectarse en uno y solo un punto, en el transformador y antes de cualquier medio de desconexión o dispositivo de protección. Este punto debe ser un barraje equipotencial (BE) de cobre de 3" x ¼" x 60 cm.

A su vez la carcasa del transformador o de un equipo, el neutro y el cable principal de tierra deben estar aterrizados siempre, sin seccionamientos ni posibilidad de daño.

- c) Los electrodos de puesta a tierra.** Deben estar tan cerca como la práctica lo permita de la conexión al neutro del sistema. Preferentemente deben emplearse varillas de cobre sólido de 16mm x 1.8 ó 1.6m como mínimo, homologadas por el código eléctrico y establecido en la norma de la IEEE y enterradas verticalmente.

El conductor que une los electrodos con el BE debe ser aislado y color verde o verde- amarillo.

- d) Malla de puesta a tierra.** Debe tener por lo menos una caja de inspección de 0.3 x 0.3 m con tapa fácil de levantar de acuerdo con el diseño de dicha malla.

- e) Partes metálicas.** Las tuberías metálicas subterráneas, la estructura metálica del edificio, los apantallamientos, en el caso que los hubiera, debe unirse entre sí y conectarse al sistema de puesta a tierra (SPT) en el BE. Los ductos, las bandejas para cableado y las cajas para salidas tienen que unirse rígidamente a la fuente del sistema, si este es alimentado en forma separada.

Además Los ductos metálicos, los gabinetes, las estructuras y demás partes metálicas del equipo eléctrico, no portadoras de corriente, deben mantenerse a una distancia mayor de 1.8 m de los bajantes de pararrayos o de la distancia calculada como segura. Si no es así deberían unirse rígidamente entre sí.

- f) Corrientes espúreas o errantes.** No se debe permitir que corrientes espúreas o errantes circulen por los conductores de puesta a tierra de los equipos, sólo las corrientes de una falla a tierra deben fluir por ellos.

- g) Cables.** Los cables tipo MC y MI deben tener una pantalla o armadura metálica exterior válida como trayectoria de tierra. Con esto se busca que los circuitos parciales que alimentan las áreas de cuidado de pacientes dispongan de una trayectoria a tierra redundante a través de un ducto o

cable metálico. Esta trayectoria es adicional a la que se tiene mediante el conductor de puesta a tierra aislado.

**Figura Nº 17**



**Cables tipo MC y MI**

- h) Tomacorrientes y equipos eléctricos fijos.** En los lugares usados para el cuidado de pacientes, todos los tomacorrientes y las superficies conductoras (metálicas) de los equipos fijos, los cuales transportan corriente, pero que pueden estar energizados operando con tensión mayor a 100 voltios y que estén al alcance de las personas, deben ser puestos a tierra por medio de un conductor de cobre aislado, cuyo calibre de estar de acuerdo con la siguiente tabla, instalado junto con los conductores del circuito ramal que alimenta estos tomacorrientes o equipos.

La **tabla de capacidad nominal de protección de los conductores de cobre<sup>6</sup>** nos muestra como depende del calibre del mismo pero a su vez que al incrementar su diámetro se reduce la sobrecarga que soporta este conductor basada en un a temperatura promedio de 75 °C, Además esta tabla nos provee del numero del conductor tanto en AWG como a su vez en Kcmil. Sabiendo que a capacidad de corriente de falla es de 42.25 circular mil por cinco segundos.

- i) Equipos conectados por medio de cordón y enchufe.** Deben ser puestas a tierra las partes conductoras descubiertas, que transporten corriente, de equipos conectados por medio de cordón y enchufe, y que sean usados en áreas de cuidado de pacientes y operen con tensiones mayores a 100 V.

#### **1.4.1.5 EXCEPCIONES**

Las tapas de las salidas pueden ser puestas a tierra por medio de tornillos metálicos de montaje, los cuales fijan la tapa a la caja de salida metálica

---

**Tabla de la capacidad nominal de protección de los conductores vs calibre del mismo.<sup>6</sup> .- ver anexos**

puesta a tierra o conectadas a un dispositivo de alumbrado puesto a tierra.

#### **1.4.1.6 TOMACORRIENTES CON TERMINAL DE PUESTA A TIERRA AISLADO**

Los tomacorrientes con terminal de puesta a tierra aislada, deben ser identificados mediante un triángulo color naranja. Tal identificación debe ser visible después de su instalación.

**Nota:** *Estos tomacorrientes o los equipos alimentados de ellos no se instalarán en la vecindad del paciente dentro del área de cuidados intensivos.*

#### **1.4.1.7 CAMINO EFECTIVO DE PUESTA A TIERRA**

El camino a tierra desde circuitos, equipos y cubiertas debe:

- a) Ser permanente y continuo.
- b) Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- c) Tener suficiente capacidad de corriente para transportar con toda seguridad, cualquier corriente de falla que pueda circular por él.
- d) Tener una impedancia lo suficientemente baja para limitar el potencial respecto a tierra y asegurar el funcionamiento de los dispositivos de sobrecorriente del circuito.
- e) Evitar ruidos eléctricos.
- f) Ser resistente a la corrosión.
- g) Tener un costo lo más económico posible.

#### **1.4.2 SISTEMA DE TIERRAS PARA ELECTRÓNICA.**

Utilizado para la puesta a tierra de los equipos electrónicos y de control, consta de una serie de electrodos instalados remotamente del local de unidades de energía ininterrumpible del edificio inteligente, enlazados entre sí por medio de cobre desnudo Cal. 4/0 AWG. En el interior del local de las unidades de energía ininterrumpible del edificio inteligente, se instaló una barra de cobre electrolítico de 3.600 x 0.1016 x 0.009525 mts., montada a 2.60 mts. Sobre nivel de piso terminado con una leyenda indicativa, que es de uso exclusivo para el sistema de electrónica. Conectada a el sistema de tierras remotas mediante cable de cobre Cal. 4/0 AWG. Aislamiento THW – LS 90 °C, con marcas en los extremos y a intervalos no mayores de 3.0 color verde; a las concentraciones de tableros para cada nivel de cada módulo, los tableros para el sistema regulado de energía se conectarán con cables paralelos de calibre adecuado a la capacidad del interruptor termomagnético principal de cada tablero, de características similares al Cal. 2 AWG y dejando como preparación cocas de cable.

Dado que en este sistema no se considera la conducción a tierra de grandes corrientes de falla, para su elección se considera la resistividad existente en el terreno, el tipo de electrodo instalado y lo estipulado en la NOM-001-SEDE-1999, relativo a la sección de conductores utilizados para la puesta a tierra de

equipos, seleccionados en función de la capacidad del interruptor que protege a los circuitos en cuestión.

Como electrodo de puesta a tierra se utiliza el tipo EP - ET, marca Parres ó similar, construido de cobre electrolítico aleación 110 de contenido químico a base de magnesio, coke y sulfato de cobre con un recubrimiento plateado y 19 cm. de diámetro por 119 cm. de longitud. Este sistema debe estar completamente aislado del sistema de tierras de pararrayos y enlazado al sistema de tierras para fuerza, por medio de un puente de conexión en el edificio de distribución.

La resistencia a tierra máxima en este sistema debe ser de 2 Ohms, en el caso de no alcanzar la resistencia deseada, se instalara, algún elemento químico para reducir la resistividad del terreno y alcanzar así, la resistencia a tierra requerida.

### **1.4.3 SISTEMA DE TIERRAS PARA FUERZA.**

Utilizado para conectar a tierra todos los elementos de la instalación que en condiciones normales de operación no están sujetos a tensiones, pero que pueden tener diferencia de potencial con respecto a tierra a causa de fallas accidentales en los circuitos eléctricos, así como los puntos de la instalación eléctrica en los que es necesario establecer una conexión a tierra para dar mayor seguridad, mejor funcionamiento y regularidad en la operación y en fin, todos los elementos sujetos a corrientes eléctricas importantes de corto circuito y sobretensiones en condiciones de falla.

Este sistema consta de una serie de electrodos enlazados entre si, con un cable de cobre desnudo Cal. 4/0 AWG, de la malla del sistema de tierras se llega a el local de la subestación eléctrica principal en la planta sótano del edificio inteligente, mediante cable de cobre desnudo Cal. 4/0 AWG, a una barra de cobre electrolítico de 3.600 x 0.1016 x 0.009525 Mts., montada a 2.60 Mts. sobre nivel de piso terminado con una leyenda indicativa, que es de uso exclusivo para el sistema de fuerza. En las trincheras del local se transportara el conductor de cobre desnudo para la conexión a tierra de los elementos metálicos de la subestación. La puesta a tierra de los elementos se hará mediante cable de cobre desnudo Cal 1/0 AWG. A las concentraciones de tableros para cada nivel de cada modulo, los tableros para el sistema normal – emergencia de energía se conectaran con cables paralelos de calibre adecuado a la capacidad del interruptor termomagnético principal de cada tablero.

La resistencia a tierra en cualquier punto del sistema, no debe ser mayor a 10 Ohms. Para la conexión a tierra de los equipos, se instalarán en los edificios, una barra de cobre electrolítico de 1.500 x 0.1016 x 0.009525 Mts., montadas en todos los casos a 0.60 Mts. sobre nivel de piso terminado con una leyenda indicativa, que es de uso exclusivo para el sistema de fuerza en las concentraciones de tableros de cada nivel de cada modulo.

#### **1.4.4 SISTEMA DE TIERRAS EN PARARRAYOS.**

Como su nombre lo indica, se destina para drenar a tierra las corrientes producidas por descargas atmosféricas y se conforma con electrodos tipo copperweld, Marca Mexerico o similar y cable tipo pararrayos de cobre Clase 1, 27 hilos, Marca Condumex.

La distancia del edificio con respecto al hincado del electrodo, no debe ser menor a 2.50 Mts. y debe quedar totalmente aislado de los sistemas de tierras para fuerza y para electrónica.

La resistencia a tierra en cualquier punto del sistema, no debe ser mayor a 10 ohms, para lo cual en caso necesario, se implementarán arreglos de electrodos en Delta y/o un agregado de elementos químicos para reducir la resistividad del terreno.

#### **1.4.6 SISTEMA DE TIERRAS PARA SEÑALES ELECTROMAGNÉTICAS Y CARGAS ESTÁTICAS.**

El principio utilizado para este sistema es el de una jaula de Faraday, que es en pocas palabras un cuarto blindado contra interferencias de radiofrecuencias. Esta jaula aísla al receptor de las fuentes radiacionales y permite observar con precisión su funcionamiento con señales débiles calibradas que se generan cuidadosamente en el interior de la jaula, teniendo así un medio libre de interferencia en el cual es posible efectuar medidas a bajo nivel.

Para el blindaje de campos magnéticos, el material debe tener propiedades ferromagnéticas.

El hecho que exista una conexión de la jaula a una tierra directa no tiene el menor efecto sobre las propiedades de un blindaje.

Las características principales que deben cuidarse en la construcción de una jaula de Faraday son: La atenuación, en su valor mínimo garantizado, la gama de frecuencia protegida, el tipo de interferencias que debe blindarse, ventilación adaptabilidad para hacer modificaciones, tipo de entrada y alambrado.

En caso de ser necesario una gran atenuación, el blindaje puede constar de varias paredes que formen casquetes concéntricos aislados entre si.

Como se están considerando campos magnéticos de muy alta frecuencia y microondas se utilizara una lámina sólida perforada de acero, fija sobre un marco de madera. La construcción de la jaula de Faraday se realizara de manera que el blindaje interior y el exterior se conecten en un solo punto. A fin de reducir los efectos de antena debido a las penetraciones de elementos metálicos como grapas clavos, etc, para la fijación de las laminas en el bastidor de madera, se procura evitarlas y si es preciso se aplica soldadura para que formen una sola pieza con el blindaje, o bien la utilización de clavos de plástico de diámetro inferior a la abertura normal de la malla.

Para evitar los efectos de inducción de campo magnético por la penetración del blindaje por partes metálicas, ya sea del interior al exterior o viceversa, se utilizarán filtros en las entradas de todo alambre que penetre, incluyendo tierras, y preferiblemente se localizan cerca del punto de conexión entre el blindaje interior y exterior.

Se acostumbra emplear un transformador de aislamiento antes del filtro para tener la alimentación desconectada de la tierra y evitar accidentes a personas en el interior de la jaula

Se recomienda que se instalen entradas herméticas de doble puerta, para mantener el blindaje todo el tiempo.

Este sistema se constituye de dos o más mallas de tierras conformando un blindaje concéntrico del cuarto eléctrico localizada en la zona del site,

Todo lo expuesto anteriormente constituye a la Jaula de Faraday, que es un recinto metálico de paredes no necesariamente continuas, que constituye una pantalla eléctrica o electrostática.

Si en el interior de un conductor existieran cargas eléctricas libres, éstas serían arrastradas por el campo eléctrico en dirección perpendicular a las superficies equipotenciales, hasta alcanzar la superficie exterior del conductor. Por tanto, en un conductor en equilibrio, las cargas eléctricas libres no pueden existir más que en la superficie. Por otra parte, si en el interior de un conductor hueco no existe ninguna carga, dentro de dicho conductor el potencial correspondiente será constantemente igual al correspondiente a su superficie, y el campo eléctrico nulo. En consecuencia, bastará rodear un cuerpo con una pantalla metálica unida a tierra para que el campo en el interior sea nulo, por muy intensos que sean los campos eléctricos exteriores. De esta forma los aparatos eléctricos para medidas de precisión pueden ser protegidos contra cualquier perturbación eléctrica externa rodeándolos con una red de conductores, en forma de malla, no necesariamente muy tupida. Es fácil constatar que para recibir una emisión de radio en el interior de un vehículo, cuya carrocería es metálica, hace falta una antena exterior.

Además como un aporte el laboratorio de Alto Voltaje de la ESCUELA POLITECNICA NACIONAL cuenta con esta jaula para el aprendizaje práctico de los estudiantes.

## CAPÍTULO 2

### CONCEPTOS FUNDAMENTALES

#### 2.1 RESISTENCIA DE MALLAS DE TIERRA.

La resistencia de la malla de puesta a tierra, depende del terreno en el cual se instale, la superficie de la cubierta, la resistividad equivalente del terreno, el valor de la resistencia de los electrodos, etc.

Según Schwarz, la resistencia de una malla compuesta es:

$$R = \frac{R_1 * R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2 * R_{12}}$$

Donde

R 1: Resistencia del reticulado.

R 2: Resistencia de las barras.

R 12: Resistencia mutua entre el reticulado y las barras.

Para calcular cada una de las resistencias se utilizan las siguientes ecuaciones

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi * L_1} * \left( \ln \left( \frac{4 * L_1}{\sqrt{d * h}} \right) + K_1 * \frac{L_1}{\sqrt{A}} - K_2 \right)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi * n * L_2} * \left( \ln \left( \frac{4 * L_2}{r} \right) - 1 + \frac{2 * K_1 * L_2}{\sqrt{A}} * (\sqrt{n} - 1)^2 \right)$$

$$R_{12} = \frac{\rho}{\pi * L} * \left( \ln \left( \frac{2 * L}{l} \right) + \frac{K_1 * L}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right)$$



Donde:

d: Diámetro del conductor (m)

h: Profundidad de la malla (m)

A: Área que cubre la malla (m<sup>2</sup>)

L 1: Longitud total de los conductores de la malla (m)

L 2: Longitud de los electrodos verticales (m)

ρ: Resistividad del terreno (Ohmios)

n: Cantidad de electrodos verticales

r: Radio de los electrodos verticales (m)

l: Longitud de la barra (m)

Los factores K 1 y K 2 se calculan de acuerdo con las siguientes expresiones.

$$K_1 = 1.43 - \frac{2.3 * h}{\sqrt{L}} - 0.04 * \left( \frac{a}{b} \right)$$

$$K_2 = 5.5 - \frac{8 * h}{\sqrt{A}} + \left( 0.15 - \frac{h}{\sqrt{A}} \right) * \frac{a}{b}$$

Donde:

a: Ancho de la malla (m)

b: Largo de la malla (m)

## **2.2 RESISTENCIA DEL SUELO.**

El factor más importante de la resistencia a tierra no es el electrodo en sí, sino la resistividad del suelo mismo, por ello es requisito conocerla para calcular y diseñar la puesta a tierra de sistemas.

Se sabe por física elemental que la resistencia R de un conductor alargado y homogéneo de forma cilíndrica vale:

$$R = \rho l/s$$

donde:

R = resistencia en  $\Omega$

$\rho$  = resistividad en ( $\Omega$ -metro)

l = longitud del conductor en metros m

s = sección en metros cuadrados

La resistividad es una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado, pero igualmente se considera la facilidad de paso, resultando así el concepto de, Conductividad, que expresado numéricamente es inverso a la resistividad y se expresa en siemens-metro de modo que:

$$\sigma = 1/\rho$$

La resistividad es una de las magnitudes físicas de mayor amplitud de variación, como lo prueba el hecho de que la resistividad del poliestireno supera a la del cobre en 23 órdenes de magnitud.

Las corrientes eléctricas que nos interesan no recorren conductores lineales (hilos y cables) como en las instalaciones y aparatos eléctricos usuales, sino que se mueven en un medio tridimensional por lo que debemos estudiar las leyes físicas a las que obedecen estas corrientes.

Para hacer el problema fácilmente abordable desde el punto de vista matemático, habremos de estilizar las condiciones reales, suponiendo que el subsuelo se compone de varias zonas, dentro de cada una de las cuales la resistividad suponemos constantes separadas entre sí por superficies límite perfectamente planas. A pesar de esta simplificación, el problema es matemáticamente muy difícil y solo ha sido resuelto en casos muy sencillos.

En la **tabla de tipos de suelos** <sup>7</sup> podremos diferenciar a dichos suelos con sus respectivas resistividades

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina "Resistividad

---

**tabla de tipos de suelos** <sup>7</sup> .- ver anexos

Aparente" que para el interés de este trabajo, será conocida simplemente como "Resistividad del Terreno".

En la **NOM-022-STPS-1999<sup>8</sup>** se define el término resistividad, como la resistencia que ofrece al paso de la corriente un cubo de terreno de un metro por lado.

De acuerdo con la **NOM-008-SCFI-1993<sup>9</sup>**, Su representación dimensional debe estar expresada en Ohm-m, cuya acepción es utilizada internacionalmente.

La resistividad del terreno varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre, estando determinada por:

- a) Sales solubles
- b) Composición propia del terreno
- c) Estratigrafía
- d) Granulometría
- e) Estado higrométrico
- f) Temperatura
- g) Compactación

#### **a) SALES SOLUBLES**

La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; esto es, por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas. Como ejemplo, para valores de 1% (por peso) de sal (NaCl) o mayores, la resistividad es prácticamente la misma, pero, para valores menores de esa cantidad, la resistividad es muy alta.

#### **b) COMPOSICIÓN DEL TERRENO**

La composición del terreno depende de la naturaleza del mismo. Por ejemplo, el suelo de arcilla normal tiene una resistividad de 40 a 500 ohm-m por lo que una varilla electrodo enterrada 3 m tendrá una resistencia a tierra de 15 a 200 ohms respectivamente. En cambio, la resistividad de un terreno rocoso es de 5000 ohm-m o más alta, y tratar de conseguir una resistencia a tierra de unos 100 ohm o menos con una sola varilla electrodo es virtualmente imposible.

#### **c) ESTRATIGRAFÍA**

El terreno obviamente no es uniforme en sus capas. En los 3 m de longitud de una varilla electrodo típica, al menos se encuentran dos capas diferentes de suelos. En XX se encuentran ejemplos de diferentes perfiles de resistividad.

---

**NOM-022-STPS-1999<sup>8</sup>**.- Norma Mexicana  
**NOM-008-SCFI-1993<sup>9</sup>**.- Norma Mexicana

#### **d) GRANULOMETRÍA**

Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena y de que ésta sea mayor que la de la arcilla.

#### **e) ESTADO HIGROMÉTRICO**

El contenido de agua y la humedad influyen en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático. Como ejemplo, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de éste. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante. Y, puede tenerse el caso de que en tiempo de secas, un terreno puede tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierras. Por ello, el sistema debe ser diseñado tomando en cuenta la resistividad en el peor de los casos.

#### **f) TEMPERATURA**

A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al aproximarse a 0° C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra

#### **g) COMPACTACIÓN**

La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo. Por ello, se procurará siempre colocar los electrodos en los terrenos más compactos posibles.

### **2.3 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.**

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación, sistema electrónico, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia. Asimismo puede ser empleada para indicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas.

En general, los lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión.

En este punto es necesario aclarar que la medición de la resistividad del terreno, no es requisito para hacer una malla de puesta a tierra. Aunque para diseñar un sistema de tierras de gran tamaño, es aconsejable encontrar el área de más baja resistividad para lograr la instalación más económica.

El perfil de la resistividad del suelo determinará el valor de la resistencia a tierra y la profundidad de nuestro sistema de puesta a tierra.

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un terrómetro (llamado en otros países: telurómetro) o *Megger* de tierras de cuatro terminales.

**Figura N° 18**



*Megger* de Cuatro Terminales. Cortesía AVO International.

Los aparatos de mayor uso, de acuerdo a su principio de operación, pueden ser de 2 tipos: del tipo de compensación de equilibrio en cero y el de lectura directa.

Los terrómetros deben inyectar una corriente de frecuencia que no sea de 60 Hz para evitar se midan voltajes y corrientes que no se deban al aparato sino a ruidos eléctricos. Por ejemplo, si estamos cerca de una subestación o de una línea en servicio, y vamos a realizar mediciones de resistividad y resistencia de tierra, con un aparato de 60 Hz, dichos sistemas van a inducir corrientes por el suelo debido a los campos electromagnéticos de 60 Hz y darán una lectura errónea.

De igual manera sucede cuando los electrodos de prueba están mal conectados o tienen falsos contactos, darán señales falsas de corriente y voltaje. Si hay corrientes distintas a las que envió el aparato, éste leerá otras señales de voltaje y corriente que no son las adecuadas.

También estos aparatos de repente tienen oscilaciones en sus lecturas y no es posible leerlas.

Un aparato inteligente, lleva conductores blindados, coaxiales, tiene sistemas de filtraje, de análisis y mide lo que halla, pero esa información la analiza, la filtra y luego la deduce. Por ejemplo, para hacer una medición manda una señal de 100 Hz y mide; luego manda otra señal de 150 Hz y vuelve a medir y puede

seguir enviando otras altas frecuencias hasta que los valores van siendo similares, forma una estadística y obtiene un promedio.

Los terrómetros son analógicos o digitales y deben contener 4 carretes de cable calibre 14 AWG normalmente. Para enrollamiento rápido se recomienda construir un sistema devanador que permita reducir el tiempo de la medición. También traen 4 electrodos de material con la dureza suficiente para ser hincados en la tierra con marro. Son de una longitud aproximada de 60 cm y un diámetro de 16 mm. Además de lo anterior se hace necesario contar con una cinta no metálica de 50 m aproximadamente.

Los terrómetros tienen cuatro terminales 2 de corriente (C1, C2) y 2 de potencial (P1, P2) y están numerados en el aparato C1 P1 P2 C2. Los terrómetros deben estar certificados y probados en el campo con una resistencia antes de realizar las mediciones.

Como la medición obtenida por un terrómetro es puntual, se deben hacer mediciones en un sentido, en otro a 90 grados del primero, y, en el sentido de las diagonales. En la medición de resistividad de un terreno, es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es una práctica común de una tabla con lecturas, el eliminar los valores que estén 50% arriba o abajo del promedio aritmético de todos los valores capturados.

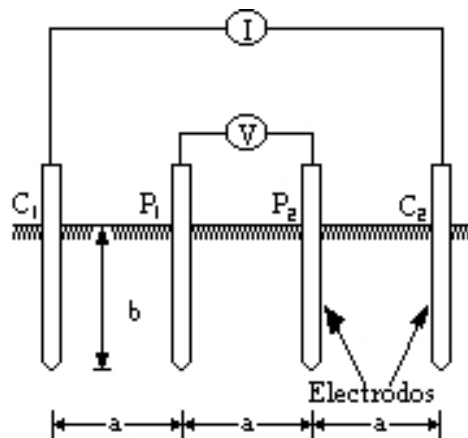
### **2.3.1 MÉTODO DE WENNER.**

En 1915, el Dr. Frank Wenner del *U.S. Bureau of Standards* desarrolló la teoría de este método de prueba, y la ecuación que lleva su nombre.

Con objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar los 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón  $V/I$  es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.

Figura N° 19



**Metodo Wenner para medir la resistividad del suelo**

En la figura anterior se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

$$\rho := \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{\left[ 1 + \frac{2 \cdot a}{(a^2 + 4b^2)^{0.5}} \right] - \frac{2 \cdot a}{(4 \cdot a^2 + 4b^2)^{0.5}}}$$

Donde

- p : Resistividad promedio a la profundidad (a) en ohm-m
- a : Distancia entre electrodos en metros.
- b : Profundidad de enterrado de los electrodos en metros
- R : Lectura del terrómetro en ohms.

Si la distancia enterrada (b) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (a). O sea  $a > 20b$ , la siguiente fórmula simplificada se puede aplicar:

$$\rho = 2 * \pi * a * R$$

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

Como ejemplo, si la distancia entre electrodos a es de 3 metros, b es 0.15 m y la lectura del instrumento es de 0.43 ohms, la resistividad promedio del terreno a una profundidad de 3 metros, es de 8.141 ohm-m según la fórmula completa y de 8.105 ohms-m según la fórmula simplificada.

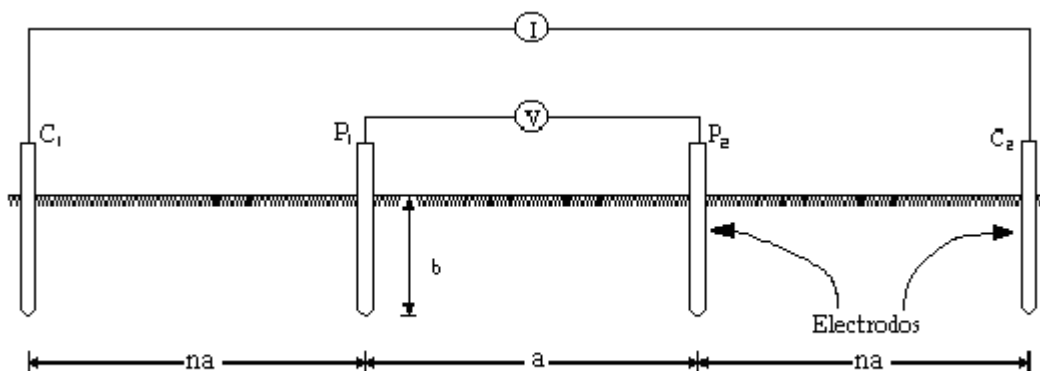
Se recomienda que se tomen lecturas en diferentes lugares y a 90 grados unas de otras para que no sean afectadas por estructuras metálicas subterráneas. Y, que con ellas se obtenga el promedio.

### 2.3.2 MÉTODO DE SCHLUMBERGER

El método de Schlumberger es una modificación del método de Wenner, ya que también emplea 4 electrodos, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial ( $a$ ) se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos ( $na$ ) de la separación base de los electrodos internos ( $a$ ).

La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la figura.

Figura N° 20



Con este método la resistividad ésta dada por:

$$\rho = 2 * \pi * R(n + 1) * na$$

Donde:

$\rho$  = resistividad

$n$  = distancia entre C1 y C2

$na$  = distancia entre C1 y P1 ó P2 y C2

El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando se requieren conocer las resistividades de capas más profundas, sin necesidad de realizar muchas mediciones como con el método Wenner. Se utiliza también cuando los aparatos de medición son poco inteligentes. Solamente se recomienda hacer



mediciones a 90 grados para que no resulten afectadas las lecturas por estructuras subterráneas.

### 2.3.3 PERFIL DE RESISTIVIDAD

Para obtener el perfil de resistividad en un punto dado, se utiliza el [Método de Wenner](#) con espaciamientos entre electrodos de prueba cada vez mayores. Por lo general, para cada espaciamiento se toman dos lecturas de resistividad en direcciones perpendiculares entre sí.

La gráfica resultante de trazar el promedio de las mediciones de resistividad (R) contra distancia entre electrodos (a) se denomina perfil de resistividad aparente del terreno.

**Figura Nº 21**  
**PERFIL DE RESISTIVIDAD**



#### 2.3.3.1 DATOS DE RESISTIVIDAD DE SUELOS TÍPICOS

**Tabla Nº 3**

<u>MATERIAL</u>	<u>RESISTIVIDAD (ohm-metro)</u>
Permafrost	3500 - 4000
Asfalto Seco	$2 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6$
Asfalto Mojado	$10000 - 6 \cdot 10^6$
Concreto Seco	1200-28000
Concreto Mojado	21-100
Compuesto GAP seco	0.032
Compuesto GAP con 30% de agua en masa	0.015

### 2.3.3.2 EJEMPLOS DE PERFILES DE RESISTIVIDAD

Capa superficial arcillosa y húmeda, capa inferior rocosa: perfil de resistividad ascendente. Lugar: Parte norte de la zona urbana de León, Guanajuato. Para simular su comportamiento se requiere de por lo menos utilizar los valores de 2 capas.

Figura Nº 22



Capa superficial muy seca, capa inferior arenosa: perfil de resistividad descendente. Lugar: Zona urbana de Aguascalientes, Ags. Para simular su comportamiento se requiere de por lo menos utilizar los valores de 2 capas.

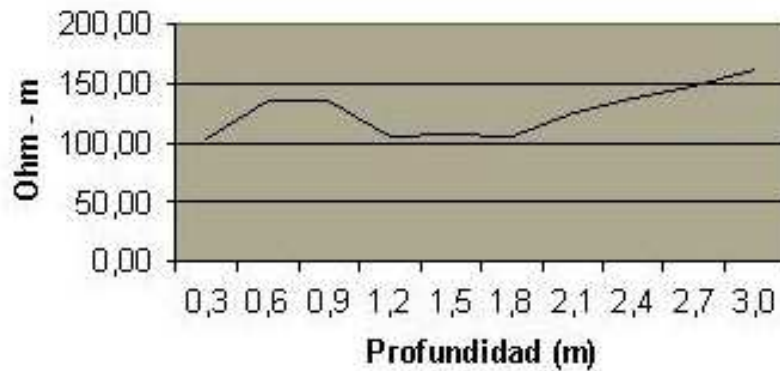
Figura Nº 23



Terreno rocoso y seco. Perfil de resistividad plano. Lugar: Zona del cerro de la Bufa en Zacatecas, Zacatecas. Para simular su comportamiento se puede utilizar la resistividad promedio.

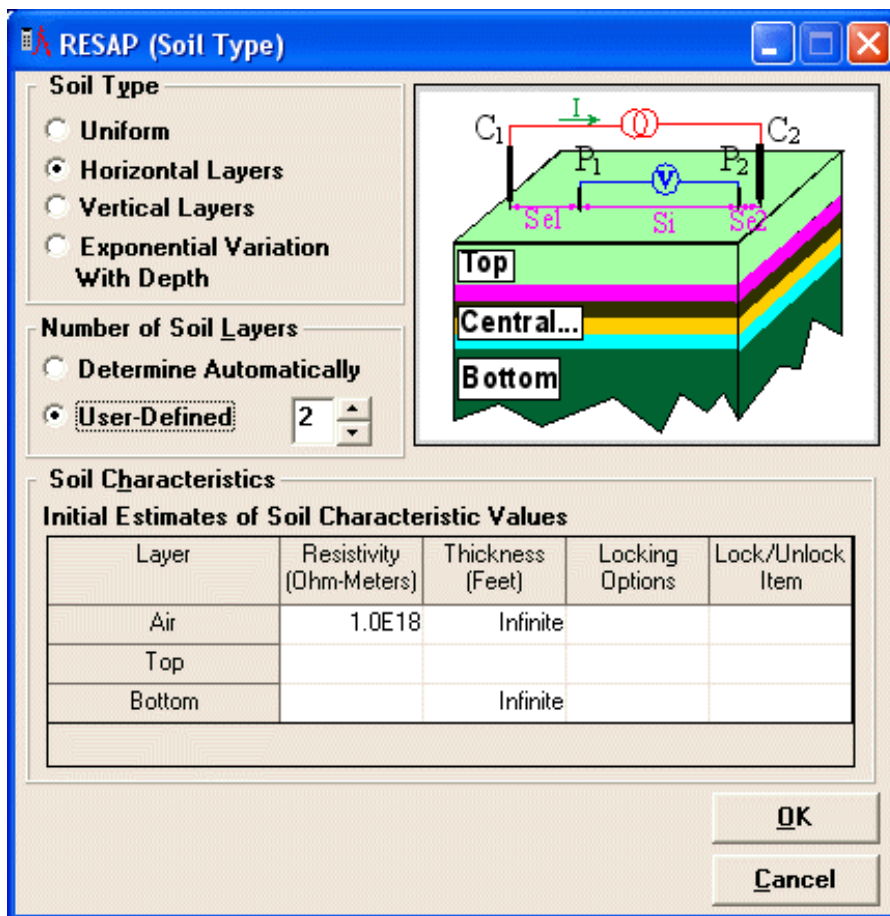
Figura N° 24

PERFIL DE RESISTIVIDAD



Existen programas para elaborar modelos del terreno con los datos de las mediciones. La figura de ejemplo es del programa RESAP-Soil Resistivity Analysis<sup>10</sup>.

Figura N° 25



Programa RESAP para modelos de terreno

## 2.3.4 MÉTODOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

Existen distintos métodos para lograr la reducción de la resistencia eléctrica, aunque todos ellos presentan un punto de saturación que es conveniente conocer para evitar diseños antieconómicos. Los métodos para la reducción son los siguientes:

- 1.- El aumento del número de electrodos en paralelo.
- 2.- El aumento de la longitud y diámetro de los electrodos.
- 3.- El aumento de la distancia entre ejes de los electrodos
- 4.- El cambio del terreno existente por otro de menor resistividad.
- 5.- El tratamiento químico electrolítico del terreno.

### 2.3.4.1 EL AUMENTO DEL NÚMERO DE ELECTRODOS EN PARALELO.

La acción de aumentar el número de electrodos conectados en paralelo disminuye el valor de la "Resistencia Equivalente", pero esta reducción no es lineal puesto que la curva de reducción tiene tendencia asintótica a partir del 6to. ó 7mo. Electrodo y además existe el fenómeno de la resistencia reciproca.

Suponiendo un medio ideal en el que la resistividad del terreno homogéneo es de 600  $\Omega$ -m y se clava un electrodo estándar de 2.4 m

$$R = (\rho/2\pi l) * \ln(2l/d)$$

donde  $:(\ln 2l/d)/2\pi l$  se considera = K y operamos la fracción vale 0.49454 por lo tanto  $R = 600 \times 0.49454 \approx 300 \Omega$

Según la ecuación de sumatoria de resistencias en paralelo, al aumentar un electrodo (el segundo) obtendríamos aproximadamente 150  $\Omega$  al aumentar un tercero 100 y para llegar a 5  $\Omega$  tendríamos que clavar 60 electrodos tal como se muestra en el siguiente gráfico.

$$5\Omega = \frac{1}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_{60}}}$$

**Figura N° 26**



**2.3.4.2 EL AUMENTO DE LA LONGITUD Y EL DIÁMETRO DE LOS ELECTRODOS**

La longitud del electrodo esta en función a la resistividad y profundidad de las capas del terreno, obviamente se prefiere colocar el electrodo dentro de la capa de menor resistividad.

Por otro lado debemos indicar antes de proseguir con las demás variables que los resultados están ligados íntimamente a la resistividad del terreno donde se está trabajando, teniendo valores variables entre 200 a 600  $\Omega$ -m en condiciones normales, si aplicamos la fórmula de la Resistencia:  $R = (\rho/2\pi l) \cdot \ln(2l/d)$  en el mejor de los casos conseguiremos una Resistencia de  $\approx 0.5\rho$  con un electrodo de dimensiones comunes y usuales; luego al aplicar la reducción recomendada se podrá llegar en el mejor de los casos a  $\approx 0.1\rho$  lo cual en la práctica nos resulta un valor de aproximadamente 20  $\Omega$  para el caso más favorable; siendo este valor muy alto para Sistemas de Tierra usados en Pararrayos, Centros de Cómputo y Telefonía.

El aumento en el diámetro del electrodo tiene que ser mayúsculo para que su aporte reduzca significativamente la resistencia, debido a que en la fórmula de la resistencia el producto de la longitud x el diámetro del electrodo se multiplica por un logaritmo natural.

#### **2.3.4.3 EL AUMENTO DE LA DISTANCIA ENTRE EJES DE LOS ELECTRODOS**

Normalmente la distancia entre ejes de los electrodos debe ser  $\geq 4L$  siendo L la longitud del electrodo; pero en los casos donde se requiera obtener resistencias eléctricas muy bajas y exista disponibilidad de área de terreno, las distancias entre ejes de los electrodos, deberán ser lo máximo posible; pues a mayor distancia entre ejes de electrodos, mayor será la reducción de la resistencia a obtener; y ello por el fenómeno de la resistencia mutua entre electrodos.

#### **2.3.4.4 CAMBIO DEL TERRENO**

Los terrenos pueden ser cambiados en su totalidad, por terreno rico en sales naturales; cuando ellos son rocosos, pedregosos, calizas, granito, etc., que son terrenos de muy alta resistividad y pueden cambiarse parcialmente cuando el terreno está conformado por componentes de alta y baja resistividad; de modo que se supriman las partes de alta resistividad y se reemplacen por otros de baja resistividad; uno de estos procedimientos es el zarandeo del terreno donde se desechan las piedras contenidas en el terreno.

El cambio total parcial del terreno deberá ser lo suficiente para que el electrodo tenga un radio de buen terreno que sea de 0 a 0.50 m en todo su contorno así como en su fondo.

La resistencia crítica de un electrodo se encuentra en un radio contorno que va de 0 a 0.5 m de este, por lo que se tendrá sumo cuidado con las dimensiones de los pozos para los electrodos proyectados.

El % de reducción en estos casos es difícil de deducir, debido a los factores que intervienen, como son resistividad del terreno natural, resistividad del terreno de reemplazo total ó parcial, adherencia por la compactación y limpieza del electrodo, pero daremos una idea porcentual más menos en función al tipo de terreno y al cambio total ó parcial.

Para lugares de alta resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma total, el porcentaje puede estar entre 50 a 70 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de media resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma parcial ó total, el porcentaje de reducción puede estar como sigue:

Cambio parcial de 20 a 40 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Cambio total de 40 a 60 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de baja resistividad donde se cambiará el terreno de los pozos en forma parcial, el porcentaje de reducción puede estar entre 20 a 40 % de la resistividad natural del terreno.

La saturación en este caso se dará si cambiamos mayor volumen de tierra que la indicada, los resultados serán casi los mismos y el costo será mucho mayor, lo cual no se justifica.

#### **2.3.4.5 TRATAMIENTO QUÍMICO DEL SUELO**

El tratamiento químico del suelo surge como un medio de mejorar y disminuir la resistencia eléctrica del Sistema de Puesta a Tierra (SPAT) sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos.

Para elegir el tratamiento químico de un SPAT se deben considerar los siguientes factores:

- Alto % de reducción inicial
- Facilidad para su aplicación
- Tiempo de vida útil (del tratamiento y de los elementos del SPAT)
- Facilidad en su reactivación
- Estabilidad (mantener la misma resistencia durante varios años)

Las sustancias que se usan para un eficiente tratamiento químico deben tener las siguientes características:

- Higroscopicidad -Alta capacidad de Gelificación
- No ser corrosivas -Alta conductividad eléctrica
- Químicamente estable en el suelo -No ser tóxico
- Inocuo para la naturaleza

#### **2.3.4.5.1 TIPOS DE TRATAMIENTO QUÍMICO**

Existen diversos tipos de tratamiento químico para reducir la resistencia de un SPAT los más usuales son:

- a) Cloruro de Sodio + Carbón vegetal
- b) Bentonita
- c) Thor-Gel

#### **2.3.4.5.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS TRATAMIENTOS QUÍMICOS.**

Ninguna Sal en estado seco es conductiva, para que los electrolitos de las sales conduzcan corriente, se deben convertir en soluciones verdaderas o en pseudo soluciones, por ejemplo: el cloruro de sodio en agua forma una solución verdadera lo mismo que el azúcar, el mismo cloruro de sodio disuelto en benceno formara una pseudo solución o dispersión coloidal como también se le conoce.

##### **a) CLORURO DE SODIO + CARBÓN VEGETAL.**

El Cloruro de Sodio forma una solución verdadera muy conductiva que se precipita fácilmente junto con el agua por efecto de la percolación, capilaridad y evapotranspiración; la solución salina tiene una elevada actividad corrosiva con el electrodo, reduciendo ostensiblemente su tiempo de vida útil, la actividad corrosiva se acentúa si el electrodo es de hierro cobreado (copperweld). Si bien es cierto que el cloruro de sodio disuelto en agua no corroe al cobre (por ser un metal noble) no es menos cierto que la presencia de una corriente eléctrica convertirá al sistema, Cobre - solución cloruro de sodio, en una celda electrolítica con desprendimiento de cloro y formación de hidróxido de sodio en cuyo caso ya empieza la corrosión del cobre.



El objetivo de la aplicación del carbón vegetal molido (cisco de carbonería) es aprovechar la capacidad de este para absorber la humedad del medio, (puesto que el carbón vegetal seco es aislante) y retener junto a esta algunos de los electrolitos del cloruro de sodio que se percolan constantemente.

## **b) BENTONITA**

Las bentonitas constituyen un grupo de sustancias minerales arcillosas que no tienen composición mineralógica definida y deben su nombre al hecho de haberse descubierto el primer yacimiento cerca de Fort Benton, en los estratos cretáceos de Wyoming en 1848; Aun cuando las distintas variedades de bentonitas difieren mucho entre sí en lo que respecta a sus propiedades respectivas, es posible clasificarlas en dos grandes grupos:

- **Bentonita Sódica.**- En las que el ion sodio es permutable y cuya característica más importante es una marcada tumefacción o hinchamiento que puede alcanzar en algunas variedades hasta 15 veces su volumen y 5 veces su peso.

- **Bentonita Cálcica.**- En las que el ion calcio es permutable, tiene menor capacidad para absorber agua y por consiguiente solo se hinchan en la misma proporción que las demás arcillas.

Las bentonitas molidas retienen las moléculas del agua, pero la pierden con mayor velocidad con la que la absorben debido a la sinéresis provocada por un exiguo aumento en la temperatura ambiente, al perder el agua pierden conductividad y restan toda compactación lo que deriva en la pérdida de contacto entre el electrodo y el medio, elevándose la resistencia del pozo ostensiblemente, una vez que la Bentonita se ha armado, su capacidad de absorber nuevamente agua es casi nula.

En el país contamos con provincias que tienen gran cantidad de minerales tal es el caso de la provincia del Guayas y principalmente la Península de Santa Elena, constituyen una región importante para el sector de minerales y rocas industriales, debido a las grandes reservas de recursos no metálicos, entre los cuales se destacan los grandes afloramientos de bentonita de la Cuenca Ancón, Depresión Colonche y algunas áreas de la Cordillera Chongón-Colonche.

## **c) THOR-GEL®**

Es un compuesto químico complejo que se forma cuando se mezclan en el terreno las soluciones acuosas de sus 2 componentes. El compuesto químico resultante tiene naturaleza coloidal, formando una malla tridimensional, que facilita el movimiento de ciertos iones dentro de la malla, de modo que pueden cruzarlo en uno u en otro sentido; convirtiéndose en un excelente conductor eléctrico.

Tiene una gran atracción por el agua, de modo que puede aprisionarla manteniendo un equilibrio con el agua superficial que la rodea; esto lo convierte en una especie de reservorio acuífero.

Rellena los espacios intersticiales dentro del pozo, constituyendo una excelente conexión eléctrica entre el terreno (reemplazado) y el electrodo, asegurando una conductividad permanente.

THOR-GEL® tiene el Ph ligeramente básico y no es corrosivo con el cobre, por lo que la vida media de la puesta a tierra con el producto THOR-GEL®, será de 20 a 25 años, manteniéndola de vez en cuando si la pérdida de humedad es mayúscula y hay elevación de la resistencia eléctrica

Método de aplicación del THOR-GEL®-

El tratamiento consiste en incorporar al pozo los electrolitos que aglutinados bajo la forma de un Gel mejora la conductividad de la tierra y retenga la humedad en el pozo por un periodo prolongado de manera que se garantice una efectiva reducción de la resistencia eléctrica y una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones del clima. La cantidad de dosis por metro cúbico de tierra del SPAT, varía de 1 a 3\*, y esta en función a la resistividad natural del terreno.

**Tabla Nº 4**

<b>RESISTIVIDAD <math>\Omega</math>-m</b>			<b>DOSIFICACIÓN</b>
<b>de 50</b>	<b>a</b>	<b>200</b>	<b>1 dosis x m3</b>
<b>de 200</b>	<b>a</b>	<b>400</b>	<b>2 dosis x m3</b>
<b>de 400</b>	<b>a</b>	<b>mas</b>	<b>3 dosis x m3</b>

La saturación en el tratamiento químico se presenta en la tercera dosis por m3. Esta dosificación se aplica igualmente en el tratamiento de las zanjas de interconexión.

**Tabla Nº 5**

<b>RESISTENCIA INICIAL EN <math>\Omega</math></b>	<b>% DE REDUCCIÓN</b>	<b>RESISTENCIA FINAL EN <math>\Omega</math></b>
600	95	30
300	85	45
100	70	30
50	60	20
20	50	10
10	40	6

Resultados de Reducción de la Resistencia con THOR-GEL® - Los resultados detallados, han sido obtenidos con la aplicación de una sola dosis de 5 Kilos.

## 2.4 VOLTAJES DE TOQUE.

El riesgo de muerte de una persona que ha sufrido contacto con algún elemento energizado, depende de.

- Frecuencia.
- Magnitud.
- Duración de la circulación de corriente a través del cuerpo humano.

El tiempo que una persona puede soportar la circulación de una corriente eléctrica a través de su cuerpo, sin sufrir daño corporal (fibrilación ventricular), es bastante corto y puede ser determinada mediante una ecuación experimental dada en la siguiente ecuación

$$I_k = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

Donde:

$I_k$  : Valor eficaz máximo de la corriente a través del cuerpo humano (A)

$t$  : Tiempo de duración del contacto (seg.)

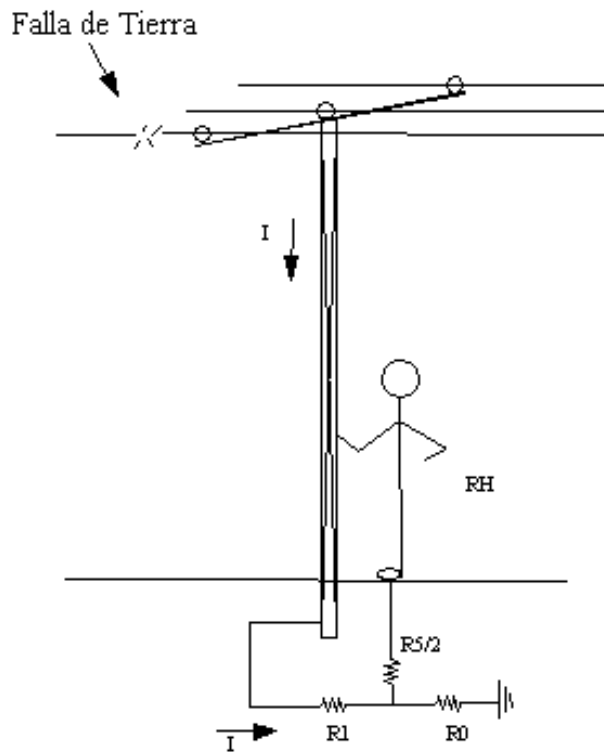
0.116 : Constante empírica

Esta ecuación anterior permite determinar el potencial máximo al que puede quedar sometida una persona cuando queda sometida a una diferencia de potencial.

La norma ANSI/IEEE ha propuesto, una serie de expresiones para el calculo aproximado de la solicitaciones de voltaje en el interior y contorno de una malla a tierra. Estas expresiones se basan en una modelación simplificada de una malla, complementada con estudios experimentales realizados en modelos (cuba electrolítica). Las proposiciones iniciales se han ido modificando en las nuevas versiones de la norma, en la medida que los métodos más exactos disponibles, han indicado diferencias importantes con los valores obtenidos de este método aproximado.

La tensión de contacto es aquella a la que queda sometida una persona al tocar un equipo energizado.

Figura N° 27



Representación grafica de una persona en contacto con un cuerpo energizado

La máxima tensión de contacto a que puede quedar sometida una persona se determina mediante la siguiente ecuación.

$$V_c = \frac{116 + 0.058 * R_\rho}{\sqrt{t}}$$

Donde:

$\sqrt{t}$  : Tiempo de duración del contacto (seg.)

$R_\rho$ : Resistencia de contacto de un pie con el terreno

Una aproximación aceptada para la tensión de contacto queda determinada por la siguiente ecuación. La tensión de contacto aproximada deberá ser menor al valor máximo admisible.

$$K_m * K_i * \rho * \frac{l}{L} < \frac{116 + 0.058 * R_\rho}{\sqrt{t}}$$

El valor de  $K_m$  y  $K_i$  se puede hallar mediante las siguientes ecuaciones

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{D^2}{16 * h * d}\right) + \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{2}{3} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} * \dots\right) n - 2 \quad \text{terminos}$$

$$K_i = 0.65 + 0.172 * n$$

Donde:

D : Distancia entre conductores paralelos (m)

h : Profundidad de la malla (m)

d : Diámetro del conductor de la malla (m)

n : Numero de conductores del lado mayor de la malla

I : Corriente dispersada por la malla de tierra

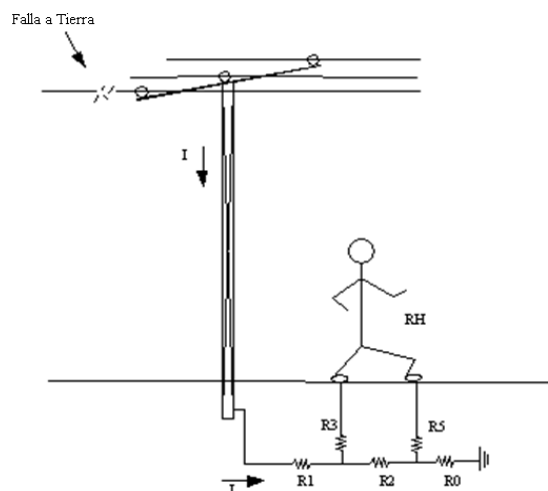
L : Longitud total equivalente de los elementos que conforman la malla, considerando conductores y mallas

K m : Factor de proporcionalidad debido a la geometría de la malla

## 2.5 VOLTAJE DE PASO

La tensión de paso corresponde a la elevación de potencial debido a la corriente de cortocircuito que circula desde la malla al terreno, y aunque a su vez forzara a que circule una corriente por el cuerpo de una persona que se encuentre parada sobre la malla. La tensión de paso se determina para una distancia entre puntos a considerar con separación de 1 metro.

**Figura Nº 28**



**Representación grafica de una persona sometida a una tensión de paso**

La tensión de paso máxima a que puede quedar sometida una persona se indica en la siguiente ecuación.

$$V_{\rho} = \frac{116 + 0.232 * R_{\rho}}{\sqrt{t}}$$

La tensión de paso deberá ser menor al valor máximo permisible, estas expresiones quedan determinadas de la siguiente ecuación.

$$K_s * K_i * \rho * \frac{l}{L} < \frac{116 + 0.232 * R_{\rho}}{\sqrt{t}}$$

Donde:

$K_s$  : Factor de proporcionalidad debido a la geometría de la malla

$K_i$  : Factor de proporcionalidad del terreno en donde se instala la malla

$R_{\rho}$  : Resistividad del terreno

$l$  : Corriente dispersada por la malla de tierra

$L$  : Longitud total equivalente de los elementos que conforman la malla, considerando conductores y mallas

$t$  : Tiempo de operación de las protecciones

La resistencia de contacto entre un pie y el terreno, es la del calzado de la persona, mas la resistencia de contacto de éste con el terreno. La primera de ellas, se acostumbra suponerla igual a cero, considerando posibles condiciones de humedad. La resistencia de contacto de un pie en el terreno se puede determinar aproximadamente aceptando su equivalencia con una plancha circular de un radio de 8 cm.

Laurent y Heppe han propuesto para esta situación, expresiones que permiten determinar aproximadamente la resistencia de un electrodo de pequeña dimensiones en comparación con el espesor del estrato superior. Los valores calculados con estas expresiones son muy similares, siendo mas simple el cálculo con la de Laurent.

$$R_p = \frac{\rho_s}{4} * \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{h_s} * \ln \frac{\rho_s + \rho_t}{2\rho_s} \right)$$

Donde:

$r$  : 0.08 metros

$\rho_s$  : Resistividad del material artificial que cubre el área de la puesta a tierra.

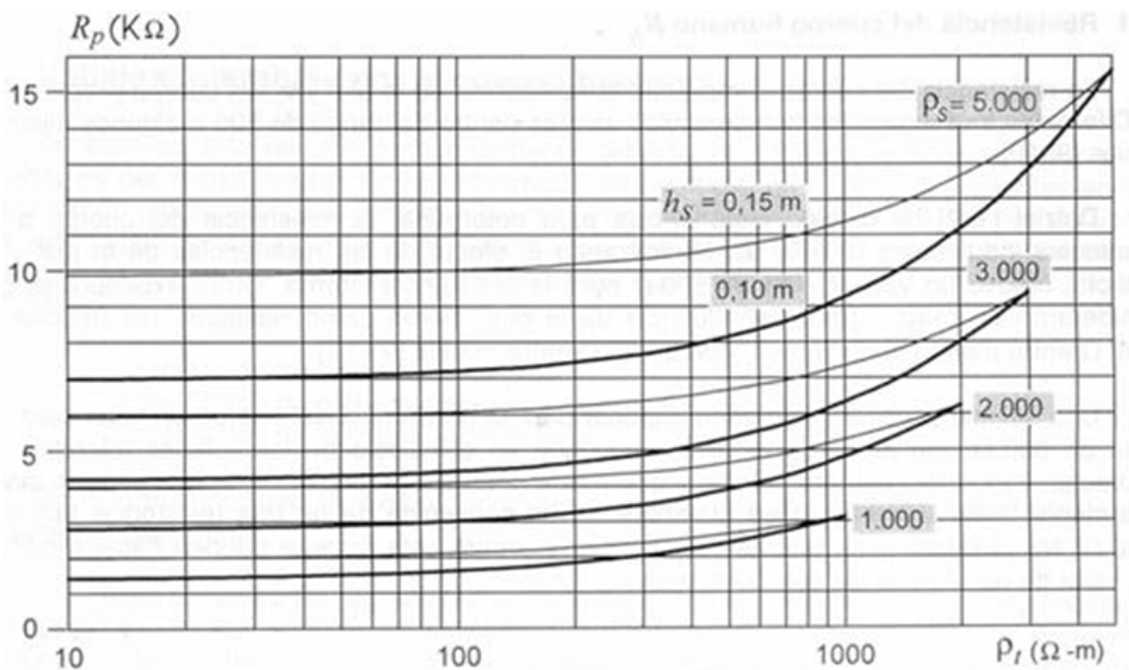
$h_s$  : Espesor, normalmente entre 0.10 y 0.15 metros.

$\rho_t$  : Resistividad superior del primer estrato natural del terreno.

En la figura se indica, para  $h_s = 0.10$  y  $0.15$  metros, los valores de resistencia  $R_p$  de contacto de un pie con el terreno. De ella se desprende que el valor de resistencia de un pie en el terreno varia, dependiendo de la resistividad del estrato superior del terreno natural, entre 1.5 y 3 veces  $\rho_s$ , para  $h_s = 0.10$  metros; y entre 2 y 3 veces  $\rho_s$ , para  $h_s = 0.15$  metros. Esto difiere del valor constante  $3\rho_s$ , tradicionalmente utilizado al no considerar el efecto del terreno bajo la capa de materia artificial.

Figura Nº 29

**GRAFICO DE LA RESISTENCIA  $R_p$  DE CONTACTO DE UN PIE EN EL TERRENO**



## CAPÍTULO 3

### CALCULO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA.

#### 3.1 METODO DE CÁLCULO.

Las fórmulas de cálculo y verificaciones exigidas en las **Normas VDE 0141<sup>11</sup>** y a la **Especificación Técnica de la ex AyEE<sup>12</sup>**. Se exponen las fórmulas de cálculo necesarias y se verifican la malla y las jabalinas de puesta a tierra en lo que hace a:

- Sección de conductor de cobre y largo del mismo
- Número necesario de jabalinas
- Tensiones de paso y contacto máximas exigidas o recomendadas.

#### 3.1.2 LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

El dato de la corriente de cortocircuito se presenta como una “potencia de cortocircuito” monofásica en kA y resulta de considerar la mayor corriente posible de falla monofásica desde sistema del 13,2 kV o del sistema de 380/220 V, se consideran estos valores por representar bajos voltajes.

El valor mayor de corriente de cálculo del supuesto cortocircuito relacionado con la malla lo debe transmitir hacia tierra.

En el cortocircuito monofásico interviene en forma decisiva el valor de la resistencia interpuesta en el cortocircuito. Si consideramos la situación más desfavorable (inexistencia de arco de ningún tipo), con impedancia de sistema evaluada en un amortiguamiento de 0,8 del valor teórico de impedancia infinita, e incorporando el valor que de todos modos existe como la resistencia de la malla misma, se plantea:

$$I_{cc} I = 0,8 \times 3 \frac{E_f}{2 Z_d} + Z_n (R_f + R_m)$$

Que en forma simplificada queda:

$$I_{cc} I = 0,8 \frac{E_f}{R_m}$$

Donde:

Ef: Tensión de fase

---

**Normas VDE 0141<sup>11</sup> .- Norma Alemana**  
**Especificación Técnica de la ex AyEE<sup>12</sup> .- Norma Alemana**



Rm: Resistencia de malla

I<sub>cc</sub>: corriente de cortocircuito

De esta fórmula aproximada (máximo valor de I<sub>cc</sub>); y considerando que el mínimo valor de R<sub>t</sub> de la malla y jabalinas asociadas sea igual a 1 Ohm, resulta un valor de máxima de I<sub>cc</sub> relacionado con la menor tensión del transformador:

$$I_{cc \text{ Imax}} = 0.8 \frac{7620}{1} = 6100A$$

de falla del sistema de 13,2 kV?

El cálculo de una única malla que abarcará las dos tensiones se realizará considerando el valor de referencia de 6100 A.

### 3.1.2 CORRIENTE TOTAL O MÁXIMA A EVACUAR HACIA TIERRA

La corriente máxima, como ya se mencionó, se refiere a la CORRIENTE MÁXIMA DE FALLA A TIERRA, en la situación que origina corriente hacia la tierra, que es el cortocircuito monofásico: Directa (fase-tierra) o indirecta (por masas metálicas).

Es necesario recalcar que el cortocircuito trifásico, aunque sea con contacto a tierra, no origina corrientes hacia ella pues las tres corrientes, aunque mayores, están desfasadas 120 grados eléctricos entre sí y dan como resultado un valor nulo de corriente a tierra.

### 3.1.3 SECCIÓN DE COBRE DE CABLE O PLETINA

$$S [mm^2] = \frac{I_t}{150}$$

Al conductor de cobre se le adjudica una capacidad de transmitir una densidad de corriente del orden de 150 A/mm<sup>2</sup>; por lo cual la sección mínima necesaria se calcula como:

Y en este caso da:

$$S = \frac{6100}{150} = 40 [mm^2]$$

EPEC establece que la sección mínima de conductor de la malla es de 50 mm<sup>2</sup>.

### 3.1.4 LARGO “TEÓRICO” APROXIMADO DE LOS CONDUCTORES DE LA MALLA, ASUMIENDO QUE TODA LA ICC ES DISPERSADA POR ELLA.

La cantidad de metros de cobre de la malla está relacionada con la resistividad eléctrica del terreno y la corriente  $I_t$  a evacuar así como a la verificación posterior del resultado de máxima tensión de contacto  $U_c$  especificada en el proyecto, como se verá más adelante.

El diseño de la malla y sus dimensiones debe resolver el problema de evacuar la  $I_t$  hacia un terreno de una resistividad ( $\rho_t$ ) que es igual a 200 Ohm.m.

El largo necesario en metros de los conductores de la malla resulta de calcular:

$$L_c [m] = \frac{0,7 \delta_m I_t}{U_c}$$

$$L_c [m] = \frac{0,7 \times 200 \times 6100}{125} = 7504 \text{ m}$$

$\rho_m$  Resistividad eléctrica del terreno a la profundidad de implantación de la malla (terrenos arcillosos, sin piedras, valor máximo: 200 Ohm.m).

$U_c$  (V): Dato de tensión máxima a lograr (del orden de 125 V).

En la Obra se instalarán aproximadamente 200 m de cable de malla, más un conjunto de jabalinas de tipo químicas que, en definitiva, dispersarán la mayor parte de  $I_{cc}$ .

La característica de más relevancia de la malla es dar un conjunto equipotencial en contacto con la tierra, al vincular los equipos y tableros mediante conductores de cobre.

### 3.1.5 RESISTENCIA DE LA MALLA ( $R_m$ ). SÓLO CON CABLES DE COBRE

Este ítem consiste en calcular el valor resultante de la resistencia hacia tierra lograda por la presencia de la malla enterrada.

$$R_m [Ohm] = \frac{\rho_m}{2d} + \frac{\rho_m}{L_c}$$

Siendo:

$L_c$ : Longitud de conductores de la malla propuesta en metros.

d: Diámetro equivalente del círculo de igual superficie que la superficie de la malla propuesta, en metros, tomando sólo la malla propia de la estación:

10m x 6m = 60m<sup>2</sup>. Con lo cual:

$$d = \sqrt{4 \times \frac{60}{\pi}} = 5 \text{ m}$$

$$R_m = \frac{200}{2 \times 5} + \frac{200}{200} = 21 [\text{Ohm}]$$

### 3.1.6 RESISTENCIA DE LA JABALINA (RJ)

La sección circular y el material químico de la jabalina aseguran que la misma tendrá una buena duración frente a la acción corrosiva del terreno sobre ella, así como un valor de puesta a tierra por jabalina de 5 Ohm.

$$R_j = 5 \text{ Ohm}$$

### 3.1.7 CORRIENTE DISPERSADA POR LA MALLA PROPUESTA: IM

Esta corriente se calcula luego de aplicar los diversos datos de proyecto y establecer la malla que cubrirá el terreno y de proponer lo exigido en cuanto a "cuadrículas" (cuadrados que se forman por cruce de cables de la malla).

La especificación de AyEE indica que en mallas de diseño "cuadrado" (o muy próximo a cuadrado) no resulta práctico ni aporta una disminución final del valor de puesta a tierra prever más de 16 divisiones por lado de la malla.

En Obra se establece una cuadrícula de 1 x 1 m para mallas de estaciones transformadoras de tipo interior, de tensión máxima 13,2 kV. ?

Además se deben adicionar las conexiones entre mallas que, por proyecto, se necesitan, tanto para el conjunto de la malla como para otras mallas donde se exigen puestas a tierra asociadas a una determinada instalación conectada a la malla general.

Del conjunto resultará una determinada malla en la cual se debe verificar su capacidad de corriente de dispersión (Im), en Ampere:

$$I_m [A] = \frac{I_t \cdot k}{100}$$

Siendo:

Im: la capacidad de corriente de la malla diseñada

k: Relación porcentual de It que puede dispersar la malla propuesta

$$k[A] = \frac{100 * U_c * L_m}{0.7 * \rho_m * ISUBt}$$

Reemplazando resulta:

$$I_m = \frac{U_c \cdot L_m}{0,7 \cdot \delta_m} = \frac{125 \times 200}{0,7 \times 200} = 178 \text{ A}$$

### 3.1.8 NÚMERO DE JABALINAS NECESARIAS (N)

$$n = \frac{I_j \cdot R_j}{I_m \cdot R_m}$$

Donde:  $I_j = (I_t - I_m) [A]$

$$n = \frac{(6100 - 178) \times 5}{178 \times 21} = 7,92 \text{ jabalinas}$$

Esta diferencia entre las jabalinas teóricas y las cinco instaladas se cubrirá vinculando a tierra las tierras naturales encontradas en la zona que son las riostras de fundación que se vincularán también al sistema de puesta a tierra.

Se adopta un número mínimo de jabalinas igual a 5 (cinco), a partir de considerar una corriente límite de 6100 A.

En este ejemplo se adopta el mínimo de 5 jabalinas.

### 3.1.9 DISTRIBUCIÓN DE LA CORRIENTE EVACUADA EN CONJUNTO (PARTE POR MALLA Y PARTE POR JABALINAS)

$$\frac{I}{R_t} = \left( \frac{I}{R_m} + \frac{I}{R_{jt}} \right) \left[ \frac{I}{Ohm} \right]$$

Primero se determina el valor de la resistencia del conjunto  $R_t$  del "paralelo" malla y jabalina:

$R_{jt}$ : Resistencia total del conjunto de jabalinas, valor que se obtiene de:

$$R_{jt} = \frac{R_j}{n}$$

En este caso el número de jabalinas  $n=5$  y  $R_j=5$ . Reemplazando:

$$R_{jt} = \frac{5}{5} = 1 \text{ Ohm}$$

Con este valor y el de  $R_m$  calculado en 2.5 tenemos:

$$\frac{I}{R_t} = \left( \frac{I}{2I} + \frac{I}{I} \right) \left[ \frac{I}{\text{Ohm}} \right]$$

$$R_t = 1 [\text{Ohm}]$$

Finalmente se puede discriminar la corriente en Ampere que, malla y jabalinas, dispersan de la corriente total a dispersar por el conjunto:

$$I_m = I_t \left( \frac{R_t}{R_m} \right) [A]$$

1)

$$I_j = I_t \left( \frac{R_t}{R_{jt}} \right) [A]$$

2)

$$I_m = 6100 \times \frac{I}{2I} = 290 [A]$$

$$I_j = 6100 \times \frac{I}{I} = 6100 [A]$$

Obsérvese que la mayor parte de la corriente de falla será dispersada por las jabalinas.

### 3.1.10 VERIFICACIÓN DE LA TENSIÓN DE CONTACTO MÁXIMA EXIGIDA EN PROYECTO (DEL ORDEN DE 125V)

La circulación de corriente de frecuencia industrial por todo el circuito de puesta a tierra originará tensiones de paso y de contacto en el interior y el exterior de la malla.

La Norma VDE 0121 aconseja verificar las tensiones de paso y de contacto en el interior de la estación con un tiempo referencial de 1 segundo, como tiempo de actuación de las protecciones asociadas al sistema de puesta a tierra, estableciendo el valor de seguridad ya mencionado de 250 V (aunque las

protecciones instaladas de tipo limitador establecen, a lo sumo, un tiempo de falla de 0,02 s).

$$U_c = \frac{0,7 \times \delta_m \times I_m}{L_m \times h} [V]$$

$$U_c = \frac{0,7 \times 200 \times 178}{200} = 124[V/m] \text{ y } 125 [V/m]$$

h: Profundidad de instalación. Haciendo h = 1m tenemos:

Para tiempos de actuación de 0,02 s.

### 3.1.11 VERIFICACIÓN DE LA TENSIÓN DE PASO (UP) MÁXIMA EXIGIDA EN PROYECTO (DEL ORDEN DE 125 VOLT/METRO)

En este punto se procura resolver una hipotética situación de descarga a tierra y donde una persona ubicada sobre el terreno de la malla o en el exterior de la estación y sus pies separados 1 metro (paso), no se originen en ella tensiones mayores a las exigidas en este caso, es decir los 125 V.

$$U_p = \frac{0,16 \times \delta_m \times I_m}{L_m \times h} [V]$$

$$U_p = \frac{0,16 \times 200 \times 178}{200 \times 1} = 29 [V] \text{ y } 125 [V]$$

Nota:

Es de considerar que, el hecho de la selección de protecciones de tipo limitadoras, tanto en el fusible de media tensión como en las protecciones de interruptores automáticos de 380/220 V, permitiría establecer valores de tensiones de paso y contacto mayores a las aquí verificadas de 125 V (tiempo de actuación de protecciones del orden máximo de 0,02 s), verificándose que, de todos modos, los valores son menores a 125 V en este ejemplo.

### 3.1.12 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

La malla se ejecutará con conductores desnudos de cobre en sus tramos enterrados. El contorno se ubicará a una profundidad aproximada de 1,5 m para mejorar el gradiente de "tensión de paso" hacia el exterior de la malla.

Se ubicarán jabalinas de 2 m de largo y diámetro indicado por el proveedor de jabalinas químicas.

Las uniones y conexiones de la malla misma se ejecutarán con soldaduras cuproaluminotérmicas (soldadura fría) de tipo cruz incluidas las periféricas y las conexiones a la tierra natural encontrada en el terreno.

Todos los elementos no sometidos a tensión (carcazas metálicas de aparatos, partes metálicas de tableros y/o bastidores y bornes de aparatos específicos indicados) se conectarán al sistema de puesta a tierra mediante conductores en general desnudos y de sección de cobre indicada en planos.

Los elementos de conexión serán de tipo grampas conectoras tipo normalizadas, terminales y bulonería del tipo para conexión a sistema de puesta a tierra.

La malla y sus conexiones hacia el exterior se construirán previamente a la instalación del equipamiento (obras civiles, canales, bases, etc.), en un terreno nivelado. Luego de la construcción de la malla, humedecer y apisonar la tierra cribada extraída, de modo de obtener una buena compactación y contacto firme tierra cables para luego preparar el nivel del terreno de la futura estación transformadora, por eso se usa la malla de jabalinas en áreas de tierra firme.

### **3.2 DISEÑO DE UNA MALLA A TIERRA**

El diseño de una malla a tierra está afectado por las siguientes variables:

- Tensión Permisible de Paso.
- Tensión Permisible de contacto.
- Configuración de la malla.
- Resistividad del terreno
- Tiempo máximo de despeje de la falla.
- Conductor de la malla.
- Profundidad de instalación de la malla.

#### **3.2.1 SELECCIÓN DEL CONDUCTOR DE LA MALLA.**

Para calcular la sección del conductor se aplica la siguiente ecuación:

$$A_c = I \left( \frac{33t}{\log \left( \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)} \right)^{1/2}$$

En donde:

$A_c$  = Sección del conductor (CM).

$I$  = Corriente máxima de falla (Amp.)

$T_m$  = Temperatura máxima en los nodos de la malla (450°C con soldadura y 250°C con amarre pernado.)

$T_a$  = Temperatura ambiente (°C).

$t$  = Tiempo máximo de despeje de la falla (seg).

Sin embargo, la sección mínima recomendable es 2/0 AWG para la malla y 5/8" para las varillas, estos valores mínimos están de acuerdo con prácticas internacionales.

### 3.2.2 TENSIONES REALES DE PASO Y DE CONTACTO

La tensión de paso real en una subestación está dada por:

$$E_p = k_s k_i \frac{\rho I}{L}$$

En donde:

$E_p$  = Tensión de paso real en voltios.

$k_s$  = Coeficiente que tiene en cuenta, la influencia combinada de la profundidad y del espaciamiento de la malla.

$k_i$  = Coeficiente de irregularidad del terreno.



$\rho$  = Resistividad del suelo ( $\Omega$ -m)

$I$  = Corriente máxima de falla (Amp)

$L$  = Longitud total del conductor (m)

La tensión de contacto real está dado por:

$$E_t = k_m k_i \frac{\rho I}{L}$$

Donde:

$E_t$  = Tensión de contacto en voltios.

$k_m$  = Coeficiente que tiene en cuenta las características geométricas de la malla.

### 3.2.3 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES $k_m$ , $k_i$ , $k_s$ .

Para la determinación de los coeficientes es necesario tener en cuenta las siguientes definiciones:

$A$  = Longitud de la malla (m).

$B$  = Ancho de la malla (m).

$L$  = Longitud total del conductor (m).

$n$  = Número de conductores en paralelo de longitud  $A$

$m$  = Número de conductores en paralelo de longitud  $B$ .

$D$  = Espaciamiento entre conductores (m).

$h$  = Profundidad de enterramiento (m).

$d$  = Diámetro del conductor (m)

La longitud total del conductor está dada por

$$L = n \cdot A + m \cdot B$$

km es:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{D^2}{16hd} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \dots \right)$$

n-2 términos

$k_i$  es:

$$k_i = 0.65 + 0.172n \quad n \leq 7$$

$$k_i = 2.0 \quad n > 7$$

$k_s$  es:

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right)$$

### 3.2.4 VALOR DE LA RESISTENCIA DE PUESTAS A TIERRA.

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra se puede hacer por el método de Laurent y Niemann o por método de Dwinght.

#### 3.2.4.1 MÉTODO DE LAURENT Y NIEMANN

Este método es bastante aproximado y la expresión para el cálculo es:

$$R = 0.443\rho \left( \frac{1}{\sqrt{A\gamma}} + \frac{1}{L} \right)$$

Donde:

R = Resistencia en ohmios.

A $\gamma$  = Área de la malla de puesta a tierra en m<sup>2</sup>

$\rho$  = Resistividad del suelo ( $\Omega$ -m)

L = Longitud total del conductor (m).

La ecuación (10) es una aproximación y su resultado siempre es mayor que el valor real.

### 3.2.4.2 MÉTODO DE DWIGHT

Este método es mucho más largo pero es mucho más exacto que el anterior.

El primer paso consiste en hallar la resistencia de un conductor de la malla.

$$R_s = \frac{\rho}{2\pi L'} \left( \ln\left(\frac{2L'}{r}\right) + \ln\left(\frac{L'}{h}\right) + \frac{2h}{L'} - \frac{h^2}{(L')^2} - 2 \right)$$

Donde:

R<sub>s</sub> = Resistencia de puesta a tierra de un solo conductor en  $\Omega$

$\rho$  = Resistividad en (ohmios-m)

L' = Longitud del conductor (m)

h = Profundidad de enterramiento del conductor (m)

r = Radio del conductor en m.

Una vez calculada esta resistencia, se procede al cálculo de las resistencias debidas a las interferencias mutuas entre los conductores, tal resistencia es:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L'} \left( \ln \left( \frac{4L'}{E} \right) + \ln \left( \frac{E}{2L} \right) \frac{E^2}{16(L')^2} - 1 \right)$$

Donde:

R<sub>a</sub> = Resistencia mutua en ohmios

E = Espaciamiento equivalente entre un conductor y los demás en m.

La resistencia total de un conductor es:

$$R_c = R_s + (n-1)R_a$$

La resistencia de n conductores es:

$$R_{cn} = \frac{R_c}{n}$$

También en forma análoga se determina la resistencia de los conductores transversales de unión.

La resistencia "mutua" de los componentes de unión incluyendo la interferencia debida a los conductores transversales a los cuales se encuentran unidos es:

$$R_{am} = (m-1)R_{au} + (n-1)R_a$$

$R_{au}$  = Resistencia mutua de conductores de unión ( $\Omega$ )

La resistencia total de un solo conductor de unión es:

$$R_{cu} = R_{su} + R_{am}$$

$R_{su}$  = Resistencia de un solo conductor de unión ( $\Omega$ )

La resistencia de los  $m$  conductores es:

$$R_{cm} = \frac{R_{cu}}{m}$$

La resistencia total de la malla está dada por:

$$R = \frac{R_{cn} * R_{cm}}{R_{cn} + R_{cm}}$$

### **3.2.5 CÁLCULO DEL NÚMERO DE VARILLAS DE PUESTAS A TIERRA VERTICALES.**

El uso de varillas de tierra como único medio de puesta a tierra en una subestación, no es recomendable, ya que con estas no se logra una superficie equipotencial, y por lo tanto las tensiones de paso y de contacto toman valores peligrosos.

### 3.2.5.1 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE UNA VARILLA.

La resistencia de una varilla enterrada a una profundidad comprendida entre 0.5 y 1m, se calcula por

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

Donde:

Rv: Resistencia de una varilla en  $\Omega$

$\rho$ : Resistividad del terreno ( $\Omega$ -m)

L: Longitud de la varilla (m)

r: radio de la varilla en m

### 3.2.5.2 NÚMERO MÍNIMO DE VARILLAS

Datos de laboratorio muestran que existe un límite en el número de varillas en paralelo, pues su efectividad decrece cuando su número aumenta. Estos resultados se deben al siguiente fenómeno: cuando el número de varillas aumenta en determinada área, el espacio entre electrodos decrece. Los cilindros frontera de las varillas, los cuales determinan la resistencia de tierra, tienden a entrecruzarse, reduciendo así la efectividad individual de cada varilla.

Manejar demasiadas varillas en un espacio muy estrecho resulta muy costoso y no reduce significativamente la resistencia.

Para determinar el número aproximado de varillas requeridas en un área dada de una subestación, se deben seguir los siguientes pasos.

- Calcule la resistencia de una varilla.
- Halle la conductividad de esa varilla.
- Determine la resistencia deseada del aterrizamiento.
- Halle la conductividad de la resistencia anterior.
- Calcule la siguiente razón:

Conductividad deseada / conductividad de cada varilla

- Determine el área de la subestación
- Halle el número de varillas deseadas.

### **3.2.6 OTRAS CONSIDERACIONES.**

- Si al hallar la razón de conductividad se observa que su valor excede el límite dado para un número infinito de varillas, se sugiere aumentar el área de la subestación o colocar varillas de un largo mayor de 10 ft para alcanzar suelos de mejor resistividad, a tratar el suelo.
- Se sugiere colocar las varillas lo más uniformemente distribuidas que se puedan, y en sitios importantes tales como pararrayos y neutros de los transformadores de potencia.
- En caso de que el diseño este orientado a una planta o subestación de gran importancia en donde exista la posibilidad de gradientes de potencial peligrosos para el personal aún con la colocación de una buena malla y de varillas de puestas a tierra, la práctica usual es la colocación de contrapesos

### 3.3.- PROGRAMA COMPUTACIONAL DEL DISEÑO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA.

<h2 style="text-align: center;">Programa computacional Diseño de Mallas de Puesta a Tierra</h2>				
<h3 style="text-align: center;">DATOS BASE PARA EL CÁLCULO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA</h3>				
Resistencia Objetivo menor a $(\Omega)$	10	Subestaciones de media tensión en cobre		
Resistividad aparente del terreno ( $\rho$ )	10			
Corriente de falla monofásica a tierra en el primario $I_f(A)$	100			
Tiempo de despeje de la falla $t_c(m s)$	50			
Materia a utilizar en la puesta a tierra, con temperatura ambiente de $40^\circ C$	Varilla de acero recubierta de cobre Ver propiedades de los diferentes materiales			
Marque la casilla de verificación si existe una capa superficial. <input type="checkbox"/>	Resistividad ( $\Omega m$ )		Espesor h, (cm)	
	100		15	
Conductor a utilizar en la malla de puesta a tierra	Área ( $mm^2$ )	Calibre	Díámetro (m)	
	0,50	2/0 AWG	0,0093	
Geometría de la malla <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="radio"/> Cuadrada	Largo (m)	247	Longitud Conductor Horizontal (m)
	<input type="radio"/> Rectangular	Ancho (m)	156	14898
	<input type="radio"/> En forma de L	L1 (m)	0	Longitud total varillas (m)
		L2 (m)	0	
		Lado de Cuadrícula (cm)	528	Longitud del perímetro (m)
		Número de varillas	40	
	Longitud de varilla (cm)	517		
Profundidad de enterramiento de la (cm)	m	83	Área de la malla ( $m^2$ )	
			36692	
<h3 style="text-align: center;">CÁLCULO DE TENSIONES DE PASO Y CONTACTO MÁXIMAS PERMITIDAS</h3>				
Tensión de contacto tolerable	786	Persona de 70 kg		
Tensión de paso tolerable	1,036			
<h3 style="text-align: center;">CÁLCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA</h3>				
Resistencia de Puesta a Tierra ( $\Omega$ )	0,02			
<h3 style="text-align: center;">CÁLCULO DE TENSIONES EN CASO DE FALLA</h3>				
Máximo potencial de tierra GPR (V)	4			
Tensión de malla en caso de falla (V)	0			
Tensión de paso en caso de falla (V)	0			
El GPR es menor que la tensión de contacto tolerable?	<b>OK!!! Su diseño ha sido exitoso.</b>			
La tensión de malla en caso de falla es menor que la tensión de contacto tolerable?	<b>OK!!! La tensión de malla cumple</b>			
La tensión de paso en caso de falla es menor que la tensión de paso tolerable?	<b>OK!!! La tensión de paso cumple.</b>			
La resistencia obtenida es menor a la resistencia objetivo?	<b>OK!!! Su diseño ha sido exitoso</b>			



### 3.3.1 DESCRIPCION DEL PROGRAMA

Primeramente en nuestro programa aparecen unas pequeñas casillas para poner nuestros datos de que características o uso se le va a dar a nuestra malla de puesta a tierra.

Por ejemplo en la casilla de abajo se debe escoger si nuestra malla es para uso en: subestaciones de alta o extra alta tensión, subestaciones de media tensión en poste ó subestaciones de media tensión de uso interior

Resistencia Objetivo menor a .....( $\Omega$ )	10	Subestaciones de media tensión en poste. ▾
		Subestaciones de alta y extra alta tensión.
		Subestaciones de media tensión en poste.
		Subestaciones de media tensión de uso interior.

Nosotros escogeremos para subestaciones de media tensión de uso interior, en lo cual a nuestro lado izquierdo aparecerá un valor de 5 en la casilla de resistencia objetivo menor a .....( $\Omega$ )

En el segundo paso escogeremos la resistencia aparente del terreno, esto lo haremos mediante una tabla de suelos y sus resistividades de la Pág. 33, para el ejemplo simularemos que nuestra malla va estar en un terreno de humus lo cual nos da una resistividad de 10  $\Omega$ -m

Resistividad aparente del terreno ( $\rho$ )	10	<     >
--	----	---------

Para la Corriente de falla monofásica a tierra en el primario vamos a la tabla de la pag.25, simularemos que usamos un cable 12AWG por lo que tendremos una corriente de 155, y tendremos un Tiempo de despeje de la falla de 80 ms

Corriente de falla monofásica a tierra en el primario $I_o$ (A)	150	<     >
Tiempo de despeje de la falla $t_c$ (ms)	80	<     >

Para el material a utilizar en la puesta a tierra tenemos varias opciones como son: cobre blando, cobre duro en soldaduras, cobre duro en conexiones mecánicas con presión, alambre de acero recubierto de cobre, varilla de acero recubierto de cobre, varilla de acero galvanizada., nosotros escogeremos varilla de acero recubierto de cobre.

Material a utilizar en la puesta a tierra, con temperatura ambiente de 40°C	Varilla de acero recubierto de cobre ▾
	Cobre blando
	Cobre duro cuando se utiliza soldadura exotérmica
	Cobre duro cuando se utilizan conexiones mecánicas a presión
	Alambre de acero recubierto de cobre
	Varilla de acero recubierto de cobre
	Varilla de acero galvanizada

Después tenemos una opción de agregar un valor adicional de resistividad cuando el terreno presenta alguna capa superficial, en lo cual tenemos la

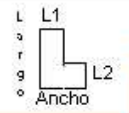
opción de dar el espesor de dicha capa, para el ejemplo no pondremos una capa adicional para así tener la resistividad inicial.

Marque la casilla de verificación si existe una capa superficial. <input type="checkbox"/>	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	▲	▼	Espesor $h_s$ (cm)
	50			0

Con los datos anteriores tenemos como resultado el área, calibre y diámetro del conductor a utilizar en nuestra malla de puesta a tierra

Conductor a utilizar en la malla de puesta a tierra	Área ( $mm^2$ )	Calibre	Diámetro (m)
	0,94	2/0 AWG	0,0093

En la siguiente parte el programa nos da la opción de escoger la forma de nuestra malla ya sea esta cuadrada, rectangular o en "L", escogeremos cuadrada y pondremos en la parte derecha la longitud tanto de largo como de ancho en metros, y escogeremos una longitud de 300cm de lado de cuadrícula, para una profundidad de enterramiento de 70cm, lo cual nos da como resultado una longitud de conductor horizontal de 27m, un perímetro de 10m y una área de malla de  $25m^2$

Geometría de la malla	<input checked="" type="radio"/>	Cuadrada	Largo (m)	5	<     >	Longitud Conductor Horizontal (m)	
	<input type="radio"/>	Rectangular	Ancho (m)	5	<     >	27	
	<input type="radio"/>	En forma de L	L1 (m)	0	<     >	Longitud total varillas (m)	
			L2 (m)	0	<     >	0	
			Lado de Cuadrícula (cm)	300	<     >	Longitud del perímetro (m)	
		<input type="checkbox"/>	Marque la casilla si la PT tiene Varillas	Número de varillas	0	<     >	20
				Longitud de varilla (cm)	0	<     >	
Profundidad de enterramiento de la malla (cm)		▲	70	▼	Área de la malla ( $m^2$ )	25	

Para los valores de tensión de paso y de contacto el programa esta con los valores definidos para cada persona dependiendo de su peso por ejemplo para una persona de 50Kg o menos, tenemos:

Tensión de contacto tolerable	416	Persona de 50 kg
Tensión de paso tolerable	435	

Y para una persona de 70Kg o mas se tiene.

Tensión de contacto tolerable	563	Persona de 70 kg
Tensión de paso tolerable	588	

Con todos los datos anteriores se tiene como resultado lo siguiente:

<b>CÁLCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA</b>		
Resistencia de Puesta a Tierra ( $\Omega$ )	<u>1,10</u>	
<b>CÁLCULO DE TENSIONES EN CASO DE FALLA</b>		
Maximo potencial de tierra GPR (V)	<u>313</u>	
Tensión de malla en caso de falla (V)	<u>87</u>	
Tensión de paso en caso de falla (V)	<u>52</u>	
El GPR es menor que la tensión de contacto tolerable?	<b><u>OK!!! Su diseño ha sido exitoso.</u></b>	
La tensión de malla en caso de falla es menor que la tensión de contacto tolerable?	<b><u>OK!!! La tensión de malla cumple</u></b>	
La tensión de paso en caso de falla es menor que la tensión de paso tolerable?	<b><u>OK!!! La tensión de paso cumple.</u></b>	
La resistencia obtenida es menor a la resistencia objetivo?	<b><u>OK!!! Su diseño ha sido exitoso</u></b>	

Una resistencia de 1.10  $\Omega$  la cual es aceptable ya que para que una puesta a tierra sea buena esta debe tener una resistencia menor a 5  $\Omega$ , además el programa nos da la aprobación de la malla con la frase su diseño ha sido exitoso, si este no es el caso tendremos una frase de verificación de datos.

## **CAPÍTULO 4**

### **MANTENIMIENTO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA.**

#### **4.1 MANTENIMIENTO DE MALLAS 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.

#### **4.2 MANTENIMIENTO DE PUESTAS A TIERRA SEGÚN SU INSTALACION.**

##### **4.2.1 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.

#### **4.2.2 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.

#### **4.2.3 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.

#### **4.2.4 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.

#### **4.2.5 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 sistema 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.

#### **4.2.6 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.

#### **4.2.7 SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN INDUSTRIAL 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.

### 4.3 MEDICION DE LA IMPEDANCIA DE ELECTRODOS DE TIERRA

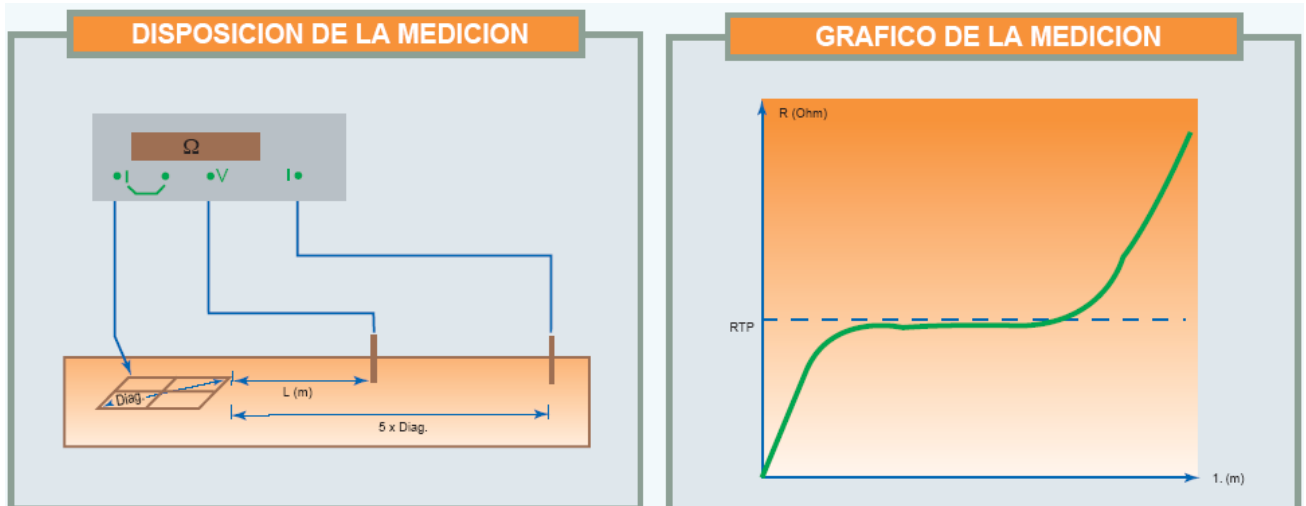
La medida del valor óhmico de un electrodo enterrado se realiza por dos razones:

- 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 Nº 30**



#### **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.



# CONCLUSIONES

Una buena protección a tierra nos ayuda a evitar tensiones peligrosas entre estructuras, equipos y el terreno durante cortocircuitos a tierra también evitamos descargas eléctricas peligrosas en las personas, durante condiciones normales de funcionamiento.

De igual manera existe una protección a los equipos e instalaciones contra tensiones peligrosas y evitamos que durante la circulación de falla a tierra, se produzcan diferencias de potencial entre distintos puntos de la instalación, proporcionando para esto, un circuito de muy baja impedancia para la circulación de estas corrientes.

Para las instalaciones de mallas debe tener un camino efectivo de puesta a tierra desde circuitos, equipos y cubiertas y debe ser permanente y continuo, garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos, tener suficiente capacidad de corriente para transportar con toda seguridad, cualquier corriente de falla que pueda circular por él, tener una impedancia lo suficientemente baja para limitar el potencial respecto a tierra y asegurar el funcionamiento de los dispositivos de sobrecorriente del circuito, evitar ruidos eléctricos, ser resistente a la corrosión, tener un costo lo más económico posible.

Sin embargo existen ciertos tipos de suelos o terrenos en los cuales sus resistividad es muy alta o a su vez demasiada baja con lo cual se debe cambiar y pueden ser cambiados en su totalidad, por terreno rico en sales naturales; cuando ellos son rocosos, pedregosos, calizas, granito, etc., que son terrenos de muy alta resistividad y pueden cambiarse parcialmente cuando el terreno está conformado por componentes de alta y baja resistividad; de modo que se supriman las partes de alta resistividad y se reemplacen por otros de baja resistividad; uno de estos procedimientos es el zarandeo del terreno donde se desechan las piedras contenidas en el terreno.

## RECOMENDACIONES

Es recomendable antes de realizar cualquier malla de puesta a tierra hacer una medición de la resistividad del terreno y se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación, sistema electrónico, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia. Asimismo puede ser empleada para indicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas. En este punto es necesario aclarar que la medición de la resistividad del terreno, no es requisito para hacer una malla de puesta a tierra. Aunque para diseñar un sistema de tierras de gran tamaño, es aconsejable encontrar el área de más baja resistividad para lograr la instalación más económica.

Además si la resistividad del terreno es demasiado elevada es recomendable bajar la resistividad y existen distintos métodos para lograr la reducción de la resistencia eléctrica, aunque todos ellos presentan un punto de saturación que es conveniente conocer para evitar diseños antieconómicos. Los métodos para la reducción se logran con el aumento del número de electrodos en paralelo, el aumento de la longitud y diámetro de los electrodos, el aumento de la distancia entre ejes de los electrodos, el cambio del terreno existente por otro de menor resistividad y el tratamiento químico electrolítico del terreno.

## Bibliografía

1. Gerencia Tecnica, Transener S.A. Guia de diseño y normas para puesta a tierra de estaciones transformadoras. Argentina
2. Casas Ospina, Favio. Tierras Soporte de la Seguridad Electrica Segunda Edicion. Bogota. D.C. Junio del 2003
3. IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80-1986).IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding . Approved 30 January 2000
4. Noriega Stefanova, Ernesto. Metodologia para el diseño de sistema de puesta a tierra en líneas y subestaciones para tensiones intermedias. Tesis presentada en opción al grado científico de Master en Ingenieria Electrica.
5. UNESA, Unidad Electrica, S.A. Comité de distribución y comisión de reglamentos. Metodo de calculo y proyectos de instalaciones de puesta a tierra para centros de transformación conectados a redes de tercera categoría. 1989
6. Norma Española ITC MIE-RAT 13. Instalaciones de puesta a tierra.
7. Granero, Andres. Centro de formación Schneider. Medidas y vigilancia de las instalaciones de puesta a tierra. Mayo 2001
8. [http://www.procobreperu.org/c\\_mallas.pdf](http://www.procobreperu.org/c_mallas.pdf)
9. <http://www.monografias.com/trabajos21/mallas-de-tierra/mallas-de-tierra.shtml>
10. <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html>
11. <http://www.monografias.com/trabajos15/mantenimiento-industrial/mantenimiento-industrial.shtml>
12. [www.mipagina.cantv.net/micerinos/mantenimiento.htm](http://www.mipagina.cantv.net/micerinos/mantenimiento.htm)  
wikipedia.org/wiki/Mantenimiento
13. [http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos\\_02\\_03/Proteccion\\_contra\\_descargas\\_atmosfericas/12/12.htm](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/Proteccion_contra_descargas_atmosfericas/12/12.htm)

ANEXOS

Tabla. Tamaño nominal mínimo de los conductores de tierra para canalizaciones y equipos

Tamaño nominal mm<sup>2</sup> (AWG o kcmil)

Capacidad o ajuste máximo del dispositivo automático de protección contra sobrecorriente en el circuito antes de los equipos, canalizaciones, etc. (A)	Cable de cobre en mm <sup>2</sup> (AWG)	Cable de aluminio mm <sup>2</sup> (AWG)
15	2,082 (14)	-----
20	3,307 (12)	-----
30	5,26 (10)	-----
40	5,26 (10)	-----
60	5,26 (10)	-----
100	8,367 (8)	13,3 (6)
200	13,3 (6)	21,15 (4)
300	21,15 (4)	33,62 (2)
400	33,62 (2)	42,41 (1)
500	33,62 (2)	53,48 (1/0)
600	42,41 (1)	67,43 (2/0)
800	53,48 (1/0)	85,01 (3/0)
1000	67,43 (2/0)	107,2 (4/0)
1200	85,01 (3/0)	126,7 (250)
1600	107,2 (4/0)	177,3 (350)
2000	126,7 (250)	202,7 (400)
2500	177,3 (350)	304 (600)
3000	202,7 (400)	304 (600)
4000	253,4 (500)	405,37 (800)
5000	354,7 (700)	608 (1200)
6000	405,37 (800)	608 (1200)

**TABLA DE LA CAPACIDAD NOMINAL DE PROTECCIÓN DE  
LOS CONDUCTORES vs CALIBRE DEL MISMO**

Capacidad nominal de la protección en amperios	Calibres de conductores de cobre		Capacidad de corriente en falla *	Factor K **	Sobrecarga permitida	Capacidad según tabla 310-16 ***
	AWG	kcmil				
20	12	6530	155	7.7	125%	25
30	10	10380	246	8.2	117%	35
40	10	10380	246	6.1	88%	35
60	10	10380	246	4.1	58%	35
100	8	16510	391	3.9	50%	50
200	6	26240	621	3.1	33%	65
400	3	52620	1,245	3.1	25%	100
600	1	83690	1,981	3.3	22%	130
800	1/0	105600	2,499	3.1	19%	150
1000	2/0	133100	3,150	3.2	18%	175
1200	3/0	167800	3,972	3.3	17%	200
1600	4/0	211600	5,008	3.1	14%	230
2000	250 kcmil	250000	5,917	3.0	13%	255
2500	350 kcmil	350000	8,284	3.3	12%	310
3000	400 kcmil	400000	9,467	3.2	11%	335
4000	500 kcmil	500000	11,834	3.0	10%	380
5000	700 kcmil	700000	16,568	3.3	9%	460
6000	800 kcmil	800000	18,935	3.2	8%	490

## TIPOS DE SUELOS Y SUS RESISTIVIDADES

NATURALEZA DEL TERRENO	Resistividad en $\Omega \cdot m$
Terrenos Pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba Húmeda	5 a 100
Arcilla Plástica	50
Marga y Arcillas Compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena Arcillosa	50 a 500
Arena Silícea	200 a 300
Suelo Pedregoso Cubierto de Césped	300 a 500
Suelo Pedregoso Desnudo	1,500 a 3,000
Calizas Blandas	100 a 300
Calizas Compactas	1,000 a 5,000
Calizas Agrietadas	500 a 1,000
Pizarras	50 a 300
Roca de Mica o Cuarzo	500 a 5000
Granito y Gres procedentes de Alteraciones	1,500 a 10,000
Roca Ígnea	5,000 a 15,000