



# Diseño de redes de tierra en subestaciones eléctricas. Materiales y fórmulas más utilizadas

J. Raull-Martín

*Departamento de Ingeniería Eléctrica de Potencia, Facultad de Ingeniería, UNAM*

(recibido: julio de 1996; aceptado: marzo de 2000)

## Resumen

El propósito de este artículo es presentar de manera resumida los diferentes tipos de construcción de los sistemas de tierra, así como sus materiales y fórmulas, los cuales son necesarios y útiles para el diseño y edificación de una red de tierra para instalaciones de mediana y alta tensión. Se describe también la obtención de las diferentes resistividades que presentan los terrenos con diversas características físicas. Asimismo, se solucionan ejercicios ilustrativos a lo largo del artículo.

Descriptores: redes de tierra, subestaciones eléctricas, conductores, conectores, electrodos.

## Abstract

*The purpose of this paper is to present a summarized version of the different types of construction of grounding systems, as well as their materials and formulas, which are necessary and useful for the design and building of a grounding network for medium to high voltage facilities. A description is also made of how to determine the electrical resistivity of subsoil layers with different physical characteristics. Several illustrative examples are also solved in the paper.*

*Keywords: grounding networks; electric substations; conductors; connectors; electrodes.*

## Introducción

Las redes de tierra de los sistemas eléctricos de potencia, deben satisfacer las siguientes funciones:

1. Descargar las sobretensiones originadas por descargas atmosféricas u operación de interruptores.
2. Proporcionar un camino de baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra, sin exceder los límites de operación de los equipos.
3. Evitar que, al circular la corriente de tierra durante las condiciones de cortocircuito, se puedan producir diferencias de voltaje entre diferentes puntos de la subestación, lo cual signifique un peligro para el personal.

4. Facilitar mediante sistemas de relevadores o microprocesadores la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos.
5. Ofrecer mayor continuidad y confiabilidad al sistema eléctrico de que se trate.

## Definición

Se puede designar con el nombre de sistemas de tierra, al conjunto de cables desnudos instalados en forma subterránea que se interconectan entre sí por medio de conectores y electrodos, y que junto con la tierra circundante provoca la dispersión de las corrientes de cortocircuito, sin permitir que dentro de la instalación eléctrica se presenten voltajes de magnitud peligrosa para el personal que labora en la zona.

A la red de tierra se deben conectar: los neutros de los transformadores, los pararrayos, la red aérea de hilos de guarda que protegen la subestación de los rayos directos, las estructuras metálicas, tanques, y en general, todas las partes metálicas de la instalación que deben estar al potencial de tierra.

### Elementos de una red de tierra

Los elementos que componen una red de tierra son los siguientes:

- 1) Conductores
- 2) Conectores
- 3) Electrodo

#### Conductores

Los conductores utilizados en la red de tierra son de cable de cobre de calibre superior al de 4/0 AWG, dependiendo del tipo de red que se utilice. Se escoge el calibre mínimo de 4/0 en cobre, por razones mecánicas, ya que eléctricamente pueden usarse cables hasta del número 2 AWG.

Se utiliza cobre por tener mejor conductividad y sobre todo por su resistencia a casi todos los tipos de corrosión, debido a que es catódico con respecto a la mayor parte de los metales.

#### Conectores

Son los elementos que sirven para conectar a los cables de tierra los electrodos profundos, las estructuras, los neutros de los bancos de transformadores, la red aérea de hilos de guarda, etc.

Los conectores utilizados son de tres tipos y deben poder soportar la corriente máxima de la tierra sin fundirse:

- a) Conectores atornillados
- b) Conectores a presión
- c) Conectores soldados

a) Los *conectores atornillados* están formados por dos piezas de bronce que se unen por medio de tornillos de bronce al silicio, los cuales proporcionan alta resistencia mecánica y a la corrosión. Soportan temperaturas máximas de 250°C.

b) Estos *conectores a presión* están formados por una pieza metálica hueca, en cuyos extremos se introducen las dos puntas del cable que se va a empalmar. Y mediante una prensa hidráulica, con dados intercambiables, según los

calibres de los conductores, se produce la unión al comprimirse el material citado. Estas conexiones soportan temperaturas máximas de 350°C. Estos conectores son más económicos que los atornillados.

c) Los *conectores soldados* (tipo "cadweld") requieren de moldes de grafito de diferentes calibres, en donde por medio de la combustión de cargas especiales se producen temperaturas muy altas, se funden las puntas terminales del cable que se va a soldar produciendo una unión que soporta la temperatura de fusión del conductor. Estos conectores son económicos y seguros; asimismo, soportan temperaturas de 250°C en forma continua.

Los conectores para tierras son de muy diversas formas y calibres, según los catálogos de los fabricantes. Entre los más utilizados figuran los siguientes tipos, conexiones T, +, de electrodo a cable, de cable a estructura, conexión de zapata, de varilla a placa, etc.

#### Electrodos

Son los tubos de hierro galvanizado o varillas que se clavan en el terreno donde se instala la red de tierra y que sirven para incrementar la longitud total de la misma en terrenos pequeños, o para encontrar zonas más húmedas en terrenos secos y sin vegetación, expuestos al sol. Los tubos de hierro galvanizado son más económicos, pero su uso se restringe a terrenos cuya constitución química no ataque a dicho material.

En terrenos con constituyentes más corrosivos se utilizan varillas de hierro enfundados en una envoltura de lámina de cobre perfectamente adherida al metal base. Este material combina las ventajas de la alta conductividad y baja corrosión del cobre con la alta resistencia mecánica del hierro. Estas varillas son de unos 3 metros de largo, se clavan en el terreno y se conectan a la red de cable de cobre a través de los conectores electrodo-cable correspondientes.

#### *Electrodos en concreto*

Las cimentaciones y estructuras de concreto enterradas, permanecen húmedas debido a que el concreto es hidróscópico, produciendo una conductividad interna entre 25 y 40 ohm-metro. Estas estructuras cuando se constituyen en terrenos con resistividades entre media y alta, provocan que parte de la corriente de tierra se derive a través de las varillas o electrodos colados dentro del concreto, los cuales presentan un camino de menor resistencia que la red de tierra en sí.

En la superficie de contacto entre el acero y el concreto, si se conectan las varillas a la red de tierra, se produce una

pequeña rectificación de la corriente alterna de aproximadamente 0.01% que circula por la red de tierra, lo cual ocasiona, además de corrosión galvánica, un aumento de volumen en la superficie de las varillas del orden de unas dos veces, esto a su vez, provoca un incremento en la presión del acero sobre el concreto del orden de unas 5000 lb/pg<sup>2</sup> desmoronando el concreto en las zonas correspondientes; se considera que hasta en un límite de 60 volts de corriente directa no existe el peligro de corrosión.

En una red de tierra conviene clavar los electrodos en las esquinas del rectángulo y a continuación en cada tercera conexión sobre el perímetro de la malla. En especial, se debe aumentar la cantidad de electrodos en las zonas que rodean al equipo importante como transformadores, interruptores y pararrayos de estación; asimismo, disminuir la densidad de la corriente de tierra. La profundidad de una red de tierra puede variar entre 20 y 120 cm, siendo lo más común unos 40 cm, con una separación entre conductores para iniciar el diseño de una red de unos 10 metros.

En el caso de subestaciones que por causas de fuerza mayor sólo cuentan con superficies pequeñas de terreno, como pueden ser las de exafluoruro de azufre, hay que considerar altas densidades de corriente, y por lo tanto, altos gradientes de voltaje, lo cual obliga a seguir las reglas, siguientes:

1. Aumentar el diámetro o longitud de los electrodos.
2. Utilizar algunos electrodos remotos.
3. Conectar la red de tierra principal a pequeñas redes instaladas en zonas próximas.
4. Perforar agujeros en tierra o roca, para introducir electrodos profundos.
5. Conectar la red a tuberías de pozos profundos.
6. Conectar la red de tierra a los hilos de guarda, con bajadas en las torres próximas.
7. Mediante tratamiento químico previo del terreno en cuestión, mediante la adición de cualquiera de las siguientes sustancias:

\* Cloruro de sodio (sal común). No es recomendable por ser muy corrosivo, sobre todo para el Fe.

\* Sulfato de cobre. Es el que más se utiliza.

\* Carbón o grafito. Son materiales de muy baja resistencia eléctrica.

\* Bentonita. Es el mejor de todos, no es corrosivo, tiene una resistividad de 2.5 ohm-mt, que resulta de un proceso electrolítico entre sus elementos, que son: agua, sodio, potasio, calcio y magnesio que al ionizarse abaten la resistividad del terreno. Es muy higroscópica, en áreas secas tiene la propiedad de autosellarse y no perder agua, más bien la absorbe de las cercanías, manteniendo la cantidad de agua necesaria. Para inyectar la bentonita se acostumbra perforar un hoyo entre 15 y 25 cm de diámetro, en el cual se centra el electrodo y después se rellena con bentonita.

### *Electrodos aéreos*

Son los electrodos que se instalan sobre la parte más elevada de las estructuras de una subestación, que complementan la red de cables de guarda de la misma contra las descargas directas de los rayos.

Los electrodos se pueden fabricar con tramos de tubo galvanizado de unos 40 mm de diámetro y 3 m de largo, y terminarlos en bisel en su parte superior para producir efecto de punta.

Debido a que las descargas de los rayos son de alta frecuencia, se recomienda que las terminales de descarga de los cables de guarda, así como las de los pararrayos deben tener como mínimo el calibre de los cables de la red de tierra para atenuar el reflejo de ondas que generan un incremento en la amplitud de la onda de choque.

En resumen, la sección del cable de conexión a tierra de los pararrayos debe ser mayor que el obtenido a partir de las fórmulas:

$$A = 24 + 0.4V_n \text{ para conductor de cobre}$$

$$A = 40 + 0.6V_n \text{ para conductor de aluminio}$$

en donde:

$$A = \text{Área del conductor en mm}^2$$

$$V_n = \text{Tensión nominal del sistema en Volts.}$$

### **Disposición de la red de tierra**

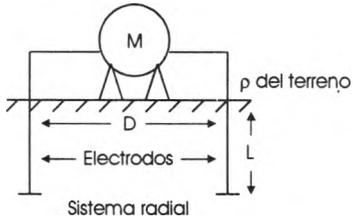
Para las redes de tierra se pueden considerar tres sistemas:

1. Sistema radial
2. Sistema de anillo
3. Sistema de malla

#### **Sistema radial**

Consiste en uno o varios electrodos, a los cuales se conectan las derivaciones de cada aparato.

Para usar un solo electrodo la resistencia a tierra se puede calcular con la expresión:



$$R_T = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{4L}{d}\right) - 1 \right]$$

Donde:

$R_T$  = Resistencia del terreno en ohm.

$\rho$  = Resistividad del terreno en ohm-cm.

$L$  = Longitud del electrodo en cm.

$d$  = Diámetro del electrodo en cm.

Para el caso de utilizar dos electrodos separados una distancia  $D$  y con diámetros iguales a  $d$  se pueden utilizar las dos expresiones

$$\text{Si } D > L \quad R_T = \frac{\rho}{4\pi L} \left[ \ln\left(\frac{4L}{d}\right) - 1 \right] + \frac{\rho}{4\pi D} \left( 1 - \frac{L^2}{3D^8} + \frac{2L^4}{5D^4} \dots \right)$$

$$\text{Si } D < L \quad R_T = \frac{\rho}{4\pi L} \left[ \ln\left(\frac{4L}{d}\right) + \ln\left(\frac{4L}{D}\right) - 2 + \frac{D}{2L} - \frac{D^2}{16L^2} + \dots \right]$$

En el caso de que  $D > L$  la  $R_T$  es menor.

El sistema radial es el más económico, pero el menos seguro, ya que produce altos gradientes de potencial. Se utiliza en lugares con corrientes de tierra bajas.

Ejemplos:

1. Encontrar la resistencia a tierra de un sistema radial con un solo electrodo a partir de los siguientes datos:

$\rho = 100\,000 \text{ ohm-cm}$

$L = 300 \text{ cm}$

$d = 1.9 \text{ cm}$

Solución:

$$R_T = \frac{100\,000}{2 \cdot 3.14 \cdot 300} \left[ \ln\left(\frac{4 \cdot 300}{1.9}\right) - 1 \right]$$

$$R_T = 53.05 [\ln(631.6) - 1]$$

$$R_T = 289.03 \text{ ohm.}$$

2. Encontrar la resistencia a tierra de un sistema radial con dos electrodos a partir de los siguientes datos:

$\rho = 100\,000 \text{ ohm-cm}$

$L = 300 \text{ cm}$

$d = 1.9 \text{ cm}$

$D = 220 \text{ cm}$

Solución:

En este caso  $D < L$ .

$$R_T = \frac{100\,000}{4 \cdot 3.14 \cdot 300} \left[ \ln\left(\frac{4 \cdot 300}{1.9}\right) + \ln\left(\frac{4 \cdot 300}{220}\right) - 2 + \frac{220}{2 \cdot 300} - \frac{220^2}{16 \cdot 300^2} \right]$$

$$R_T = 26.54 [\ln(631.57) + \ln(5.45) - 1.67]$$

$$R_T = 2654 [6.44 + 1.69 - 1.67]$$

$$R_T = 2654 [6.477]$$

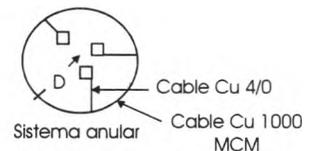
$$R_T = 171.89 \text{ ohm.}$$

Sistema de anillo

Se obtiene mediante la instalación de un cable de cobre de grueso calibre (aproximadamente de 1000 MCM) alrededor de la superficie ocupada por el equipo de la subestación, conectando derivaciones a cada aparato, mediante un cable más delgado (4/0 Awg). Si el anillo tiene ángulos, conviene conectar electrodos en sus vértices.

En este sistema la resistencia a tierra se puede calcular mediante la expresión:

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi D} \left[ \ln\left(\frac{8D}{d}\right) + \frac{8D}{H} \right]$$



En donde:

$d$  = Diámetro del cable del anillo (1000 MCM).

$H$  = Profundidad del cable en el terreno, en metros.

$D$  = Longitud del radio del anillo en centímetros.

Este sistema es menos económico que el anterior. Las corrientes de cortocircuito se disipan por varios caminos, por lo tanto, los gradientes de potencial son menores. Se utiliza en lugares donde se tienen corrientes de cortocircuito intermedias.

Ejemplo:

Obtener la resistencia a tierra de un sistema en anillo, a partir de los siguientes datos:

$$\rho = 100\,000 \text{ ohm-cm}$$

$$d = 2.69 \text{ cm (cable de 1000 MCM)}$$

$$H = 50 \text{ cm}$$

$$D = 3\,200 \text{ cm (aproximadamente una subestación de } 50 \times 50 \text{ m)}$$

$$R_T = \frac{100\,000}{2 \cdot 3.14 \cdot 3\,200} \left[ \text{Ln} \left( \frac{8 \cdot 3\,200}{2.69} \right) + \frac{8 \cdot 3\,200}{50} \right]$$

$$R_T = 4.98 [9.16 + 512]$$

$$R_T = 2.595 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$R_T = 4.98 [\text{Ln}(9516.72) + 512]$$

Sistema de malla

Consiste en enterrar una retícula formada por cable de cobre de aproximadamente 4/0 AWG, conectada a través de electrodos de "copperweld" a zonas más profundas, para buscar partes de terreno más húmedas y de menor resistividad.

Este sistema es el más utilizado en subestaciones por ser más eficiente que los dos anteriores, aunque más costoso.

La resistencia de una red de tierra de una subestación de potencia debe ser menor de 1 ohm mientras que en una de distribución debe ser menor de 5 ohm.

Según las características físicas de un terreno, la resistencia de la red puede obtenerse por alguno de los tres métodos siguientes:

Primero: en terrenos de resistividad prácticamente uniforme y con la profundidad de la malla menor de 30 cm, se puede utilizar la fórmula:

$$R_T = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{Lm}$$

en que la L puede ser la longitud total de los conductores de la malla, no se considera el uso de electrodos. Es el método clásico o simplificado.

En donde:

$R_T$  = Resistencia de la red, en ohm.

$\rho$  = Resistividad promedio del terreno, en ohm-metro.

$r$  = Radio del círculo de igual área que la ocupada por la red en metros.

$Lm$  = Longitud total de los conductores de la red, en metros.

Esta fórmula puede servir para el diseño de una red, partiendo de un valor arbitrario de  $Lm$ .

Segundo: para profundidades mayores, entre 0.3 y 2.5 metros se requiere de una corrección por profundidad, de acuerdo con la fórmula de Sverak

$$R_T = \frac{\rho}{Lm} + \frac{\rho}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right)$$

En donde:

$A$  = Área del terreno de la red en  $m^2$ .

$h$  = Profundidad de la red en metros.

Esta fórmula utiliza también una resistividad prácticamente uniforme.

Tercero: en terrenos con resistividades variables entre varios puntos, o bien en aquellos con 2 capas de características diferentes y por lo tanto de resistividades diferentes ( $\rho_1$  y  $\rho_2$ ) se puede utilizar la fórmula de Schwarz, que toma en cuenta la suma de las resistencias de todos los conductores de la malla, más la producida por la suma de las resistencias de todos los electrodos de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$R_T = \frac{RmRe - R^2me}{Rm + Re - 2Rme}$$

Los electrodos se distribuyen en el perímetro de la red, repartidos cada cinco conexiones, y además en las zonas de bancos de transformadores y pararrayos de estación, para una disipación rápida de la corriente de cortocircuito.

En que cada uno de los elementos se calculan así:

$$Rm = \frac{\rho_1}{\pi Lm} \text{Ln} \left( \frac{2Lm}{h_1} \right) + K_1 \left( \frac{Lm}{\sqrt{A}} - K^2 \right)$$

$$Re = \frac{\rho_a}{2n\pi Le} \left[ \text{Ln} \left( \frac{8Le}{de} \right) - 1 + 2K_1 \frac{Le}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$$

$$Rme = \frac{\rho_a}{\pi Lm} \left[ \text{Ln} \left( \frac{2Lm}{Le} \right) + K_1 \frac{Lm}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$\rho_a = \frac{Le\rho_1\rho_2}{\rho_2(H-h) + \rho_1(Le+h-H)}$$

En donde:

$R_m$  = Resistencia de la suma de todos los conductores de la malla, en ohm.

$R_e$  = Resistencia de la suma de todos los electrodos de tierra en ohm.

$R_{me}$  = Resistencia mutua entre los conductores de malla y los electrodos en ohm.

$\rho_1$  = Resistividad de la primera capa del terreno hasta la profundidad  $H$ .

$\rho_2$  = Resistividad de la segunda capa del terreno desde  $H$  hacia abajo en ohm-mt.

$\rho_a$  = Resistividad aparente vista por un electrodo en ohm-metro.

$L_m$  = Longitud total de los conductores de la malla en metros.

$L_e$  = Longitud total de los electrodos en metros.

$h$  = Profundidad de la red en metros.

$h_1$  = Coeficiente de profundidad de enterramiento para conductores enterrados a la profundidad  $h$ .

Para mallas superficiales  $h_1 = 0.5 d$ .

Para mallas tiradas sobre la superficie de la tierra  $h = 0$ .

$A$  = Área de la red en metros cuadrados.

$n$  = Número de electrodos en el área  $A$ .

$K_1$  y  $K_2$  = Factores de reflexión, se calculan con ecuaciones prácticamente lineales y dependen de la geometría del sistema ( $a$ ,  $b$  y  $h$ ).

$a$  = Longitud del lado corto de la malla.

$b$  = Longitud del lado largo de la malla.

$d_1$  = Diámetro del conductor de la malla.

$d_2$  = Diámetro de los electrodos.

$H$  = Grosor de la capa superior de tierra.

Las constantes de reflexión  $K_1$  y  $K_2$  se pueden obtener de las gráficas correspondientes, o bien, con poco margen de error se pueden considerar como líneas rectas definidas por las ecuaciones.

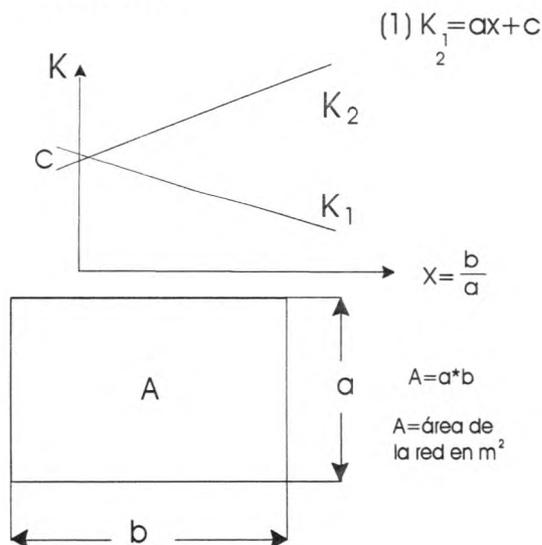


Tabla para obtener  $K_1$  y  $K_2$

Curva	h	$x = \frac{b}{a}$	ecuaciones	
			$K_1$	$K_2$
A	0	X	$-0.04X + 1.41$	$0.15X + 5.50$
B	$\frac{\sqrt{A}}{10}$	X	$-0.05X + 1.20$	$0.10X + 4.68$
C	$\frac{\sqrt{A}}{6}$	X	$-0.05X + 1.13$	$-0.05X + 4.40$

En la tabla, la curva A se utiliza cuando  $h = 0$ .

En la tabla, la curva B se utiliza cuando  $h$  se encuentra entre A y B.

En la tabla, la curva C se utiliza cuando  $h$  se encuentra entre B y C.

### Resistividad del terreno

La resistividad se puede obtener a partir del cálculo de la resistencia de un cubo de tierra de un metro en cada uno de sus tres ejes. Sabiendo que  $R_T = \rho L/A$  y despejando  $\rho$  se obtienen las unidades de ésta

$$\rho = R_T \frac{A}{L} = \text{ohm} \cdot \frac{1\text{m} \cdot 1\text{m}}{1\text{m}} = \text{ohm-metro}$$

En donde:

$R_T$  = Resistencia de la red de tierra en ohm.

$\rho$  = Resistividad del terreno en ohm-metro.

$A$  = Área de la sección transversal del cubo unitario.

$L$  = Longitud de una arista del cubo.

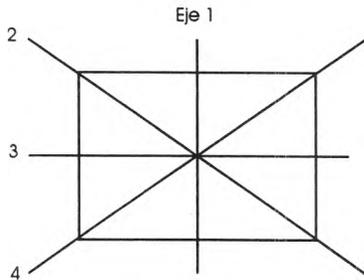
La medición de la resistividad se debe efectuar en época de secas ya que se tienen las peores condiciones, tomando una serie de mediciones hasta profundidades razonables que permitan detectar la homogeneidad de las capas del terreno.

La siguiente tabla muestra una idea aproximada de los valores medios de la resistividad de un terreno, aunque para un diseño real, las resistividades deben ser medidas con los aparatos adecuados.

Tipo de terreno	Resistividades ohm-metro
Agua de mar	$10^0$
Tierra orgánica mojada	$10^1$
Tierra húmeda	$10^2$
Tierra seca	$10^3$
Concreto	$10^3$
Roca	$10^4$

## Medición de la resistividad

La resistividad de un terreno se obtiene como el promedio de las mediciones efectuadas a lo largo de los 4 ejes indicados en la figura que representa la superficie de un terreno.



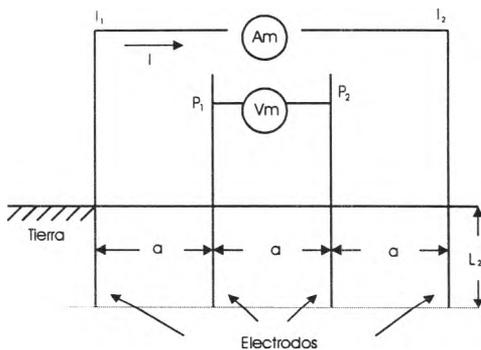
Si en los valores de resistividad medidos, las lecturas de resistividad varían menos de un 50% entre los valores más altos, y más bajos, se considera que la resistividad es uniforme y se puede utilizar el método sencillo de una capa, llamado método de Wenner o de 4 puntos. Por el contrario, si las lecturas extremas varían en más de 50% entonces se consideran dos resistividades diferentes, o sea, se utiliza el método de dos capas.

La medición de la resistividad en cada eje se acostumbra efectuar tomando las lecturas con separaciones variables entre los electrodos (1–1.5, 2–2.5 y 3m), y a profundidades de los electrodos constantes.

## Método de Wenner: una resistividad

En este caso se utiliza la fórmula:

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4L_2^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4L_2^2}}}$$



En donde:

- a = Separación entre electrodos en m.
- L<sub>2</sub> = Profundidad de los electrodos en m.
- ρ = Resistividad del suelo en ohm-metro.

R = Resistencia resultante de dividir el voltaje entre los electrodos P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub> entre la corriente que fluye a través de los electrodos I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub> en ohm.

Los dos electrodos exteriores I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub> se les conecta a la fuente de corriente del aparato y se mide la caída de voltaje que aparece entre los electrodos interiores P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub> y se obtiene R dividiendo el voltaje entre la corriente.

Para profundidades de los electrodos ligeramente menores a la separación entre ellos, la fórmula se presenta:

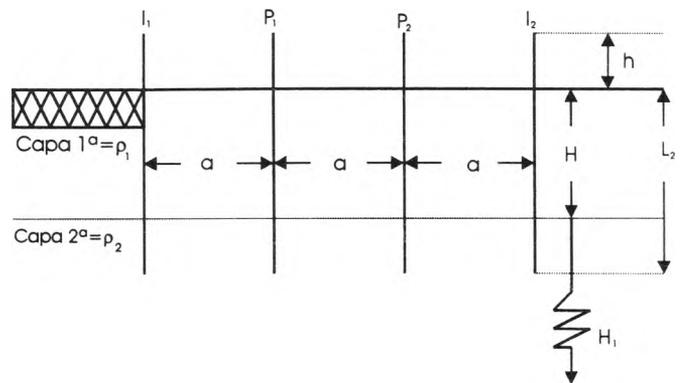
$$\rho = \frac{4\pi Ra}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4L_2^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + L_2^2}}}$$

En la práctica "a" puede llegar a ser hasta 10 veces L<sub>2</sub> (L<sub>2</sub> << a). En este caso la corriente circula por el terreno en forma superficial y en la fórmula L<sub>2</sub> → 0 se simplifica así:

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{1 + \frac{2a}{a} - \frac{a}{a}} \quad \text{o sea} \quad \rho = 2\pi Ra$$

## Método de dos resistividades

Este método de dos capas, se comporta en forma diferente que el anterior, aunque es más preciso.



- ρ<sub>1</sub> = Resistividad de la capa H en ohm-m.
- ρ<sub>2</sub> = Resistividad de la capa H<sub>1</sub> en ohm-m.
- ρ = Resistividad de Wenner en ohm-m.
- a = Separación entre electrodos en m.
- L<sub>2</sub> = Profundidad enterrada de los electrodos en m.

En la figura:

- R = Resistencia entre electrodos en ohm.
- H = Profundidad de la primera carga (p) en m.
- H<sub>1</sub> = Profundidad de la segunda carga (p) en m.
- K = Factor de reflexión.

## Observaciones:

1. Cuando  $\rho_1 < \rho_2$  la densidad de corriente es mayor en los conductores perimetrales de la malla, como sucede en el caso de una capa.
2. Cuando  $\rho_1 > \rho_2$  la densidad de corriente es prácticamente uniforme en todos los conductores de la red debido a que la corriente tiende a irse hacia la parte inferior del terreno por ser la de menor resistividad.
3. Cuando el grueso de la capa superior es mucho mayor que la longitud del electrodo ( $L_2$ ), o sea  $H \gg L_2$  se considera que la malla se comporta como si estuviera en un terreno de resistividad uniforme.
4. En subestaciones sencillas, con terrenos relativamente uniformes, se puede utilizar el método de una resistividad sin gran margen de error.

### Límites de corriente tolerables por el cuerpo humano

En instalaciones eléctricas, la conducción de altas corrientes a tierra, debidas a disturbios atmosféricos o a fallas del equipo, obligan a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos y las tensiones resultantes no ofrezcan peligro al personal que labora en el recinto. Intensidades del orden de miles de amperes producen gradientes de potencial elevados en la vecindad del punto de contacto a tierra, y si además se da la coincidencia de que algún ser viviente se apoye entre dos puntos entre los cuales exista una diferencia de potencial, debida al gradiente mencionado, puede sufrir una descarga eléctrica que sobrepase el límite de su contractibilidad muscular y provoque su caída.

En esta situación, la corriente que circula por el cuerpo aumenta, y si por desgracia ésta circula por algún órgano vital como el corazón, puede producir fibrilación ventricular y sobrevenir la muerte.

Los efectos más comunes de la corriente que circula a través del cuerpo humano dependen de la magnitud, duración y frecuencia de ésta.

De 1 a 2 mA

Es el umbral de percepción (hormigueo).

De 2 a 9 mA

Contracción muscular involuntaria, pero se pueden soltar los objetos.

De 9 a 25 mA

Dolor, no se pueden liberar los objetos agarrados.

De 25 a 60 mA

Se dificulta la respiración. Es el valor máximo que puede circular a través de un corazón sano.

De 60 a 100 mA

Produce fibrilación cardiaca y paro respiratorio.

Se pueden tolerar intensidades de corriente altas, sin originar fibrilación, si la duración es muy corta y las frecuencias menores de 25 Hz o con corriente directa.

La ecuación empírica que liga la intensidad de corriente tolerable y el tiempo que un organismo puede soportarlo está dada por la fórmula de Charles Delziel:

$$I_c^2 * t = 0.0135 \quad \text{o sea} \quad I_c = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

En donde:

$I_c$  = Valor efectivo de la corriente que circula por el cuerpo en amperes.

$t$  = Duración del choque eléctrico en segundos.

0.0135 = Constante empírica que representa los watts x segundo absorbidos por un cuerpo durante un choque eléctrico, para personas del orden de 50 kg de peso.

0.0246 = Constante empírica para personas del orden de 70 kg de peso.

Normalmente se utiliza la constante de 50 kg por ser el valor más crítico.

Ejemplos:

1. Qué corriente  $I_c$  permite un individuo de 50 kg durante 0.5 segundos, sin causar fibrilación

$$I_c = \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 164 \text{mA}$$

2. Qué corriente permite un hombre de 70 kg, para la misma duración del choque:

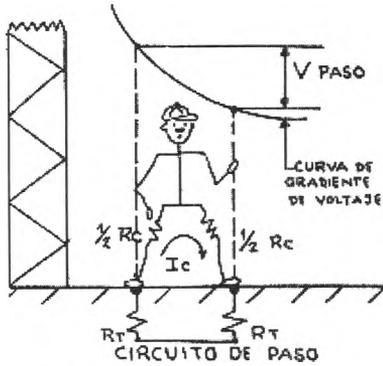
$$I_c = \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 222 \text{mA}$$

Lo que demuestra que a mayor peso de una persona, soporta mayores magnitudes de corriente.

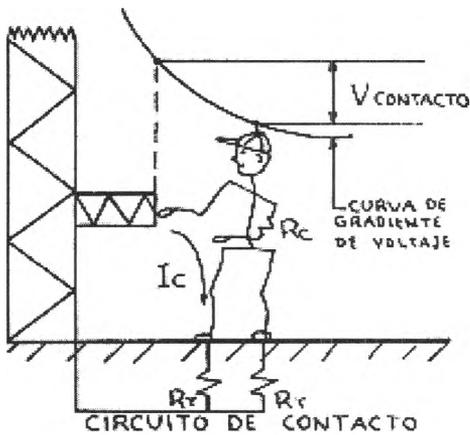
Las diferencias de potencial tolerables por un cuerpo, al hacer éste contacto con superficies metálicas que pueden estar a potenciales diferentes se determinan de acuerdo con los conceptos de tensión de paso y de contacto que se calculan a partir de los siguientes circuitos equivalentes:

La Fig. 1, muestra el circuito equivalente de la diferencia de tensión de un "paso", que se considera de 1m, mientras que la Fig. 2 muestra el circuito para un "contacto" entre una mano y los dos pies en paralelo, que

también se considera de 1m, en donde  $R_T$  es la resistencia del terreno inmediato debajo de cada pie y  $R_e$  es la resistencia del cuerpo, que es variable, pero se recomienda un valor promedio de 1000 ohm.



$$V_p = (R_c + 2R_T) I_c$$



$$V_c = (R_c + \frac{R_T}{2}) I_c$$

Para fines prácticos se considera que:

$$R_T = 3 \rho_s \text{ (para cada pie)}$$

En donde:

$\rho_s$  = Resistividad superficial que toca al pie, en ohm-m.

Sustituyendo las constantes apropiadas de los circuitos mencionados, e igualando con los valores tolerables de corriente indicados en la expresión (1) se obtiene el cálculo de los potenciales tolerables para el método de una capa.

$$V_{paso} = (R_c + 2R_T) * I_c = (1000 + 6\rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t}} \text{ volts}$$

$$V_{contacto} = (R_e + \frac{R_T}{2}) * I_c = (1000 + 1.5\rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t}} \text{ volts}$$

$$V_{malla} = K_m K_i \frac{I_{CC}}{L} \rho$$

El voltaje de malla ( $V_m$ ) es la diferencia de potencial, en Volt, del conductor de la malla al centro del rectángulo de ésta, ello en el momento de la falla.

En donde los coeficientes se obtienen a partir de las siguientes fórmulas:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} * L * \left( \frac{D^2}{16hd} \right) + \frac{1}{\pi} * L * \left( \frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} \dots etc. \right)$$

El número de factores del segundo término es igual al número de conductores longitudinales de la malla menos 2.

$K_i$  = Factor de irregularidad debido a que la corriente tiende a irse hacia la periferia de la red, y especialmente en las esquinas.

$n$  = Número de conductores longitudinales de la malla.

$$K_i = 0.65 + 0.172 * n$$

La ecuación que calcula el potencial de paso en la periferia de la malla es:

$$V_{paso} = K_s K_i \frac{i_{CC}}{L} \rho$$

en donde:

$K_s$  = Factor geométrico de la malla

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots etc \right]$$

El número de términos del paréntesis es igual al número de conductores transversales de la malla.

Para el método de dos capas se utiliza la siguiente pareja de ecuaciones, con los valores tolerados por el cuerpo humano.

$$V_{paso} = \frac{(1000 + 6C_s \rho_s) * 0.157}{\sqrt{t}} = \frac{157 + 0.70 * C_s \rho_s}{\sqrt{t}} \text{ (para 70 kg)}$$

$$V_{malla} = \frac{(1000 + 1.5C_s \rho_s) * 0.157}{\sqrt{t}} = \frac{157 + 3.42 * C_s \rho_s}{\sqrt{t}} \text{ (para 70 kg)}$$

En donde  $C_s$  se obtiene tomando en cuenta el factor  $K$  cuya fórmula se anota al final del artículo.

Factores de corrección que afectan las corrientes de cortocircuito

Básicamente son dos:

1) Factor de decremento  $D$  que toma en cuenta el efecto del desplazamiento de la corriente directa y que proporciona la magnitud del valor efectivo de la corriente senoidal, equivalente a la onda de falla asimétrica, para un tiempo  $T$  de duración de la falla, en segundos o en ciclos. En forma tabulada los valores de  $D$  son los siguientes:

Tabla de factores  $D$

Duración de la falla en:		$\frac{X'}{R}$			
Ciclos 60	Segundos $T$	10	20	30	40
0.5	0.008	1.58	1.65	1.67	1.69
3	0.05	1.23	1.38	1.46	1.52
6	0.10	1.13	1.23	1.32	1.38
12	0.20	1.06	1.12	1.18	1.23
18	0.30	1.04	1.08	1.12	1.16
>30	>0.50	1.03	1.03	1.04	1.05

Donde:

$X'$  = Reactancia subtransitoria en el punto de la falla (de valor  $R$ ).

Los valores más utilizados son  $\frac{X'}{R} = 20$

2) Factor de crecimiento ( $f_c$ ), que toma en cuenta el incremento de la corriente máxima de falla a tierra, debido al crecimiento final de la subestación. La corriente máxima que se utiliza en el cálculo de la red de tierra se obtiene por medio de la expresión:

$$I_m = D * f_c * I_{cc}$$

En donde:

$I_m$  = Corriente máxima de cortocircuito en amperes.

$D$  = Factor de decremento (obtener de la tabla).

$f_c$  = Factor de crecimiento.

$I_{cc}$  = Valor de la corriente de cortocircuito en el instante en que se inicia la falla.

Cada uno de los elementos de la red de tierra debe soportar la corriente de falla máxima, durante un tiempo prefijado, sin llegar a la fusión. Estos elementos incluyen los conductores de la malla, los conectores y los electrodos.

La ecuación que se utiliza para calcular la sección del conductor es la de Onderdonk:

$$I = A \sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{33 S}} \quad \text{o bien} \quad A = I \sqrt{\frac{33 S}{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}}$$

En donde:

$I$  = Corriente máxima que circula por la red de tierra en amperes.

$A$  = Sección de cobre en "circular mils".

$S$  = Tiempo durante el cual circula  $I$ , en segundos.

$T_m$  = Temperatura máxima en °C (se fija en 250°C por los conectores).

$T_a$  = Temperatura ambiente en °C.

La fórmula se puede vaciar en la tabla siguiente:

Calibres de cable de cobre

Tiempo que dura la falla (seg)	Circular mils por ampere		
	Cable solo	Uniones con soldadura de latón	Conectores
30	38.4	51	65
4	14.0	12.7	24
1	7.0	4.3	12
0.5	5.0	6.6	8.3

Cálculo del potencial de malla

Se parte de la misma expresión que en el caso de una capa, o sea:

$$V_m = K_m K_i \rho \frac{I_{cc}}{L}$$

pero con la diferencia de que los factores cambian su formulación a:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d}\right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln\left(\frac{8}{\pi(2n-1)}\right) \right]$$

En donde:

$$K_{ii} = 1 \text{ en mallas con electrodos } \begin{cases} \text{A lo largo del perímetro,} \\ \text{o en las esquinas, o} \\ \text{a lo largo del} \\ \text{perímetro y dentro.} \end{cases}$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{(2/n)}} \text{ en mallas } \begin{cases} \text{Sin electrodos,} \\ \text{o algunos} \\ \text{electrodos} \\ \text{dentro de la} \\ \text{malla y} \\ \text{ninguno en las} \\ \text{esquinas} \\ \text{o en el perímetro.} \end{cases}$$

$$n = \sqrt{B * A} \text{ (para el cálculo de } K_s \text{ y de } K_i \text{)} \begin{cases} \text{En mallas} \\ \text{rectangulares} \\ \text{con reticula} \\ \text{cuadrada.} \end{cases}$$

$$n = B \text{ (para el cálculo de } K_s \text{ y de } K_i \text{)} \begin{cases} \text{Se considera} \\ \text{el valor máximo} \\ \text{de A y B. Lo normal} \\ \text{es que B sea el mayor.} \end{cases}$$

A = Número de conductores longitudinales.

B = Número de conductores transversales.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \begin{cases} h = \text{profundidad de la malla en m.} \\ h_0 = 1 \text{ metro (profundidad} \\ \text{de referencia de la malla).} \end{cases}$$

$K_i = 0.656 + 0.172 * n$  Es la misma fórmula.

Cálculo del potencial de paso en la periferia de la malla

También se utiliza la misma expresión:

$$V_s = K_s K_i \rho \frac{I_{cc}}{L}$$

en donde:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{(n-2)}) \right]$$

cuando  $h$  varía entre 0.3 y 2.50 m y donde  $n$  es el mayor número de conductores de los dos ejes del rectángulo (transversales).

Si la profundidad  $h$  es menor de 0.3 m se utiliza la fórmula mencionada en el caso de una sola capa, o sea:

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

El valor del potencial de paso ( $V_s$ ) en la periferia de la malla, a través del factor  $K_s$ , depende de la profundidad de la malla y disminuye rápidamente a medida que se incrementa la profundidad de la red ( $h$ ).

Para mallas cuadradas, o sea  $A = B$  (igual número de conductores en ambas direcciones) debe considerarse: si  $n \leq 2.5$  la  $h$  debe escogerse entre 0.3 y 2.50 metros con  $d < 0.3h$  y  $D > 2.5$ .

Para mallas rectangulares con retícula cuadrada, para el cálculo de  $V_m$  se utiliza  $n = \sqrt{A * B}$  y para el cálculo de  $V_s$  se utiliza para la  $n$  de los factores  $K_s$  y  $K_i$  el valor máximo de los conductores ya sea el de A o el de B, aunque el número mayor suele ser el de B (transversales).

Cálculo de la longitud de los conductores

Para obtener en forma preliminar, la longitud mínima de los conductores de una malla que mantenga el potencial de contacto dentro de los límites de seguridad se utiliza:

$$L = \frac{K_m K_i \rho_{cc} \sqrt{T}}{116 + 0.17 \rho_s}$$

Para una malla de cable con electrodos, la longitud total del conductor se obtiene de la fórmula:

$$L = L_m + 1.15 L_e$$

donde:

$L_m$  = Longitud total de los conductores de la malla (longitudinales más transversales).

$L_e$  = Longitud total de los conductores de todos los electrodos.

El 15% es un factor que toma en cuenta la mayor densidad de corriente en los electrodos próximos al perímetro de la malla.

Para el caso de malla sin electrodos exteriores o con los electrodos en el interior de la misma se utiliza:

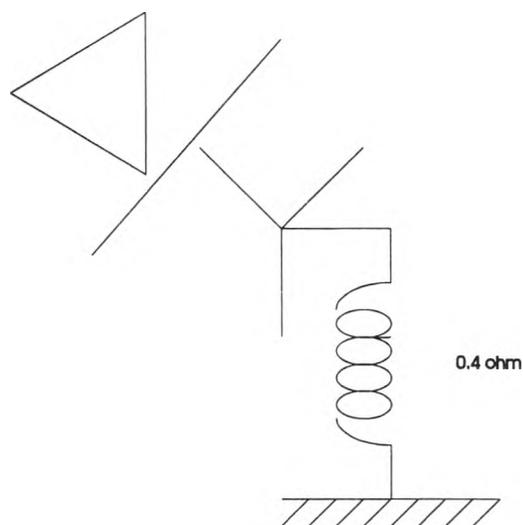
$$L = L_m + L_e$$

Finalmente, para disminuir la resistencia de una red de tierra se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

1. Aumentar el área de la red.
2. Reducir la separación entre los conductores de la red.
3. Utilizar electrodos más profundos.
4. Aumentar el número de electrodos en la periferia de la red.
5. Derivar parte de la corriente de la red por los hilos de guarda.
6. Conectar la red a tuberías de pozo profundo.
7. Disminuir la magnitud de la corriente de cortocircuito.
8. Agregar una capa de roca triturada sobre la superficie del terreno, que logre reducir el paso de corriente a través del cuerpo en más de veinte veces.

Ejemplo de cálculo de una red de tierra por el método de dos capas

Diseñar la red de tierra para una subestación con dos transformadores de 15 kVA cada uno, 115/16 kV,  $X = 7.5\%$  conexión:



alimentada por dos líneas de 115 kV.

Verificar  $V_m$  y  $V_p$  para no sobrepasar los valores límite tolerados por el cuerpo humano. La resistencia de la red no debe sobrepasar los valores normalizados que para una subestación de distribución debe ser menor a 5 ohm.

Datos:

Longitud del terreno de la subestación 42 m

Ancho de la red (se prolonga 1.5 m por cada lado para aterrizar la cerca)	27 m
Corriente de corto circuito monofásico ( $I_{cc}$ )	6.500 A
Resistividad del terreno ( $\rho$ )	100 ohm-m
Resistividad superficial ( $\rho_s$ ) grava	3000 ohm-m
Profundidad de la red (h)	0.70 m
Grueso de la capa superficial ( $h_s$ )	0.15 m
Tiempo de duración de la falla (t)	18 ciclos
Relación X/R en el bus de falla	20
Longitud de los electrodos	3 m
Diámetro de los electrodos	0.0159 m (5/8")
Factor de crecimiento de la subestación ( $f_c$ )	1.0
Calibre del conductor (por norma se emplea el mínimo)	4/0 (211.6KCM)
Diámetro del conductor de 4/0 (d)	0.0134 m
Conectores de bronce, atornillados, temperatura máxima de la red ( $T_m$ )	250°C
Longitud de la red (se prolonga 1.5 m por cada lado para aterrizar la cerca)	45 m

Solución:

Comprobar la sección del conductor de cobre

$$I_D = I_{cc} * D * f_c$$

De la tabla de factores de D, para  $t = 0.3$  segundos (18 ciclos)  $D = 1.07$

$$f_c = 1.0$$

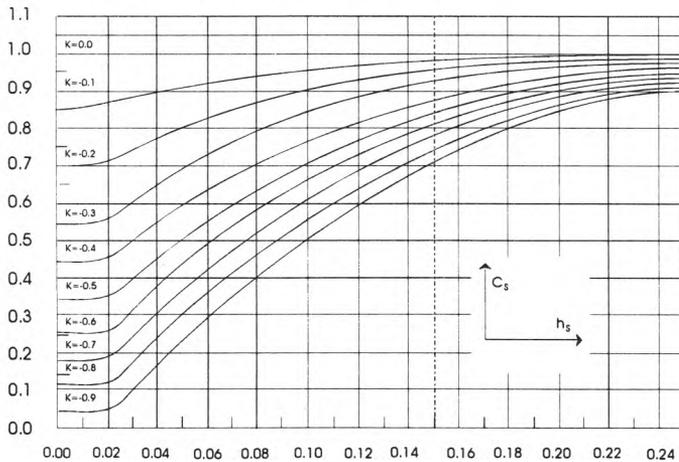
$$I_D = 6500 * 1.07 * 1.0 = 6.955 \text{ A}$$

Área del conductor para una duración de la falla  $t = 0.3$  según con conectores atornillados y utilizando la tabla "calibres de cable de cobre" el factor es de 8.3 cm/ampere, o sea:  $A = 6955 * 8.3 = 57,726.5 \text{ cm}$  que corresponde a un cable ligeramente superior al 2 AWG. Por norma, se debe emplear como mínimo el calibre de 4/0, con un diámetro de  $d = 0.0134 \text{ m}$ .

Factor de reflexión K

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} = \frac{100 - 3000}{100 + 3000} = 0.935$$

Con este dato se entra a la gráfica que calcula el “factor de reducción” ( $C_s$ ). Para lo cual se toma la curva correspondiente al valor de  $K = -0.935$  y donde cruza la curva con la abscisa  $h_s$  (profundidad de la capa) se corta el eje de las ordenadas ( $C_s$ ) que para este caso  $C_s = 0.7$ .



El factor de reducción  $C_s$  es igual a uno, cuando no existe capa superficial o ésta es muy delgada, o bien, es de resistividad muy alta.

Cálculo de los potenciales tolerables

Para una persona de 70 kg.

$$V_s (\text{paso}) = \frac{(100 + 6C_s \rho_s) * 0.157}{\sqrt{t}} = \frac{157 + 0.942 * C_s \rho_s}{\sqrt{t}}$$

$$= \frac{157 + 0.942 * 3000 * 0.7}{\sqrt{0.3}} = 3898.3V$$

$$V_m (\text{contacto}) = \frac{(1000 + 1.5C_s \rho_s) * 0.157}{\sqrt{t}}$$

$$= \frac{157 + 0.2355 * 3000 * 0.7}{\sqrt{0.3}} = 1189.56V$$

Cálculo tentativo de la longitud de la red

Se puede utilizar una cuadrícula de 3\*3 de lado:

Conductores transversales =  $16 * 27 = 432$  m.

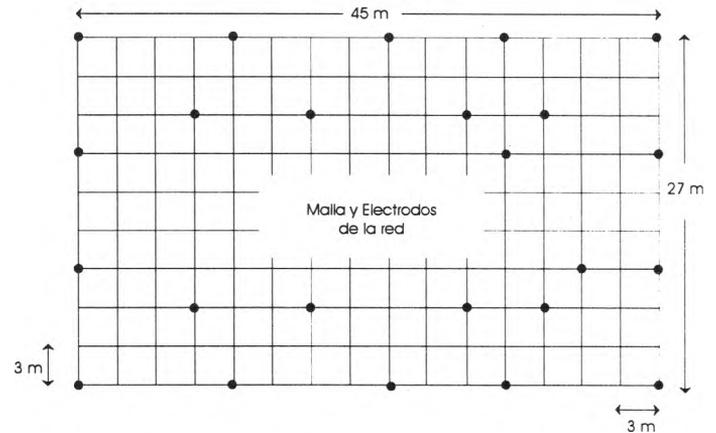
$$\{L_m = 882 \text{ m.}\}$$

Conductores longitudinales =  $10 * 45 = 450$  m.

Conductores verticales (electrodos) =  $1.15 * 24 * 3$   
=  $82.8 \text{ m} = L_e$

Longitud total de la red (L)

$$L = L_m + L_e = 882 + 82.8 = 964.8 \text{ m.}$$



Cálculo del potencial de la malla ( $V_m$ ) en la red

$$V_m = K_m K_i \rho \frac{I_D}{L}$$

por el tipo de cuadrícula

$$n_m = \sqrt{A * B} = \sqrt{16 * 10} = 12.65$$

$$K_h = \sqrt{1 + 0.7} = \sqrt{1.7} = 1.3$$

$$K_{ii} = 1$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \text{Ln} \left( \frac{D^2}{16h_s d} + \frac{(D+2h_s)^2}{8Dd} - \frac{h_s}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \text{Ln} \left( \frac{8}{\pi(2\eta m - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = \frac{1}{6.28} \left[ \text{Ln} \left( \frac{3^2}{16 * 0.7 * 0.134} + \frac{(3+2*0.7)^2}{8 * 3 * 0.134} - \frac{0.7}{4 * 0.134} \right) + \frac{1}{1.3} \text{Ln} \left( \frac{8}{3.14 (2 * 12.65 - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0.468$$

$$K_i = 0.656 + 0.172 n_m$$

$$K_i = 0.656 + 0.172 * 12.65$$

$$K_i = 2.832$$

Por lo tanto:

$$V_m = [0.468 * 2.832 * 100 * 6955 * (1/964.8)]$$

$$V_m = 955.43 \text{ Volts}$$

Calculo del potencial de paso ( $V_s$ ) en la periferia de la red

$$V_s = K_s K_i \rho \frac{I_D}{L}$$

por el tipo de cuadrícula

$n_s = 16$  (el lado de mayor longitud)

$n = 24$  (número de electrodos)

Cálculo de  $K_s$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h_s} + \frac{1}{D+h_s} + \frac{1}{D} (1-0.5^{(n_s-2)}) \right]$$

$$K_s = \frac{1}{3.14} \left[ \frac{1}{2*0.7} + \frac{1}{3.0+0.7} + \frac{1}{3.0} (1-0.5^{14}) \right]$$

$$K_s = 0.4194$$

Cálculo de  $K_i$

$$K_i = 0.656 + 0.172 n_s$$

$$K_i = 0.656 + 0.172 * 16$$

$$K_i = 3.408$$

Por lo tanto:

$$V_s = [0.4194 * 3.408 * 100 * (6955/964.8)]$$

$$V_s = 1030.35 \text{ Volts}$$

Comparación de potenciales

Debe ocurrir:  $V_{m(\text{calculado})} < V_{m(\text{tolerado})}$

Ocurre:  $949 < 952$ .....Es correcto

Debe ocurrir:  $V_{s(\text{calculado})} < V_{s(\text{tolerado})}$

Ocurre:  $1030.3 < 3012.9$ .....Es correcto

O sea, al comparar la magnitud de los potenciales se observa que la malla de tierra es correcta.

Cálculo de la resistencia de la red respecto al terreno vecino

Como la profundidad de la red es mayor de 30 cm, se puede utilizar la fórmula de Sverak, o sea:

$$R = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1+h_s \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

$$R = 100 \left[ \frac{1}{964.8} + \frac{1}{\sqrt{20 * (45 * 27)}} \left( 1 + \frac{1}{1+0.7 \sqrt{\frac{20}{(45 * 27)}}} \right) \right]$$

$$R = 1.329 \text{ ohm}$$

Si se utiliza la fórmula de Schwarz se obtiene una resistencia del mismo orden, o sea:

Coefficiente de profundidad de enterramiento:

$$h_1 = \sqrt{d * h_s} = \sqrt{0.0134 * 0.7}$$

$$h_1 = 0.0968$$

Relación longitudinal-ancho:

$$\frac{b}{a} = \frac{45}{27} = 1.667$$

Para la profundidad de la red de 0.7 m, se utiliza la curva B, mediante la cual se encuentran los coeficientes de reflexión  $K_1$  y  $K_2$  o sea:

$$h = \frac{1}{10} \sqrt{A} = \frac{1}{10} \sqrt{45 * 27} = 3.48$$

$$K_1 = -0.05 * \frac{b}{a} + 1.20 = -0.05 * \frac{45}{27} + 1.20 = 1.12$$

$$K_2 = -0.10 * \frac{b}{a} + 4.68 = -0.1 * \frac{45}{27} + 4.68 = 4.85$$

Analizando cada una de las resistencias de la fórmula de Schwarz y considerando para este caso que:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_a = 100$$

se tiene:

$$R_m = \frac{\rho_1}{\pi L_m} \left[ L \left( \frac{2h_m}{h_1} \right) + K_1 \left( \frac{L_m}{\sqrt{A}} - K_2 \right) \right]$$

$$R_m = \frac{100}{3.14 * 882} \left[ L \left( \frac{2 * 882}{0.0968} \right) + 1.12 \left( \frac{882}{1215} - 4.85 \right) \right]$$

$$R_m = 1.202$$

$$R_e = \frac{\rho_a}{2\eta\pi L_e} \left[ L \left( \frac{8L_e}{d_2} \right) - 1 + 2K_1 \frac{L_e}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$$

$$R_e = \frac{100}{2 * 24 * 3.14 * 3} \left[ L \left( \frac{8 * 3}{0.0159} \right) - 1 + 2 * 1.12 \frac{3}{\sqrt{1215}} * (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$$

$$R_e = 2.044$$

$$R_{me} = \frac{\rho_a}{\pi L_m} \left[ L \left( \frac{2L_m}{L_e} \right) + K_1 \frac{L_m}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$R_{me} = \frac{100}{3.14 * 882} \left[ L \left( \frac{2 * 882}{3} \right) + 1.12 * \frac{882}{\sqrt{1215}} - 4.85 + 1 \right]$$

$$R_{me} = 1.111$$

Finalmente, la resistencia total de la red de tierra se obtiene de la fórmula:

$$R_T = \frac{R_m R_e - R_{me}^2}{R_m + R_e - 2R_{me}} = \frac{(1.202 * 2.044) - 1.234}{1.202 + 2.044 - 2.222} = 1.194 \text{ ohm}$$

como  $R_T < 5$  ohm, que es el valor máximo permitido para una subestación de distribución, se considera que la red de tierra se encuentra dentro de la norma de IEEE (Instituto

de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) y por lo tanto, su operación es correcta.

## Conclusiones

En el cálculo de una red de tierra, se pretende evitar caer en dos situaciones extremas, por un lado, eliminar los diseños limitados, que por lo general son peligrosos; y por el otro evitar diseños que resultan costosos.

El mejor medio para obtener seguridad es el libramiento rápido de las fallas.

Los valores bajos de resistencia de las redes de tierra, no son una garantía de seguridad, a menos que resulten tan bajos que al circular la máxima corriente de cortocircuito a través de la red no se eleve el potencial de la malla hasta un valor peligroso.

## Bibliografía recomendada

- Compañía de Luz y Fuerza del Centro, SA. *Manual de diseño de subestaciones*. Departamento de Relaciones Industriales de L. y F. México.
- IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. (1981-82). *Safe Substation Grounding*.
- Lorenzo-Bautista R. (1996). *Sistemas de tierra en subestaciones eléctricas*. Editado por el propio autor. México.
- Raull-Martín J. *Diseño de subestaciones eléctricas*. Mc Graw Hill. México.

## Semblanza del autor

José Raull-Martín. Egresó de la Facultad de Ingeniería, UNAM en 1953 como mecánico electricista. Ahora, con más de treinta años de experiencia en diseño y construcción de subestaciones eléctricas en la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, fue nombrado representante ante el CCONNIE para la elaboración de normas nacionales en las áreas de tableros de alta tensión, cables de control y nomenclatura de términos técnicos. Desde 1965 ha sido catedrático en la Facultad de Ingeniería, UNAM y fue jefe del Departamento de Ingeniería Eléctrica en la misma institución. Es autor de la publicación "Diseño de Subestaciones Eléctricas", editado por Mac Graw Hill.