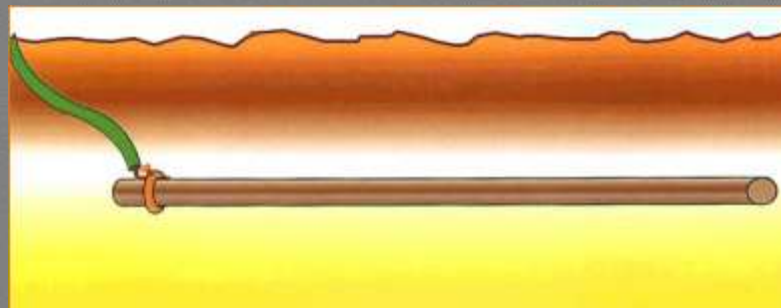
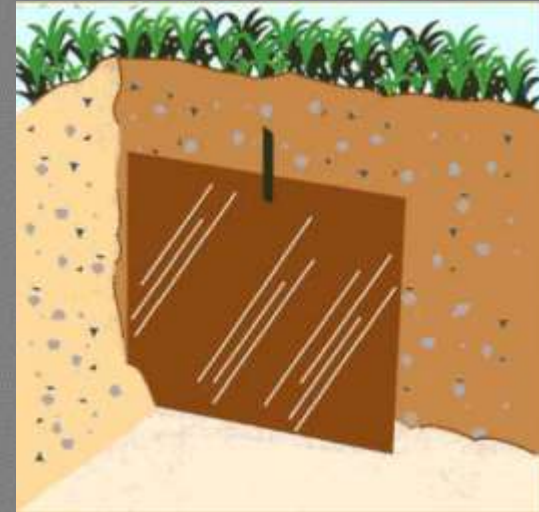
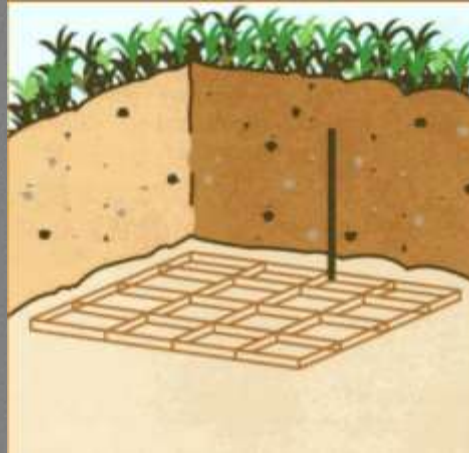
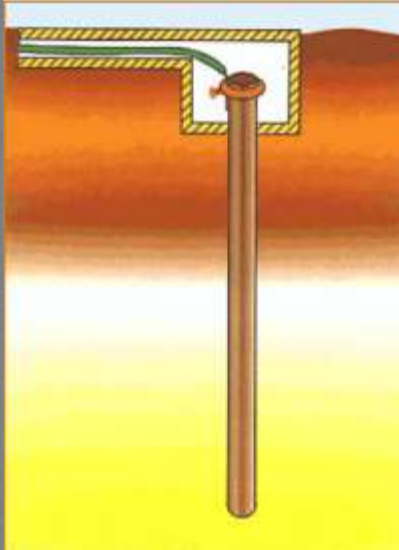




Sistemas de Puesta a Tierra





Sistemas de Puesta a Tierra

Un sistema de puesta a tierra consiste en la conexión de equipos eléctricos y electrónicos a tierra, para evitar que se dañen nuestros equipos en caso de una corriente transitoria peligrosa.

El objetivo de un sistema de puesta a tierra es:

- El de brindar seguridad a las personas.
- Proteger las instalaciones, equipos y bienes en general, al facilitar y garantizar la correcta operación de los dispositivos de protección.
- Establecer la permanencia, de un potencial de referencia, al estabilizar la tensión eléctrica a tierra, bajo condiciones normales de operación.



Efectos Fisiológicos de la Corriente Eléctrica en el Humano

INTENSIDAD	EFFECTOS FISIOLÓGICOS
1 a 3 mA	Prácticamente imperceptibles. No hay riesgo
De 5 a 10 mA	Contracciones involuntarias de músculos y pequeñas alteraciones del sistema nervioso
De 10 a 15 mA	Principio de tetanización muscular, contracciones violentas e incluso permanentes de las extremidades
De 15 a 30 mA	Contracciones violentas e incluso permanentes de la caja torácica. Alteración del ritmo cardíaco
Mayor de 30 mA	Fibrilación ventricular cardíaca

Todos estos valores y efectos pueden variar según el tiempo que dure el paso de la corriente eléctrica.

Los valores máximos de intensidad y corriente son:

****Para tiempos inferiores a 150 milisegundos no hay riesgo, siempre que la intensidad no supere los 300 mA

****Para tiempos superiores a 150 milisegundos no hay riesgo, siempre que la intensidad no supere los 30 mA



Conceptos Generales

A continuación se presentan los conceptos mas comunes, de acuerdo a la NOM-001- SEDE-2012, IEEE-80- 2008, CFE 00J00-1, NRF-011-CFE-2004

- **CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA**

Es aquel conductor de un circuito que se conecta a tierra intencionalmente. Este conductor garantiza la conexión física entre las partes metálicas expuestas a alguna falla y la tierra.

- **ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA**

Es un cuerpo metálico conductor desnudo que va enterrado y su función es establecer el contacto con la tierra física.

- **PUENTE DE UNION**

Este puente es un conductor que nos sirve para proporcionar la conductividad eléctrica entre partes de metal que requieren ser conectadas eléctricamente.



Conceptos Generales

- RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Es la propiedad del terreno que se opone al paso de la corriente eléctrica, la resistividad varia de acuerdo a las características del terreno.

- SISTEMA DE TIERRA

Son varios conductores desnudos que se interconectan con una o varias mallas o electrodos enterrados.

- RESISTENCIA DE TIERRA

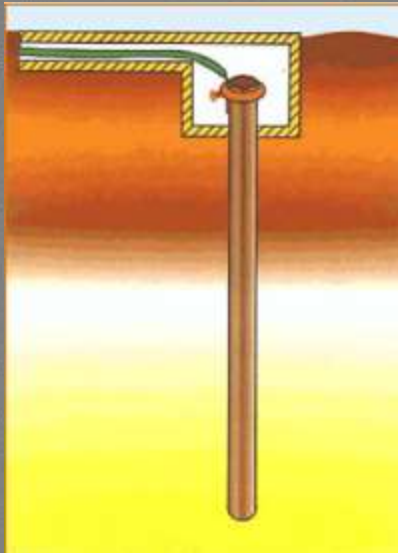
Es la resistencia que nos ofrece el terreno hacia la corriente en un sistema de puesta a tierra, esta resistencia depende de la resistividad del terreno y área de los conductores

- TIERRA AISLADA

Es un conductor de tierra con aislamiento que se conecta a algún equipo ,este conductor se coloca en la misma soportería donde se encuentran los cables de energía.



Electrodos de Tierra: La Barra



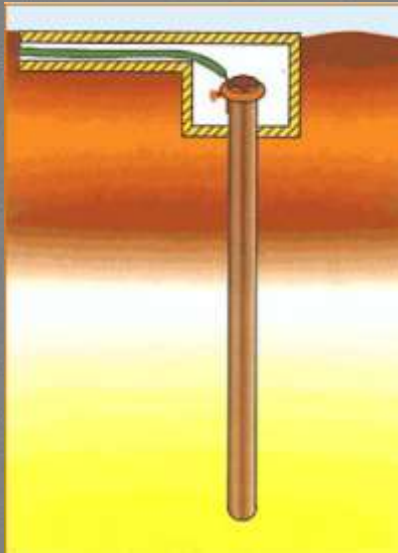
*Esta es la forma más común de electrodos, cuando no se requiere controlar los potenciales de superficie.

*Su costo de instalación es relativamente bajo y pueden usarse para alcanzar en profundidad, capas de terreno de baja resistividad.

*La barra es de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero empleado tiene alta resistencia mecánica.



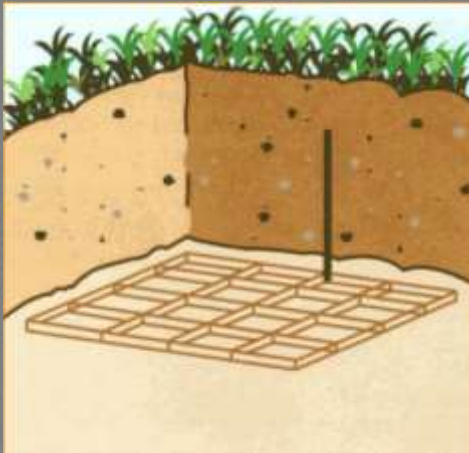
Electrodos de Tierra: La Barra



- *La capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente para que no se deslice al enterrar la barra.
- *Las barras están disponibles en diámetros de 15 mm a 20 mm (cobre sólido) y 9,5 a 20 mm (acero recubierto de cobre) y longitudes de 1,2 a 3 metros.



Electrodos de Tierra: Las Mallas de Tierra

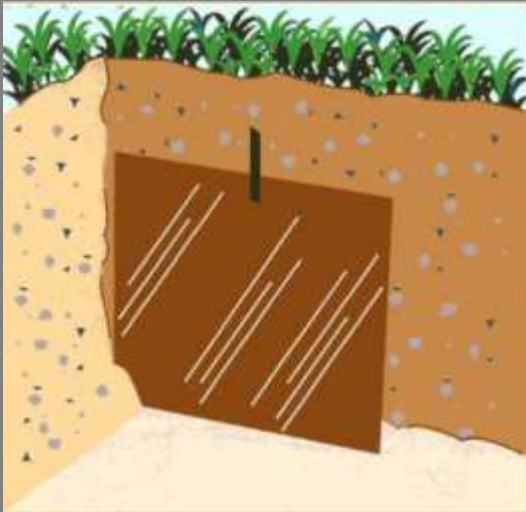


*Es un reticulado formado por la unión de conductores horizontales, normalmente según direcciones perpendiculares y uniformemente espaciados, incluyendo eventualmente conductores verticales (barras).

*Se utiliza especialmente cuando el objetivo principal de la puesta a tierra es mantener un control de potenciales en la superficie del terreno, con un bajo valor de resistencia.



Electrodos de Tierra: La Placa

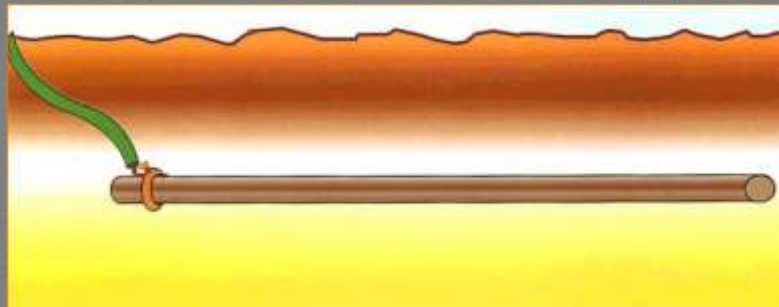


*La barra es de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero empleado tiene alta resistencia mecánica.



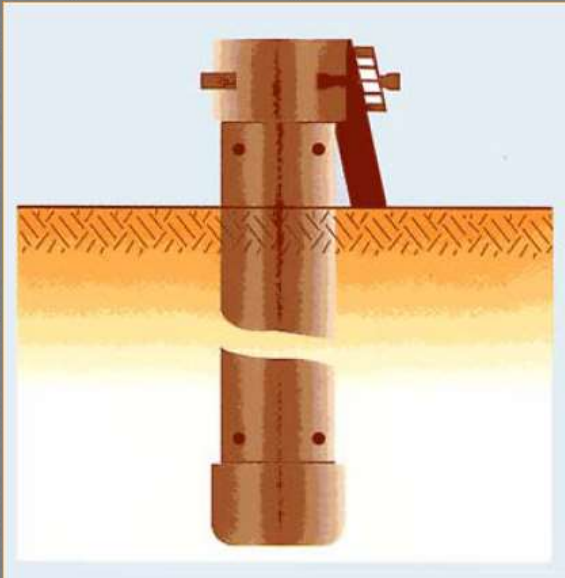
Electrodos de Tierra: La Barra Horizontal

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





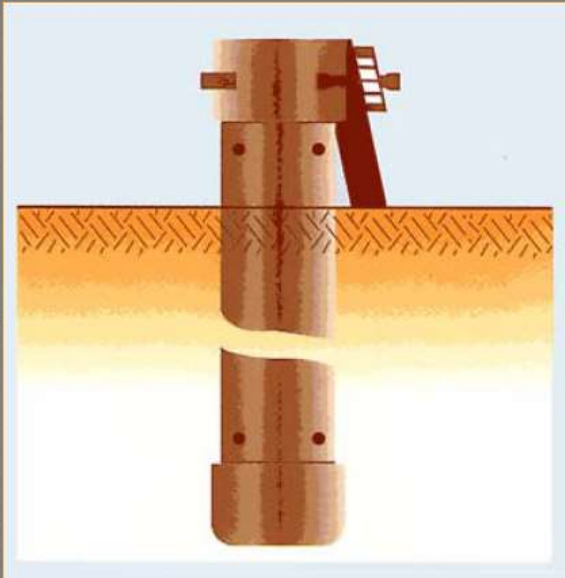
Electrodos de Tierra: Electrodo Activo



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



Electrodos de Tierra: Electrodo Activo



- *La humedad existente en el aire ingresa por las perforaciones de ventilación, entra en contacto con la sal o sustancia conductiva formando una solución electrolítica que escurre hacia la parte inferior del tubo y fluye a través de las perforaciones de drenaje hacia el suelo circundante, mediante osmosis.
- *De este modo, el electrolito forma «raíces» en el terreno que lo rodea, las cuales ayudan a mantener su impedancia en un nivel bajo.
- *Es una alternativa atractiva cuando no se dispone de mucho terreno y se desea obtener bajo valor de impedancia, (se estima del orden o inferior a 10 Ohms) pero tiene el inconveniente que requiere mantenimiento.



RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad del terreno se define como la resistencia que presenta 1 m³ de tierra, y resulta de un interés importante para determinar en donde se puede construir un sistema de puesta a tierra.

Factores que afectan la resistividad del terreno

En la resistividad del terreno influyen varios factores que pueden variarla, entre los mas importantes se encuentran: naturaleza del terreno, humedad, temperatura, salinidad, estratigrafía, compactación y las variaciones estacionales.



Naturaleza del Terreno:

Esta se refiere a que la resistividad varia según el tipo de terreno, es decir se tiene una resistividad mas elevada en un terreno rocoso que en uno donde haya arena.

Humedad:

Aquí varia la resistividad según la humedad del terreno, mientras mas húmedo sea éste mas baja será la resistividad del terreno y mientras mas seco este el terreno mayor será la resistividad de éste, es por esta razón que debe procurarse un terreno un poco mas húmedo para obtener mejores valores.

Temperatura:

Aquí también la temperatura afecta en las mediciones ya que el calor crea una resistencia en el terreno, ya que es como si se tuviera un terreno seco. Y por el contrario a temperaturas muy bajas la poca humedad que hay en el terreno puede congelarse (solo la superficie del agua), y como se sabe el hielo no es un buen conductor por lo que se eleva la resistividad del terreno.



Salinidad:

Como se sabe el agua por si sola no conduce la electricidad pero con sales se convierte en un excelente conductor, es por esto que mientras mas sales contenga el terreno y este húmedo mas bajo serán los valores de resistividad.

Estratigrafía:

Esta afecta por el exceso de rocas y piedras de tamaño considerable en un terreno ya que las rocas y piedras provocan una mayor resistencia en el terreno.

Compactación:

Aquí la resistividad disminuye mientras mas compactado este un terreno ya que cuando no esta bien compacto hay pequeños espacios de aire los cuales impiden que la corriente eléctrica se pueda esparcir por el terreno.



Variaciones estacionales:

Las estaciones también intervienen en el valor de la resistividad de un terreno ya que en una estación calurosa como lo es primavera el terreno estará mas seco que si se tuviera una estación con muchas lluvias y por esto los valores cambiarían según la estación del año en que nos encontremos es por esto que se recomienda hacer varias mediciones en diferentes estaciones del año para determinar la resistividad promedio.



La Tabla 2 da, a título de orientación, unos valores de la resistividad para un cierto número de terrenos. Con el fin de obtener una primera aproximación de la resistencia de tierra, los cálculos pueden efectuarse utilizando los valores medios indicados en la Tabla 3.

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD EN OHM*M
Terrenos pantanosos	de algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silicea	200 a 3.000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3.000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras.	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1.500 a 10.000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600

Naturaleza del terreno	Valor medio de la resistividad en Ohm·m
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles y terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables..	3.000

Tabla 3. Valores de resistividad de algunos suelos

Electrodo	Resistencia de la tierra en ohm
Placa enterrada	$R = 0,8 \frac{\rho}{p}$
Pica vertical	$R = \frac{\rho}{L}$
Conductor enterrado horizontalmente	$R = \frac{2\rho}{L}$

Tabla 4. Como obtener la resistencia de un electrodo



R, resistividad de terreno (ohm*m)
P, perímetro de la placa (m)
L, longitud de la pica del conductor (m)

Variación de la resistencia según el área de los conductores

A) En función a su profundidad

A través de la expresión mostrada en la figura 1 que se muestra abajo, se puede calcular los efectos de la variación de la resistencia de tierra en función de la profundidad alcanzada por un electrodo.

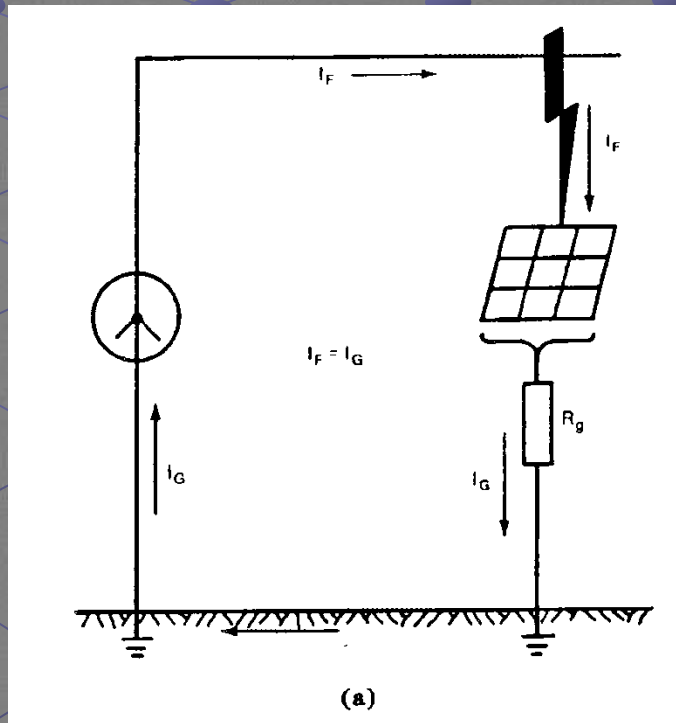
Figura 1. En función de su profundidad

La norma de instalaciones eléctricas (NOM 001) especifica que la profundidad mínima de enterrado de una varilla debe ser de 2.4 metros (8 pies).

Para varillas de acero de sección circular, se requiere que su diámetro no sea menor a 1.59 cm (5/8) y para varillas de cobre o de acero recubiertas de cobre el diámetro mínimo debe de ser de 1.27 cm (1/2), para terrenos duros como el tepetate es recomendable varillas con un diámetro de 1.91 cm (3/4).



● Una subestación que se alimenta de líneas aéreas sin un blindaje metálico aterrizado o que no tengan un neutro, requerirán una malla con una baja resistencia a tierra

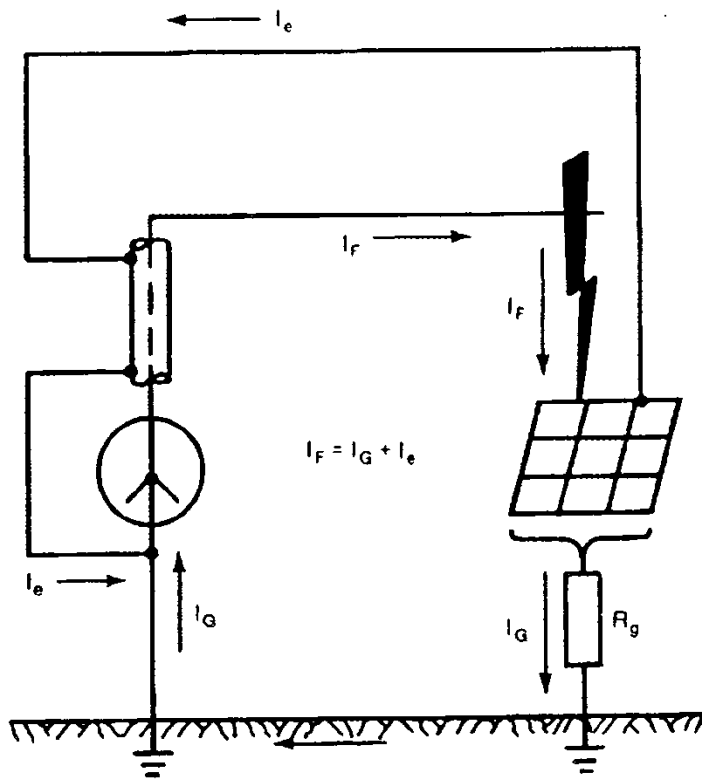


Requiere Baja Resistencia



Puede No Requerir Baja Resistencia

- Una subestación alimentada con líneas blindadas o con neutro corrido, **pueden** no requerir un malla de baja resistencia.

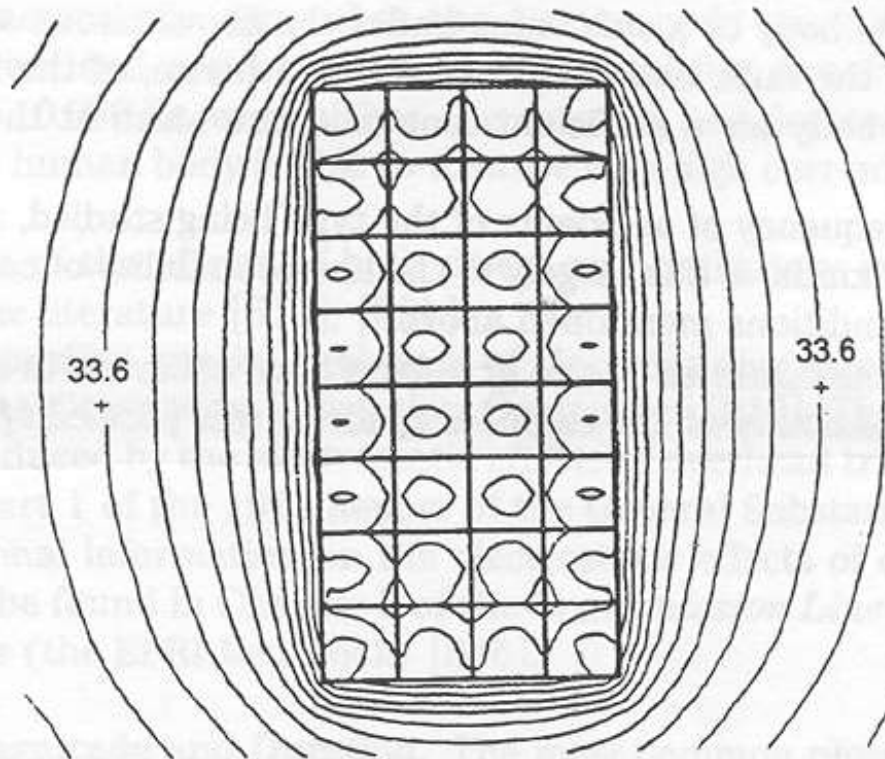


(b)



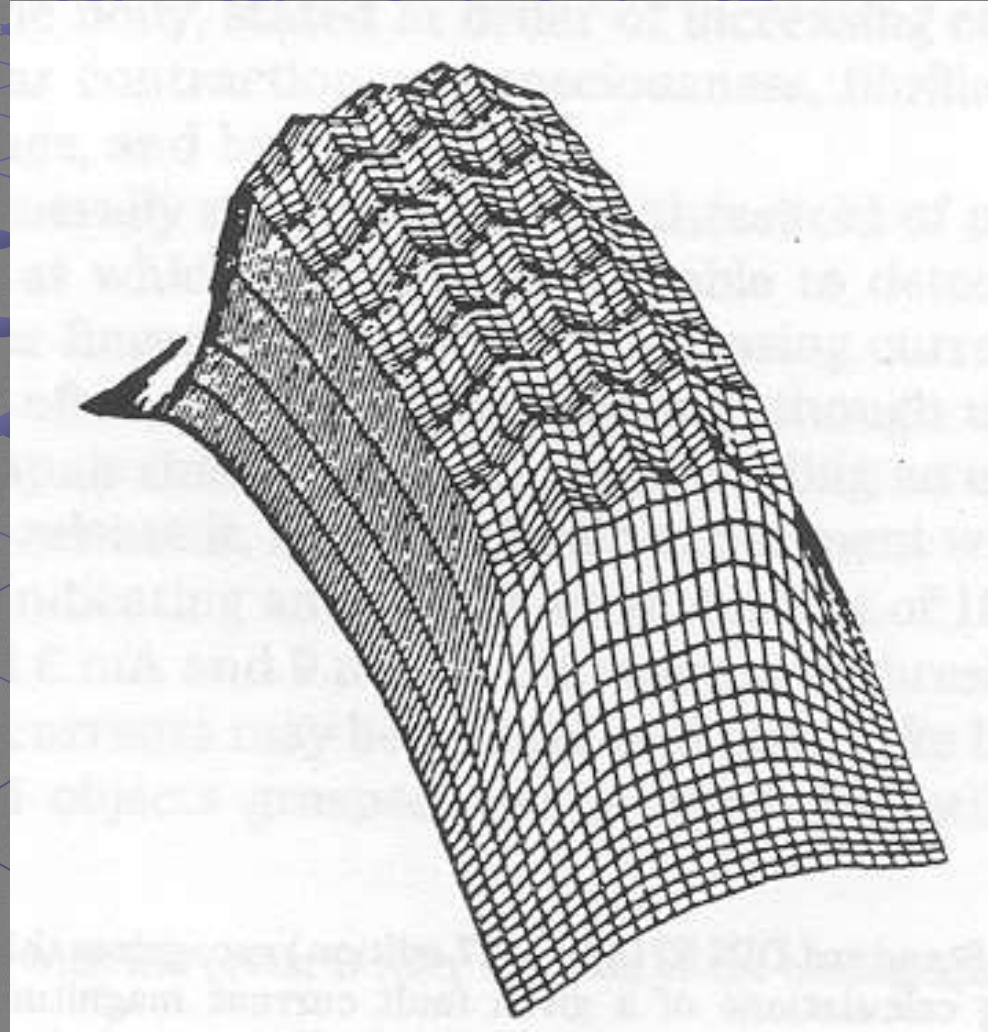
Gradientes de Potencial en Subestación: 1

Fig 3
Equipotential Contours of a Typical Grounding Grid
With and Without Ground Rods





Gradientes de Potencial en Subestación: 2





Potencial de Toque, de Paso, de Malla y Potencial Transferido en una Subestación

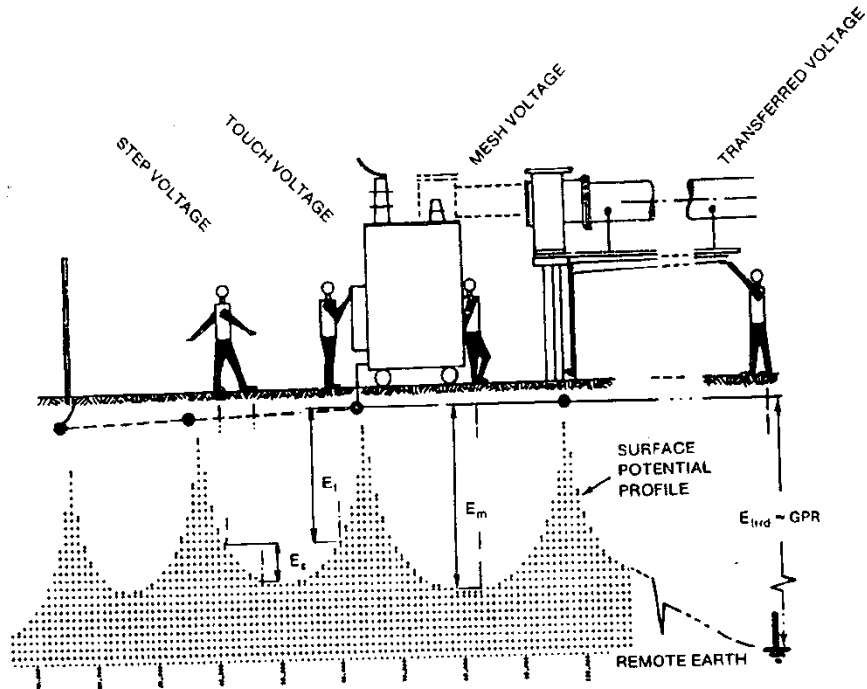


Fig 9
Basic Shock Situations

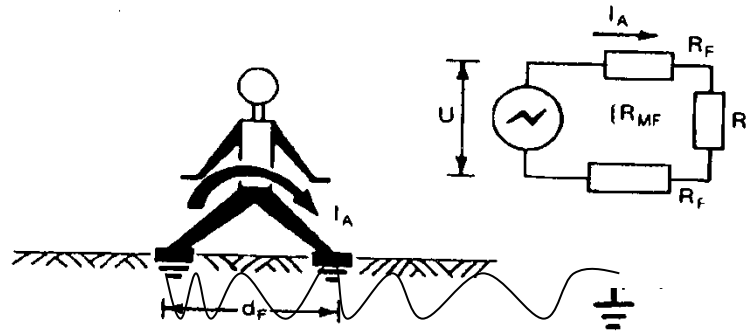
Voltaje de Malla

Es el mayor valor de voltaje de toque que se puede encontrar en la malla de tierra, que se presenta al estar en el centro de la malla



Potencial de Paso

Fig 5
Step Voltage Circuit



$$\begin{aligned}d_F &= 1 \text{ m} \\R_A &= R_B + 2R_F - 2R_{MF} \\I_A &= U/R_A \\R_B &= 1000 \Omega\end{aligned}$$

where

I_A = the current of accidental circuit
 R_A = the total resistance of accidental circuit

El potencial de paso que se experimenta la persona es menor entre mas alejado este de entre la falla y la tierra, y se experimenta cuando una persona separa sus pies 1 mts sin hacer contacto con ninguna otra cosa



Potencial de Toque

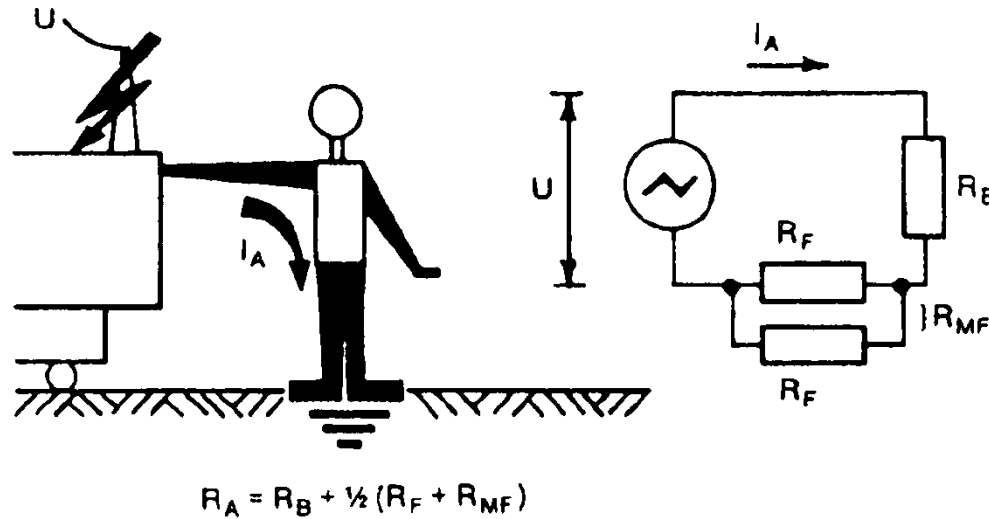
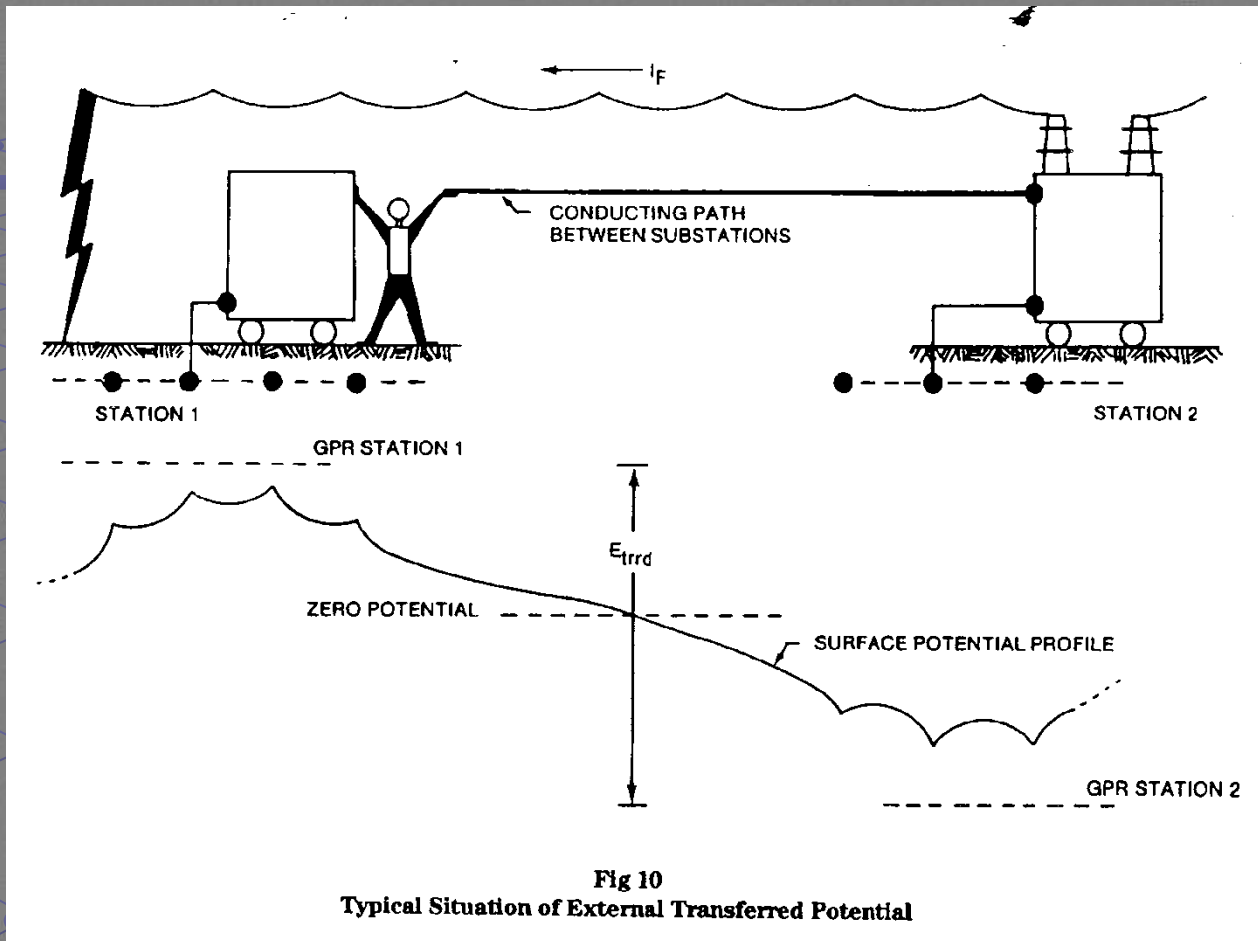


Fig 6
Touch Voltage Circuit

El potencial de toque se presenta cuando la persona toca un objeto con alto potencial y su pie tiene una menor resistencia con respecto a la tierra remota estando parado en un punto con menor potencial



Potencial Transferido



Es el caso del voltaje de toque cuando la persona esta en un área remota, de tal manera que el voltaje se aproxima a la elevación total del potencial de tierra



B) En función del diámetro:

Ciertamente, la resistencia de un electrodo de sección circular se reduce al incrementarse su diámetro, sin embargo tiene un limite en el que ya no es recomendable aumentarlo debido a que el valor de la resistencia del terreno permanece prácticamente constante.

De acuerdo con la figura 2 que se muestra mas adelante, se puede calcular y graficar los valores de la resistencia en función al diámetro del electrodo.

Figura 2. en función del diámetro

Un ejemplo de lo anterior es usando los siguientes datos:

Resistividad del terreno (ρ) = 1000 .cm

Electrodo tipo varilla copperweld: Longitud = 300 cm

Diámetro = 1.584 cm



Radio = 0.7935 cm

Sustituyendo los datos en la expresión mencionada, el primer resultado es $R = 33.5$, sin embargo si duplicamos el diámetro del electrodo, el nuevo resultado será $R = 29.8$ que solo representa una reducción del 11%, y si lo aumentamos 20 veces el diámetro original el valor obtenido será $R = 17.6$ lo que representa solo una reducción del 47.4 %.

Es por esto que se puede decir que no es recomendable invertir en electrodos de gran diámetro, ya que no se reduce considerablemente la resistencia, por lo cual deberán practicarse otros métodos.

Conexión a tierra de instalaciones interiores a baja tensión

Deberán conectarse a tierra toda parte metálica al descubierto, que forma parte de un equipo que no transporte corriente, pero que tenga posibilidades de ser recorrida por una corriente, debe ser puesta a tierra.

Se exceptuarán de esta exigencia los siguientes casos:

Cubiertas de interruptores o disyuntores accesibles exclusivamente a personal calificado.



Armaduras metálicas de dispositivos calentados eléctricamente, aprobados por el laboratorio de superintendencia, para el uso den dichas condiciones, siempre que esta armadura esté convenientemente aislada de tierra.

Métodos portátiles que funcionen a menos de 100 w.
Equipos eléctricos alimentados a través de transformadores de aislamiento.

Deberán conectarse a tierra, los siguientes equipos no eléctricos:

Armaduras y rieles de grúas accionadas eléctricamente.
Los cables de tracción de ascensores eléctricos.
Todo otro equipo similar.



DISEÑO DE LA MALLA DE TIERRA PARA LA SUBESTACION ELECTRICA DE UN EDIFICIO

■

Edificio E, se alojaran dos subestaciones eléctricas constituidas por tres transformadores de 750 KVA, con relación de transformación de 23,000-480/277 Volts, conexión Delta - Estrella enfriamiento a base de silicón líquido.



Determinación de la corriente de corto circuito de falla a tierra.

Para la determinación de las corrientes de corto circuito, se utilizo como potencia de cortocircuito 300 MVA, trifásico, en cada una de las acometidas de la subestación.

Donde:

I_{cc} = Corriente de corto circuito trifásica en Amp.

MVA = Potencia de cortocircuito trifásica en MVA.

KV = Tensión de suministro en KV.

De las condiciones del problema tenemos:

$$I_{cc} = \frac{MVA}{\sqrt{3} \times KV}$$

$$I_{cc} = \frac{300}{\sqrt{3} \times 23}$$

$$I_{cc} = 7,530.65 \text{ Amp.}$$



2.- Ajuste de la corriente de falla.

Cualquier ampliación que sufra este sistema posterior a lo considerado, será en forma de transformadores independientes, por lo que este factor es igual a uno ($A = 1$).

Por tiempo de duración de la falla.

Se considera que al ocurrir una falla a tierra, los interruptores operan eliminando la falla del sistema, lógicamente tendremos un tiempo de duración de la falla menor a 0.1 segundos que equivale a 6 ciclos, por esta razón aplicaremos un factor de 1.25 ($D = 1.25$) según la siguiente tabla:

Duración de la Falla (ciclos)	Factor de Decremento (D)
0.5	1.65
6	1.25
15	1.10
30 ó más	1.10



Entonces la corriente de falla quedará:

$$I_{cc} = I_{cc} \times A \times D$$

Donde:

I_{cc} = Corriente de corto circuito trifásica en Amp.

A = Factor de seguridad

D = Factor de decremento.

De las condiciones del problema tenemos:

$$I_{cc} = 7530 \times 1.0 \times 1.25$$

$$I_{cc} = 9,413.31 \text{ Amp.}$$



3.-Diseño de malla propuesto.

		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2													
2													
2													
2													

Cable de cobre desnudo Cal. 4/0 AWG.

Electrodo de tierra.

L = Longitud de conductor (L) = 300.0 mts.

Profundidad de enterramiento = 0.60 mts. (considerados desde el lecho bajo de loza)

Área (A) = ancho x largo = 213.64 mts.².

Número de conductores transversales menos dos (N) = 6



4.- Radio Equivalente (r)

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

Donde:

r = Radio equivalente en m.

Ar = Area total encerrada por la malla propuesta m²

De las condiciones del problema tenemos:

$$r = \sqrt{\frac{224}{\pi}}$$

$$r = 8.44 \text{ m.}$$



5.-Resistencia esperada en la malla:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

Donde:

R = Resistencia de la malla esperada en Ohms.

r = Radio equivalente en m.

ρ = Resistividad del terreno Ohms metro.

L = Longitud del conductor en m.

De las condiciones del problema tenemos:

$$R = \frac{100}{4 \times 8.444} + \frac{100}{300}$$

$$r = 3.294 \text{ Ohms.}$$



6.- Cálculo de la Sección del Conductor:

De la tabla de Onderdonk, considerando conexiones soldables y una falla con duración menor a los 0.1 segundos, tenemos que el calibre mínimo recomendado para evitar la fusión del cable se determina con la constante 6.5 c.m./amp., por lo que la sección mínima del conductor será:

Donde:

S = Sección del conductor en c m.

K_{ON} = Constante de Onderdonk.

De las condiciones del problema
tenemos:

$$S = I_{cc} \times K_{ON}$$

$$S = 9,413.32 \times 6.5$$

$$S = 61,187 \text{ cm}^2$$

Equivalente al calibre 1/0 AWG, pero se utilizará el mínimo recomendable por la norma de Cal. 4/0 AWG, con sección 107.2 mm² 211,600 c m.



7- Cálculo de la longitud necesaria de conductor:

La longitud se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$L = \frac{k_m \times k_i \times \rho \times I_{cc} \times \sqrt{t}}{116 + 0.17 \times \rho_s}$$

Donde:

L = Longitud de conductor enterizado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad.

Km. = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

Ki = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

r = Resistividad del terreno.

t = Duración máxima de la falla.

r s = Resistividad en la superficie del terreno.



8.- Cálculo de km.

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

Donde:

Km = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

D = Espaciamiento entre conductores en la malla.

d = Diámetro de los conductores.

h = Profundidad de enterramiento del conductor.

n = Número de conductores transversales paralelos.

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{2^2}{16 \times 0.60 \times 0.01168} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3 \times 5 \times 7 \times 9 \times 11 \times 13}{4 \times 6 \times 8 \times 10 \times 12 \times 14} \right)$$

$$k_m = 0.292$$



9.- Cálculo de K_i :

$$K_i = 0.65 + 0.172n$$

Donde:

K_i = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

n = Número de conductores transversales paralelos.

De las condiciones del problema tenemos:

$$K_i = 0.65 + 0.172 \times 8$$

$$K_i = 2.026$$



La longitud mínima de cable enterrado debe ser:

$$L = \frac{0.292 \times 2.026 \times 100 \times 9413.32 \times \sqrt{0.1}}{116 + 0.17 \times 5000}$$

$$L = 182.3m$$

La longitud de calculo es menor que la indicada en la configuración de la malla.

$$182.3 < 3000.0 \text{ Mts.}$$



10.- Cálculo del potencial tolerables.

Máximo aumento de potencial E en la [red](#).

$$E = I_{cc} \times R$$

Donde:

E = Potencial máximo de la malla.

I_{cc} = Corriente de corto circuito trifásica en Amp.

R = Resistencia de la malla esperada en Ohms.

De las condiciones del problema tenemos:

$$E = 9413.32 \times 3.294$$

$$E = 31,007.45 \text{Volts}$$



11. Potencial soportable por el cuerpo humano Voltaje de paso.

$$E_{PT} = \frac{116 + 0.7 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

Donde:

E_{PT} = Voltaje de paso tolerable para el cuerpo humano.

t = Duración máxima de la falla.

ρ_s = Resistividad en la superficie del terreno.

De las condiciones del problema tenemos:

$$E_{PT} = \frac{116 + 0.7 \times 5000}{\sqrt{0.1}}$$

$$E_{PT} = 11,434.8$$

Volts



12.- Potencial soportable por el cuerpo humano Voltaje de contacto

$$E_{CT} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

Donde:

E_{CT} = Voltaje de contacto tolerable para el cuerpo humano.

t = Duración máxima de la falla.

ρ_s = Resistividad en la superficie del terreno.

De las condiciones del problema tenemos:

$$E_{CT} = \frac{116 + 0.17 \times 5000}{\sqrt{0.1}}$$

$$E_{CT} = 3,054.80$$

Volts



13.- Cálculo del potencial de contacto o de malla. Emplearemos la siguiente fórmula:

$$V_c = \frac{k_m \times k_i \times \rho \times I_{cc}}{L_T}$$

Donde:

V_c = Voltaje de contacto o de malla.

L_T = Longitud de conductor enterizado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad.

K_m = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

K_i = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

ρ = Resistividad del terreno.

I_{cc} = Corriente de corto circuito trifásica en Amp.

De las condiciones del problema tenemos:

$$V_c = \frac{0.292 \times 2.026 \times 100 \times 9,413.32}{300}$$

$$V_c = 1,856.28$$



14.- Cálculo del potencial de paso.

$$V_p = \frac{k_s \times k_i \times \rho \times I_{cc}}{L_T}$$

Donde:

V_p = Voltaje de paso o de malla.

L_T = Longitud de conductor enterizado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad.

k_s = Factor que.

k_i = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

ρ = Resistividad del terreno.

I_{cc} = Corriente de corto circuito trifasica en Amp.

De las condiciones del problema tenemos:

$$V_p = \frac{0.5601 \times 2.026 \times 100 \times 9,413.32}{300}$$

$$V_p = 3,560.63$$



15- Cálculo de K_s :

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

Donde:

k_s = Factor que.

D = Espaciamiento entre conductores en la malla.

h = Profundidad de enterramiento del conductor.

n = Número de conductores transversales paralelos.

De las condiciones del problema tenemos:

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0.60} + \frac{1}{2.0 + 0.60} + \frac{1}{2 \times 2.0} + \frac{1}{3 \times 2.0} + \frac{1}{4 \times 2.0} + \frac{1}{5 \times 2.0} + \frac{1}{6 \times 2.0} + \frac{1}{7 \times 2.0} \right]$$

$$k_s = 0.5601$$



16. Numero mínimo de varillas requerido:

$$N_v = 0.60 \times \sqrt{A_r}$$

Donde:

A_r = Area total encerrada por el la malla propuesta m^2

N_v = Numero mínimo de varillas.

De las condiciones del problema tenemos:

$$N_v = 0.60 \times \sqrt{224}$$

$$N_v = 8.98$$

El numero de electrodos colocados en la malla, son 10.



17.- Verificación de las condiciones de seguridad.

$$V_p < E_{PT}$$

$$V_c < E_{CT}$$

DE LAS CONDICIONES DEL PROBLEMA TENEMOS :

$$3,560.63 < 11,434.80$$

$$1,856.3 < 3,054.76$$

Como el potencial tolerable por el cuerpo humano V_{CH} es superior a la elevación del potencial de malla calculado el arreglo seleccionado en este punto es aceptable.



CALCULO Y TABLAS

Condiciones de Peligro 1

- Una alta corriente de falla a tierra en relación con el área de la malla de tierra y una alta resistividad de ésta a tierra remota y
- Combinación de una resistividad del suelo y de una distribución de las corrientes de tierra de manera tal que se presenten gradiente altos de potencial en la superficie de la tierra y ..



Condiciones de Peligro 2

- La presencia de un individuo en un punto de la subestación, en el tiempo y posición de tal manera que el cuerpo de éste esté puenteando dos puntos de alto potencial y ...
- Ausencia de la suficiente resistencia de contacto para limitar la corriente a través del cuerpo a un valor seguro y ...



Condiciones de Peligro 3

- Que la duración de la falla a tierra y la duración del contacto de la persona a estos puntos de potencial, sean lo suficientemente largos para causar daño al nivel de corriente que exista en ese momento.



Condiciones de Peligro 4

- Para que un accidente ocurra, se tienen que cumplir las cinco condiciones establecidas anteriormente, todas al mismo tiempo.
- Esto hace que los accidentes de este tipo en subestaciones eléctricas sean mucho menos comunes que otros de otro tipo.



Condiciones de Peligro 5

- Sin embargo, si han ocurrido accidentes mortales en el pasado y por lo tanto es la responsabilidad del ingeniero para bajar las posibilidades de que esto ocurra nuevamente en el futuro.



Corrientes Tolerables

99.5% de todas las personas de 50 (70) kg [o más] pueden resistir en forma segura [sin fibrilación ventricular] el paso de una corriente (de 50 Hz o 60 Hz) en magnitud (I_b) y en duración (t_s) determinado por la siguiente fórmula:

$$I_{b50} = 0.116 / \sqrt{t_s}$$

$$I_{b70} = 0.157 / \sqrt{t_s}$$



Corrientes Tolerables

Fallas con Restauradores

- El recierre en sistemas modernos de distribución eléctrica es común. En este caso, la persona puede ser afectada por la primera falla, que no lo hiere mortalmente pero que lo deja confundido y afectado temporalmente. Luego, un recierre automático pudiera resultar en un segundo choque eléctrico que se inicia a menos de 0.5 segundos del inicio del primer choque.



Corrientes Tolerables

Fallas con Restauradores

- Es este segundo choque eléctrico que ocurre después de un corto período de tiempo sin darle a la persona el tiempo de recuperación, que puede causar un serio accidente.
- En el caso de que ocurran varios choques eléctricos a cortos intervalos, se deberá sumar el tiempo de cada choque y este tiempo total se introducirá en la fórmula anterior como el valor t_s .



Consideraciones Básicas del Diseño de la Malla

1. Un conductor continuo (loop) debe rodear totalmente el perímetro de la subestación, de tal manera que encierre la mayor área posible.
2. Dentro de este loop, se deben tender conductores adicionales en forma paralela y en forma de malla. Cuando es práctico, estos conductores deben pasar por debajo de los equipos electricos y unirse a ellos usando puentes de unión cortos.



Consideraciones Básicas del Diseño de la Malla

3. Una malla típica de tierras para una subestación externa puede incluir conductores desnudos de cobre calibre AWG No. 4/0, enterrados a una profundidad de 0.3 a 0.5m, y espaciados de 3 a 7m. En los puntos de cruce, los conductores deben estar unidos en forma segura y eficaz.
4. Se recomienda que electrodos de tierra en forma de varillas, se instalen en equipos electricos principales, como transformadores e interruptores.



Consideraciones Básicas del Diseño de la Malla

5. En suelos de capas de resistividad diferentes (múltiples capas) o en suelos de mucha resistividad, se recomienda usar electrodos de tierra de mayor profundidad. Longitudes de más de 33 m han sido usadas.
6. Se debe extender la malla de tierra sobre todo el área de la subestación y muy a menudo sobrepasando la malla ciclónica.



Consideraciones Básicas del Diseño de la Malla

7. Múltiples puentes de unión o conductores de mayor capacidad deben ser usados donde existe alta concentración de corriente como en la conexión de neutro a tierra en transformadores, generadores y bancos de capacitores.
8. Generalmente, la proporción de los lados de la malla es de 1:1 o de 1:3, a menos que la situación amerite un estudio detallado hecho por computadora.



Situaciones Difíciles

1. Existen situaciones donde el la resistividad del terreno es alta o el área de la subestación es reducida y no sea posible extender la malla a un área mayor.
2. Como resultado de esto, no será posible tener un sistema de tierras de baja resistencia.
3. Esta situación crea dificultades en lograr un control de gradientes aceptable en el área de la subestación.



Diseño en Situaciones Difíciles

- 1. Hacer conexiones a mallas remotas y a sistemas de tierras adyacentes. Esta solución requiere un estudio cuidadoso del efecto de los potenciales transferidos, localización de protectores de sobrevoltaje y otras consideraciones adicionales. Una caída de voltaje considerable puede existir entre el sistema de tierra local y el remoto.**
- 2. Uso de electrodos de tierra profundos y pozos de agua profundos en combinación con el tratamiento químico del suelo y el uso de Bentonita alrededor de estos electrodos.**



Diseño en Situaciones Difíciles

3. **Uso de mallas complementarias de metal con una densidad de 0.6×0.6 m instalada a una profundidad entre 0.05 y 0.15m y por encima de la malla principal que generalmente se encuentra entre 0.3 a 0.5m.**
4. **Cuando sea posible, el uso controlado de otros medio disponibles de bajar la resistencia total del sistema de tierra de la subestación. Típicamente se puede usar objetos metálicos cercanos que califiquen como electrodos auxiliares.**



Diseño en Situaciones Difíciles

5. Cuando sea posible, un depósito cercano de material de baja resistividad y de volumen suficiente puede ser usado para la instalación de una malla de tierra satélite. Esta malla satélite, cuando tiene varias conexiones a la malla principal, reducirá la resistividad total y por lo tanto el GPR de la malla principal. El tipo de material de baja resistividad pudiera ser barro o parte de una gran estructura como un masa de concreto de una represa hidroeléctrica.



Conexiones a la Malla

Se deben usar conductores de la capacidad adecuada y fortaleza mecánica para conectar lo siguiente:

- 1. Todos los electrodos de tierra. Como la malla horizontal de tierra, los electrodos verticales (varillas), pozos, y cuando sea aplicable, tuberías metálicas de agua y gas.**
- 2. Todas las partes metálicas sobre la superficie del suelo que puedan ser energizadas.**



Conexiones a la Malla

3. Todas las fuentes de cortocircuito, como apartarrayos, banco de capacitores y transformadores.
4. Aquellos equipos que probablemente conducirán mayor corriente de falla, como transformadores, carcazas metálicas de interruptores de potencia, deberán usar dos o más puentes para hacer la conexión a la malla de tierra de la subestación.

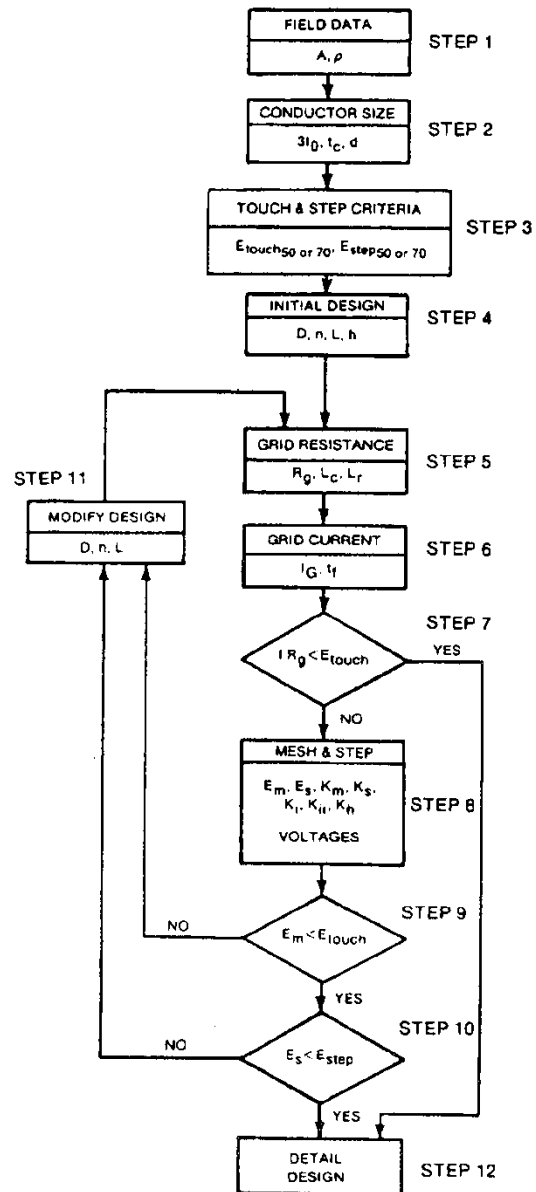


Fig 26
Design Procedure Block Diagram



Selección de los Conductores y Uniones

1. Todos los conductores, puentes de unión y uniones deben tener la suficiente conductividad para no contribuir en forma sustancial a formar gradientes de potencial locales.
2. Todos los conductores, puentes de unión y uniones deben tener la capacidad de conducir la máxima falla a tierra en su duración, sin fundirse.
3. Todos los conductores, puentes de unión y uniones deben tener la física de resistir abuso mecánico y corrosión.



Selección de los Conductores

Cálculo del Calibre Mínimo (mm²)

$$A_{\text{mm}^2} = I \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \cdot 10^4}{\text{TCAP}}}{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}}$$



Selección de los Conductores

Cálculo del Calibre Mínimo (cmils)

$$A_{\text{cmils}} = 1973.52 I \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \cdot 10^4}{\text{TCAP}}}{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}}$$



Selección de los Conductores

Cálculo del Calibre Mínimo

I = Corriente a través del conductor en kA

A = Sección transversal del conductor en mm^2

T_m = Temperatura máxima permitida en $^{\circ}\text{C}$

T_a = Temperatura ambiente

T_r = Temperatura de referencia para la constante de materiales en $^{\circ}\text{C}$

α_0 = Coeficiente térmico de resistividad a 0°C

α_r = Coeficiente térmico de resistividad a temperatura de referencia T_r

ρ_r = Resistividad del conductor de tierra a temperatura de referencia T_r
en $\Omega\cdot\text{cm}$

$K_0 = 1/\alpha_0$ o $(1/\alpha_r) \cdot T_r$

t_t = Tiempo durante el cual fluye la corriente por el conductor en seg.

TCAP = Factor de capacidad térmica en $\text{J}/\text{cm}^3/^{\circ}\text{C}$

TCAP = $4.184 \times \text{CE} \times \text{PE}$ CE = Calor específico PE = Peso Específico



Table 1
Material Constants

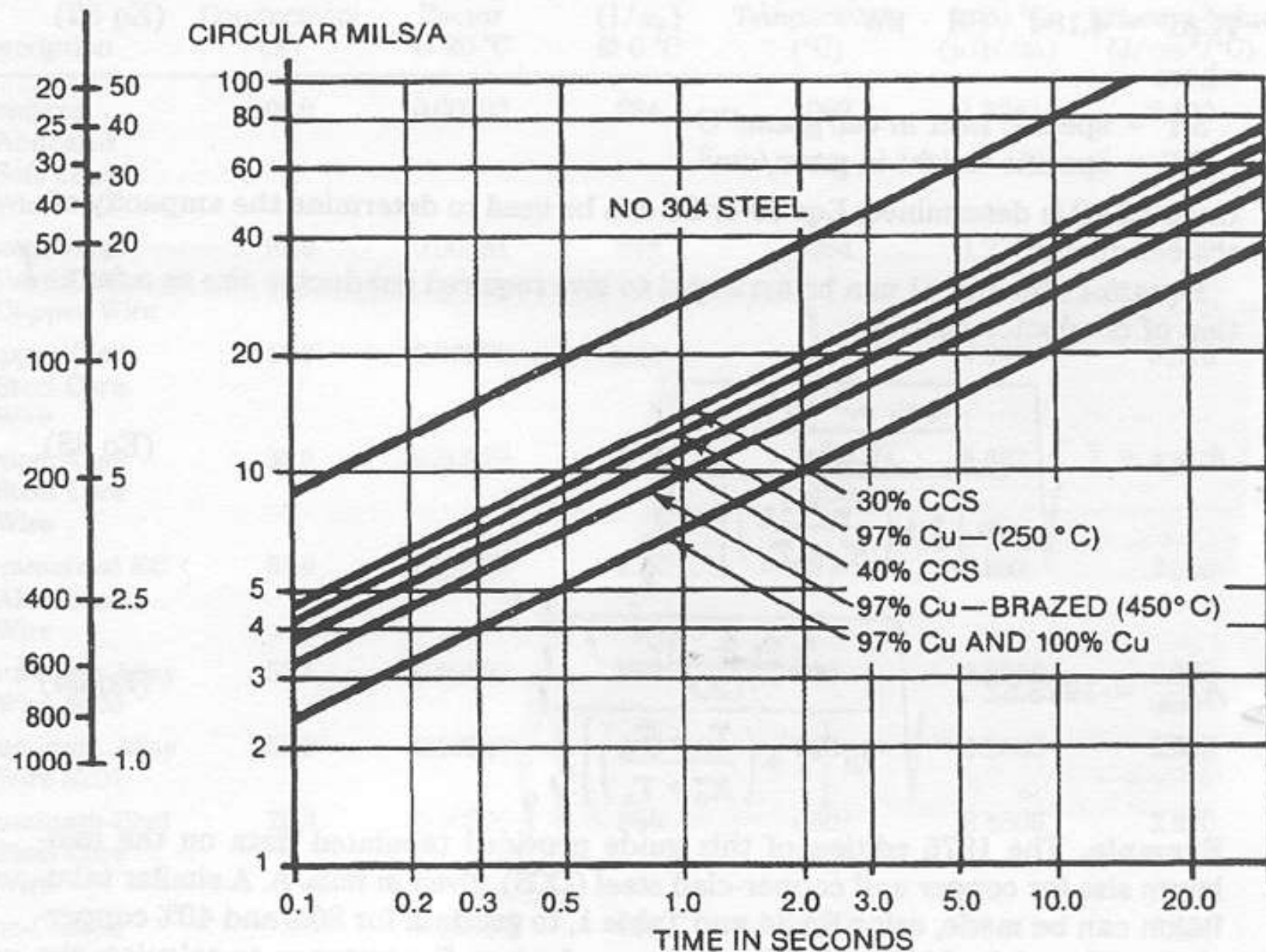
Description	Material Conductivity (%)	α_r Factor @ 20 °C	K ($1/\alpha_0$) @ 0 °C	Fusing Temperature (°C)	ρ_r @ 20 °C ($\mu\Omega/\text{cm}$)	TCAP Factor Effective Value ($\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$)
Standard Annealed Soft Copper Wire	100.0	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Commercial Hard Drawn Copper Wire	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Copper-Clad Steel Core Wire	40.0	0.00378	245	1084/ 1300	4.397	3.846
Copper-Clad Steel Core Wire	30.0	0.00378	245	1084/ 1300	5.862	3.846
Commercial EC Aluminum Wire	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aluminum Alloy Wire 5005	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Aluminum Alloy Wire 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
Aluminum-Clad Steel Core Wire	20.3	0.00360	258	660/ 1300	8.4805	2.670
Zinc-Coated Steel Core Wire	8.5	0.00320	293	419/ 1300	20.1	3.931
Stainless Steel No 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032



Fig 14
Nomogram for Conductor Sizing

A/mm² mm²/kA CONDUCTOR SIZE

CIRCULAR MILS/A





Selección de los Conductores

Table 2
Minimum per Unit Conductor Sizes (cmils/A)

Fault Time (s)	100% Cu Only	97% Cu Only	40% CCS Only	30% CCS Only	97% Cu/Temperature Limits (450 °C)	97% Cu/Temperature Limits (250 °C)
30.0	38.4	38.7	57.0	65.8	51.1	64.5
4.0	14.0	14.2	20.8	24.0	18.7	23.5
1.0	7.0	7.1	10.4	12.0	9.3	11.8
0.5	4.9	5.0	7.4	8.5	6.6	8.3



Selección de las Uniones

- La temperatura máxima de uniones a base de bronce (brazed) es de 450 °C.
- Soldadura exotérmica. Se considera de la misma capacidad del conductor.
- Conectores de Presión. Si no se tiene otra información específica del fabricante, no exceder de 350 °C.



Máximos Voltajes Permitidos

Máximo Voltaje de Paso Permitido

$$E_{\text{paso50}} = (1,000 + 6 \times C_s \times \rho_s) \times 0.116 / \sqrt{t_s}$$

$$E_{\text{paso70}} = (1,000 + 6 \times C_s \times \rho_s) \times 0.157 / \sqrt{t_s}$$

$C_s = 1$ si no existe la capa de roca superficial sobre el suelo de la subestación

$$C_s = 1 / 0.96 \times \left(1 + 2 \times \left\{ \sqrt[n]{K} / \sqrt{1 + (2 \times n \times h_s / 0.008)^2} \right\} \right)$$

$$K = (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s)$$

E_{paso50} = máximo voltaje de paso (50 kg)

E_{paso70} = máximo voltaje de paso (70 kg)

ρ_s = resistividad de la capa de roca superficial sobre el suelo de la subestación

ρ = resistividad del terreno debajo de la subestación

h_s = grosor de la capa de roca superficial sobre el suelo de la subestación

t_s = tiempo de apertura total del dispositivo protector contra fallas a tierra



Máximos Voltajes Permitidos

El voltaje **real** de paso, de toque y de malla debe ser menor que el voltaje **permitido** de paso, de toque y de malla respectivamente.



Calculo de la Resistencia de la Malla

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (\text{Eq 40})$$

where h is the depth of the grid. For grids without ground rods, this formula has been tested to yield results that are practically identical to those obtained with Eq 42 of Schwarz, described in 12.3 (see also [B100]).



Calculo de la Resistencia de la Malla

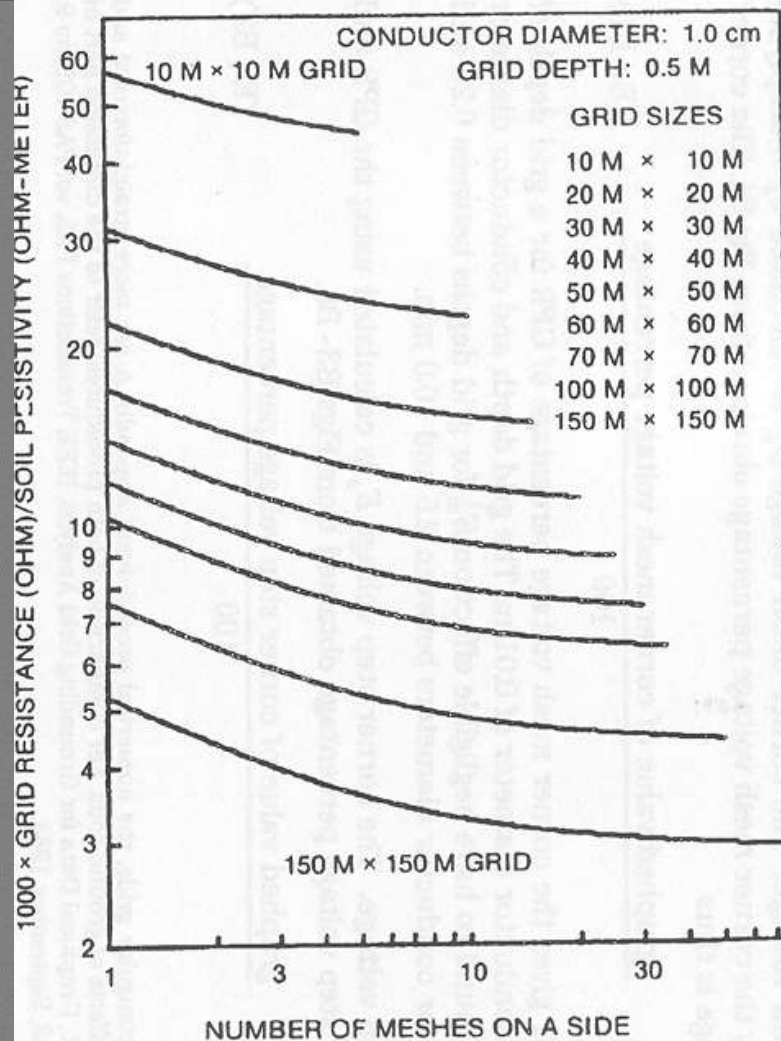


Fig B1
Corner Mesh Voltage for a Square Grid in Depth
0.5 m and 1 cm Conductor Diameter



Calculo de la Corriente Máxima de la Malla

symmetrical grid current. That portion of the symmetrical ground fault current that flows between the grounding grid and surrounding earth. It may be expressed as

$$I_g = S_f I_f \quad I_f = 3I_o \quad (\text{Eq 53})$$

where

I_g = symmetrical grid current in A

I_f = rms value of symmetrical ground fault current in A

S_f = current division factor relating the magnitude of fault current to that of its portion flowing between the grounding grid and surrounding earth

maximum grid current. A design value of the maximum grid current, defined as follows:

$$I_G = C_p D_f I_g = C_p \cdot D_f \cdot S_f \cdot I_f \quad (\text{Eq 54})$$

where

I_G = maximum grid current in A

D_f = decrement factor for the entire duration of fault t_f , found for t_f given in s

C_p = corrective projection factor accounting for the relative increase of fault currents during the station lifespan; for a zero future system growth $C_p = 1$

I_g = rms symmetrical grid current in A



Calculo de la Corriente Máxima de la Malla

Table 6
Typical Values of D_f

$$(X/R = 20)$$

Fault Duration t_f (s)	Cycles (60 Hz ac)	Decrement Factor D_f
0.008	$\frac{1}{2}$	1.65
0.1	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 or more	30 or more	1.0



Calculo del Máximo Potencial de Malla (E_m)

$$E_{m(GR)} = (\rho \times I_G \times K_m \times K_i) / (L_c + 1.15 \times L_r)$$

$$E_{m(NGR)} = (\rho \times I_G \times K_m \times K_i) / (L_c + L_r)$$

L_c = Longitud total de malla

L_r = Longitud total de varillas

ρ = Resistividad del suelo de la subestación

Limitaciones

$n \bullet 25$

$0.25 \text{ m} \bullet h \bullet 2.5 \text{ m}$

$d \square 0.25 \text{ h}$

$D \odot 2.5 \text{ m}$



Calculo del Máximo Potencial de Malla (E_m)

$$K_i = 0.656 + 0.172 \times n$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (\text{Eq 68})$$

where

$K_{ii} = 1$ for grids with ground rods along the perimeter, or for grids with ground rods in the grid corners, as well as both along the perimeter and throughout the grid area

$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$ for grids with no ground rods or grids with only a few ground rods, none located in the corners or on the perimeter

$$K_h = \sqrt{1 + h/h_o}$$

$h_o = 1$ m (reference depth of grid)

and D , h , n , and d are defined in Table 8.



Table 8
Index of Design Parameters



Symbol	Description	Reference Sections
$3I_0$	Symmetrical fault current in substation for conductor sizing in A	9.3, 9.4, 13.2, 13.4
I_G	Maximum grid current that flows between ground grid and surrounding earth (including dc offset) in A	13.4
ρ	Soil resistivity in $\Omega\cdot\text{m}$	11
ρ_s	Surface layer resistivity in $\Omega\cdot\text{m}$	5.4, 10.5
h_s	Surface layer thickness	5.4
C_p	Current projection factor for future system growth	13.1, 13.10
C_s	Surface layer resistivity derating factor	5.4
t_c	Duration of fault current for sizing ground conductor in s	9.3, 9.4, 9.6
t_f	Duration of fault current for determining decrement factor in s	13.9
t_s	Duration of shock for determining allowable body current in s	3.2-4.3
h	Depth of ground grid conductors in m	12.2, 12.3
d	Diameter of grid conductor in m	9.3, 9.4, 9.6
A	Total area enclosed by ground grid in m^2	12.2, 12.3
D	Spacing between parallel conductors in m	14.4, 14.5
D_f	Decrement factor for determining I_G	13.1, 13.9, 14.2
n	Number of parallel conductors in one direction	14.4, 14.5
K_m	Spacing factor for mesh voltage, simplified method	14.4, 14.5
K_s	Spacing factor for step voltage, simplified method	14.4, 14.5
K_i	Corrected factor for grid geometry, simplified method	14.4, 14.5
K_{ii}	Corrective weighting factor that adjusts the effects of inner conductors on the corner mesh, simplified method	14.5, A
K_h	Corrective weighting factor that emphasizes the effects of grid depth, simplified method	14.5, A
L	Total length of grounding system conductor, including grid and ground rods in m	14.5
R_g	Resistance of ground system in Ω	12.1-12.4
E_m	Mesh voltage at the center of the corner mesh for simplified method in V	14.4-14.5
E_s	Step voltage between a point above the outer corner of the grid and a point 1 m diagonally outside the grid for simplified method in V	14.4-14.5
$E_{\text{touch}50}$	Tolerable touch voltage for human with 50 kg body weight in V	6.2, 6.3
$E_{\text{touch}70}$	Tolerable touch voltage for human with 70 kg body weight in V	6.2, 6.3
$E_{\text{step}50}$	Tolerable step voltage for human with 50 kg body weight in V	6.2
$E_{\text{step}70}$	Tolerable step voltage for human with 70 kg body weight in V	6.2



Calculo del Máximo Potencial de Malla (E_m)

Although the equations of 14.5 have been tested for n greater than 25 and found to be sufficiently accurate, the tests were not extensive enough to form solid conclusions. Thus, caution should be exercised before exceeding the limits given above.

Furthermore, for equally spaced rectangular grids (that is, with square meshes), the value of n for use on determining the mesh voltage factor K_m and the irregularity factor K_i (using Eqs 68 and 69) should be the geometric mean of the number of conductors in either direction. That is,

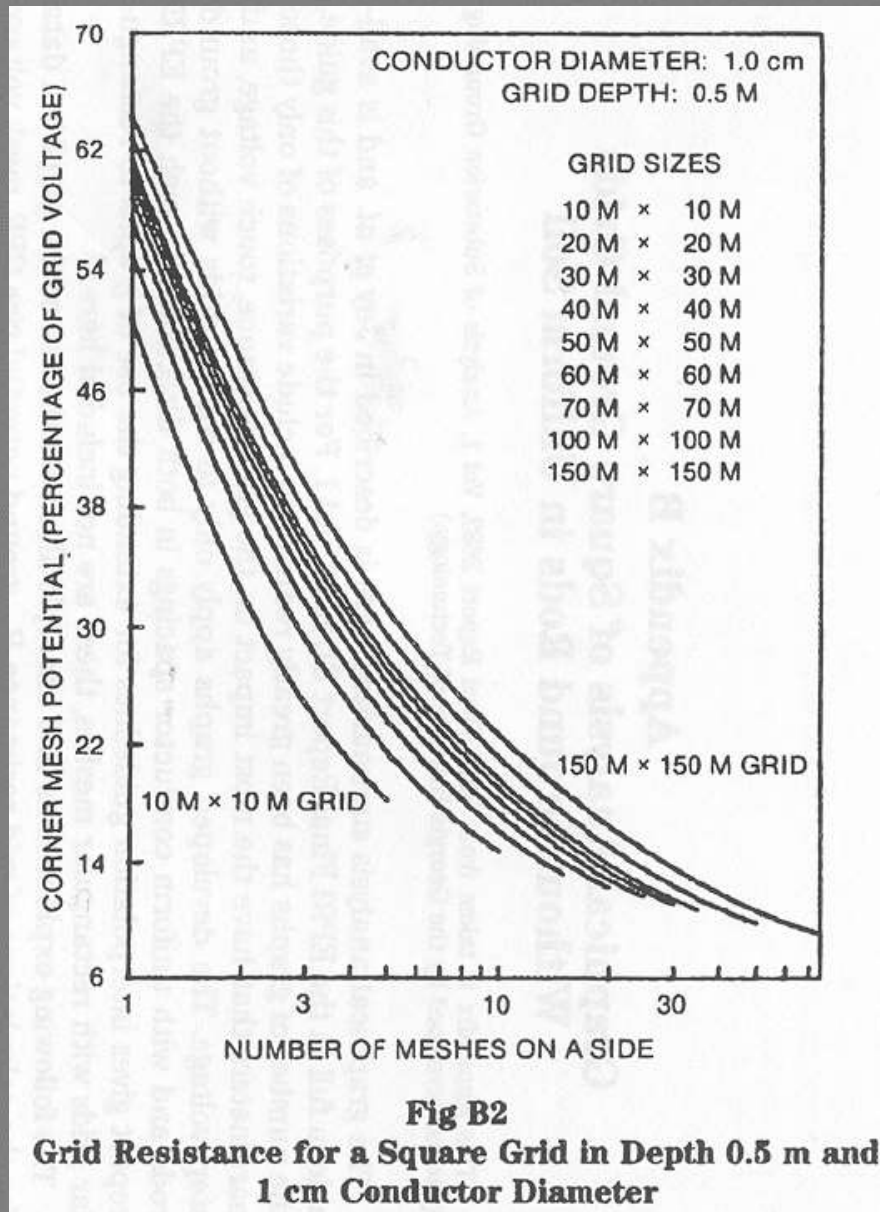
$$n = \sqrt{n_A n_B} \quad \text{for calculating } E_m \quad \leftarrow \quad \text{(Eq 79)}$$

when n_A and n_B are the number of conductors in each direction. The value of n for use in determining the step voltage factor K_s and the irregularity factor K_i (Eqs 69, 74, and 75) should be the maximum of n_A and n_B

$$n = \max(n_A, n_B) \quad \text{for calculating } E_s \quad \leftarrow \quad \text{(Eq 80)}$$



Calculo del Máximo Potencial de Malla (E_m)





Calculo del Máximo Potencial de Paso (E_s)

$$E_s = (\square \times I_G \times K_s \times K_i)$$

$L = (L_c + L_r)$ para mallas sin varillas o algunas en el centro lejos del perímetro

$L = (L_c + 1.15 \times L_r)$ para mallas con varillas predominantemente en el perímetro



Calculo del Máximo Potencial de Paso (E_s)

For simplification, the maximum step voltage is assumed to occur at a distance equal to the grid depth, h , just outside the perimeter conductor. For the usual burial depth of $0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1-0.5^{n-2}) \right] \quad (\text{Eq 74})$$

and for depths smaller than 0.25 m,

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} W \right] \quad (\text{Eq 75})$$

where $n < 6$

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \dots + \frac{1}{n-1}$$

or for $n \geq 6$

$$W \approx \frac{1}{2(n-1)} + \ln(n-1) - 0.423$$

$n = \#$ OF PARALLEL CONDUCTORS
IN ONE DIRECTION

The use of a different equation for K_s , depending on the grid depth h , reflects the fact that the step voltage decreases rapidly with increased depth. *



Calculo del Máximo Potencial de Paso (E_s)

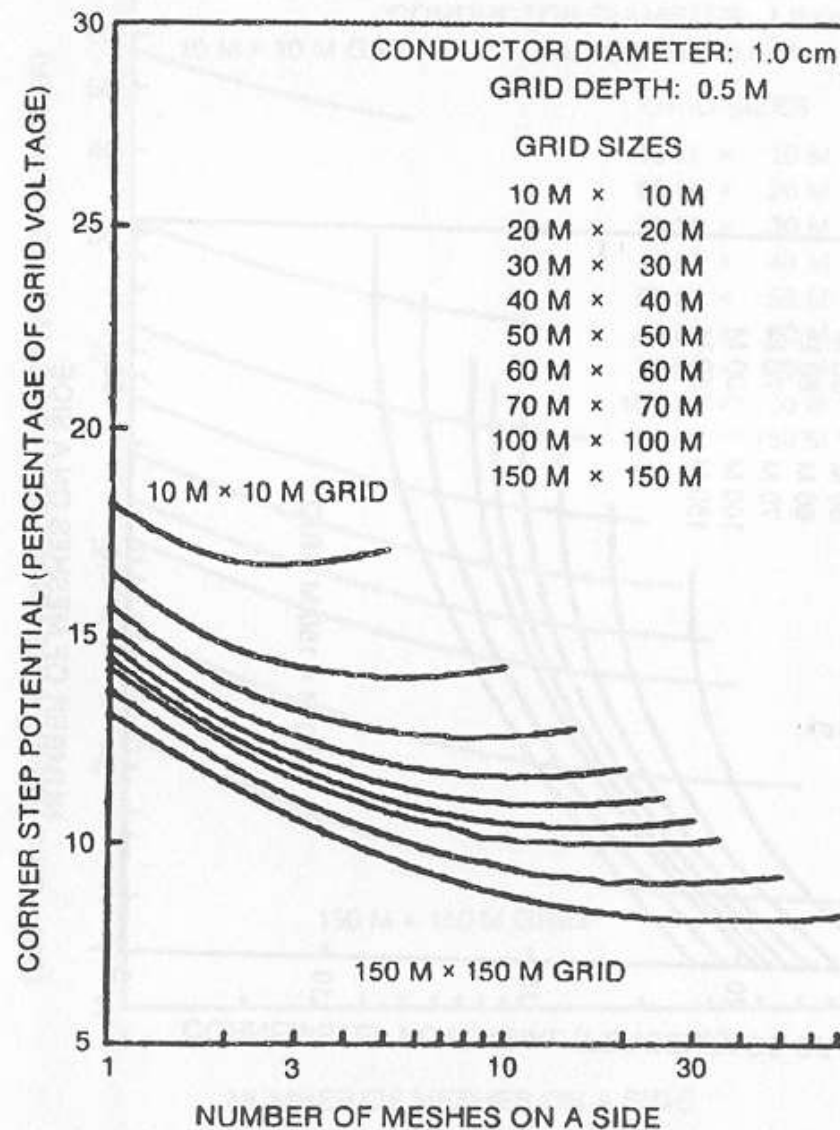


Fig B4



Estimado de la Longitud Mínima de Cable Enterrado

14.6 Estimate of Minimum Buried Conductor Length. A simple equation can be developed to permit a preliminary determination of buried grid conductor necessary to keep the maximum touch voltage within the grounded area below the safe limits established by Eqs 26 and 26a of 6.2. This is done by equating Eq 67 with Eq 26 or 26a of 6.2 as shown below.

For $E_m < E_{\text{touch}50}$, combining Eqs ~~71~~ and 26 gives

$$\frac{K_m K_i \rho I_G}{L} < (1000 + 1.5 C(h, K) \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{Eq 76})$$

Rearranging Eq 76 for L gives

$$L > \frac{K_m K_i \rho I_G \sqrt{t_s}}{(116 + 0.174 C(h, K) \rho_s)} \quad (\text{Eq 77})$$

(D, h, d, n)

Similarly, for $E_m < E_{\text{touch}70}$, combining and rearranging Eqs 70 and 26 gives

$$L > \frac{K_m K_i \rho I_G \sqrt{t_s}}{(157 + 0.235 C(h, K) \rho_s)} \quad (\text{Eq 78})$$



Voltajes Transferidos



15. Investigations of Transferred Potentials

A serious hazard may result during a fault from the transfer of potentials between the ground-grid areas and outside points, by conductors such as communication and signal circuits, low-voltage neutral wires, conduit, pipes, rails, metallic fences, etc. The danger is usually from contacts of the *touch* type. The importance of the problem results from the very high magnitude of potential difference that is often possible. As mentioned in 6.1, this potential difference may equal or exceed the GPR of the substation. In fact, induced voltages on unshielded communication circuits, static wires, pipes, etc, may result in transferred potentials exceeding the sum of the GPR's of both the faulted substation and the source substation. For any of the cases discussed below, where induced potentials might exist, the metallic paths should be treated as *live* and should be clearly labeled as such.

15.1 Communication Circuits. For communication circuits, schemes have been developed involving protective devices and insulating and neutralizing transformers to safeguard personnel and communications terminal equipment. These will not be discussed here except to emphasize the importance of adequate insulation and isolation from accidental contact of any of these devices, and their wiring, which may reach a high voltage with respect to local ground. This is often overlooked. The introduction of fiber optics to isolate the substation communications terminal from the remote terminal can eliminate the transfer of high potentials. Fiber optics should be considered when potentials cannot easily be controlled by more conventional means.

15.2 Rails. Rails entering the station, when connected either intentionally or otherwise to the ground grid, can theoretically create a hazard at a remote point by transferring there the grid potential rise during a fault. Similarly, if grounded remotely, a hazard can be introduced into the station area. Where considered serious, these hazards can be removed by removable track sections where the rails leave the ground-grid area, or by installing several insulating joints in the rails leaving the grid area. A second set of insulating joints beyond the first would provide against the shunting of a single set by a metal car or the soil itself, and also reduce the somewhat remote hazard of accident from potential differences across a joint itself. The insulating joints must be capable of withstanding the potential difference between remote earth and the potential transferred to the joint. Adequate creepage distance should be ensured to offset any pollution or contamination problems.



Voltajes Transferidos

15.3 Low-Voltage Neutral Wires. Hazards are possible where low-voltage feeders or secondary circuits, serving points outside the station area, have their neutrals connected to the station ground. When the potential of the station ground grid rises as the result of ground-fault current flow, all, or a large part, of this potential rise may then appear at remote points as a dangerous voltage between this *grounded* neutral wire and the adjacent earth; moreover, where other connections to earth are also provided, the flow of fault current through these may, under unfavorable conditions, create gradient hazards at points remote from the station.

To avoid these difficulties, the low-voltage neutral may be isolated from ground at the station itself, always provided, however, that this does not result in slowing down the clearing time for low-voltage faults to the point where the total hazard is increased rather than diminished. If the low-voltage neutral is isolated from that station ground, it then becomes necessary to avoid hazards at the station due to the introduction, via the neutral wire, of remote earth potential. This implies that this neutral, in and near the station, should be treated as a *live* conductor. It should be insulated from the station ground system by insulation adequate to withstand the maximum ground-grid potential rise, and it should be located so as to minimize the danger of being contacted by personnel.



Voltajes Transferidos

15.5 Piping. Pipelines should always be tied to the station ground system, preferably at several points, to avoid hazards within the station area. The same is generally true of other conductors, such as cable sheaths or armor, which are more or less in direct contact with the soil. Where these systems are very extensive, they may aid greatly toward reduction of the station ground-grid resistance.

If it is desirable to limit the potential to the substation area, insulated pipe sections may be inserted in the pipeline. The insulated sections should be of sufficient length to avoid shunting by the adjacent soil and be capable of withstanding the potential difference between remote earth and the potential transferred to the joint.



Voltajes Transferidos

15.6 Auxiliary Buildings. Auxiliary buildings can be treated as part of the substation for grounding purposes, or as separate installations, depending on circumstances. If the buildings and substation are relatively close, and especially if the buildings are linked directly to the substation by such things as water pipes, cable sheaths, phone lines, etc, it is appropriate to treat such buildings and their immediate area as part of the substation. As such, the buildings should be grounded using the same safety criteria as the substation. If the buildings are not as close, and if such conducting links are lacking, it may be decided to treat such buildings as separate units with their own local safety grounds. If served electrically from the substation, they should have their own distribution transformers of a type to provide adequate insulation against transfer of the substation ground-grid potential rise. Secondary neutrals would, in this case, be connected to the local ground at the auxiliary buildings only.



Situaciones Peligrosas

1. Puntos de operación
2. Malla Ciclónica
3. Blindaje de Cables
4. Apartarrayos



PRINCIPIOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE TIERRAS

Recomendaciones para efectuar las mediciones

Enterrar uno o mas electrodos de tierra de una altura de 3m, y enterrarla a 2.4m como mínimo esto de acuerdo a la NOM-001-SEDE-1999 para poder crear una malla o red de mallas

Para realizar una medición por el método del 62 % se selecciona un electrodo al azar .

Por ejemplo si se desea calcular la resistencia de tierra a una distancia de 15m se colocaran dos electrodos de 30 cm cada uno. El segundo a 9.3m del primer electrodo (esto es el 62 % de 15m)



TIPOS DE METODOS

- Método de 3 puntos
- Metodo del 62 %
- Metodo de 2 puntos (simplificado)
- Metodo de 4 puntos
- Medición de potencial de toque
- Medición con pinzas caimán

Se comprobó que ningún método de medición de la resistencia es 100% efectivo, esto no quiere decir que sean malos, sino que hay que realizar varias mediciones para poder obtener un promedio de las mediciones, es decir, un valor mas exacto.



A continuación se explicaran algunos de los métodos y los mas comunes, prácticos y efectivos dentro de toda la gama de métodos

Metodo de falla de potencial (3 puntos)

La diferencia de potencial entre las picas X y Y es medida con un voltímetro, y la corriente que fluye entre las picas X y Z es medida con un amperímetro (NOTA: X, Y y Z pueden referirse como X, Y, P y C en un probador de tres puntos o C1, P2 y C2 en un probador de 4 puntos, ver fig. 11).

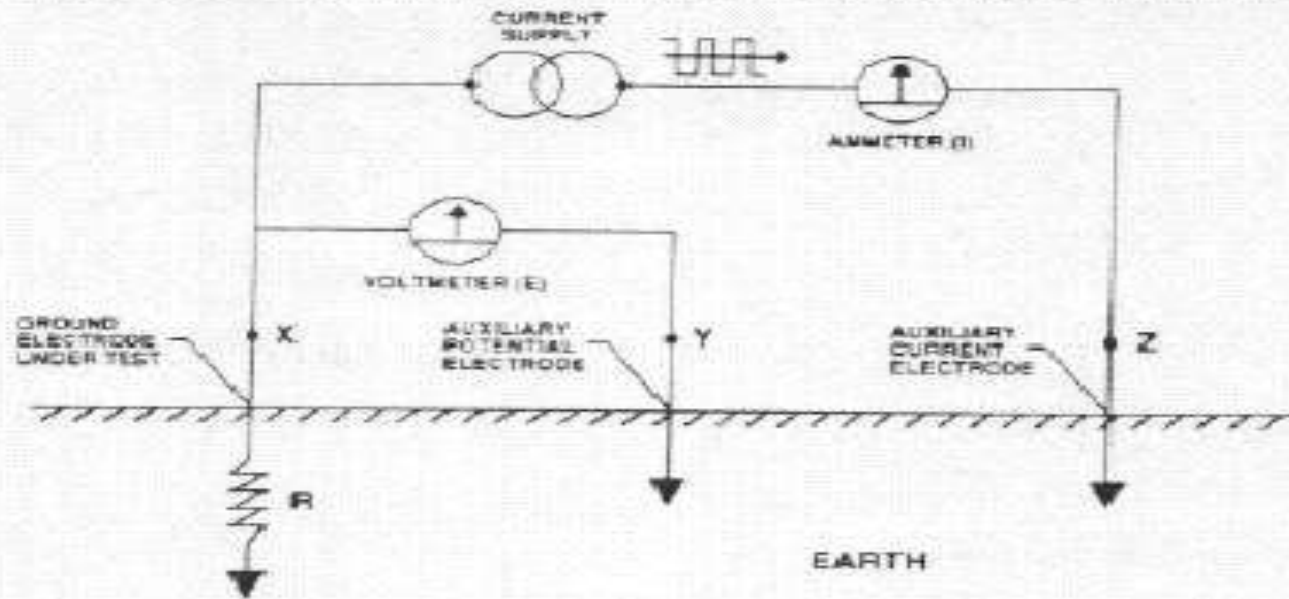


Figure 11

Por la ley de Ohm: $E=RI$ ó $R=E/I$, nosotros podemos obtener la resistencia R de un electrodo de tierra.

Si $E=20\text{ V}$, $I=1\text{ A}$ entonces $R=20\text{ ohms}$



Metodo del 62 %

Este método fue adaptado después de consideraciones graficas y antes de los métodos actuales de prueba

Este método es el mas preciso, pero esta limitado por los factores de probadores de tierra como unidad separada

Aplica solamente cuando los 3 electrodos están alineados en línea recta y la tierra es un solo electrodo, tubo o placa. Etc. Como se muestra



Para realizar una medición por el método del 62 % se selecciona un electrodo al azar .

Por ejemplo si se desea calcular la resistencia de tierra a una distancia de 15m se colocaran dos electrodos de 30 cm cada uno. El segundo a 9.3m del primer electrodo (esto es el 62 % de 15m), El tercero a 15m, que será el 100 % de la distancia

Considerando la figura 15, la cual nos muestra que las áreas de resistencia efectiva (capas concéntricas) del electrodo de tierra X y el electrodo de tierra auxiliar Z, Las áreas traslapadas de resistencia. Si las lecturas se toman moviendo el electrodo de potencial auxiliar Y hacia los electrodos X ó Z, los diferenciales en las lecturas habrán de ser diferentes y no se podrá obtener una sola lectura dentro de una banda razonable de tolerancia. Las áreas sensitivas se traslapan y actúan constantemente para incrementar la resistencia, tanto como Y se mueva lejos de X.

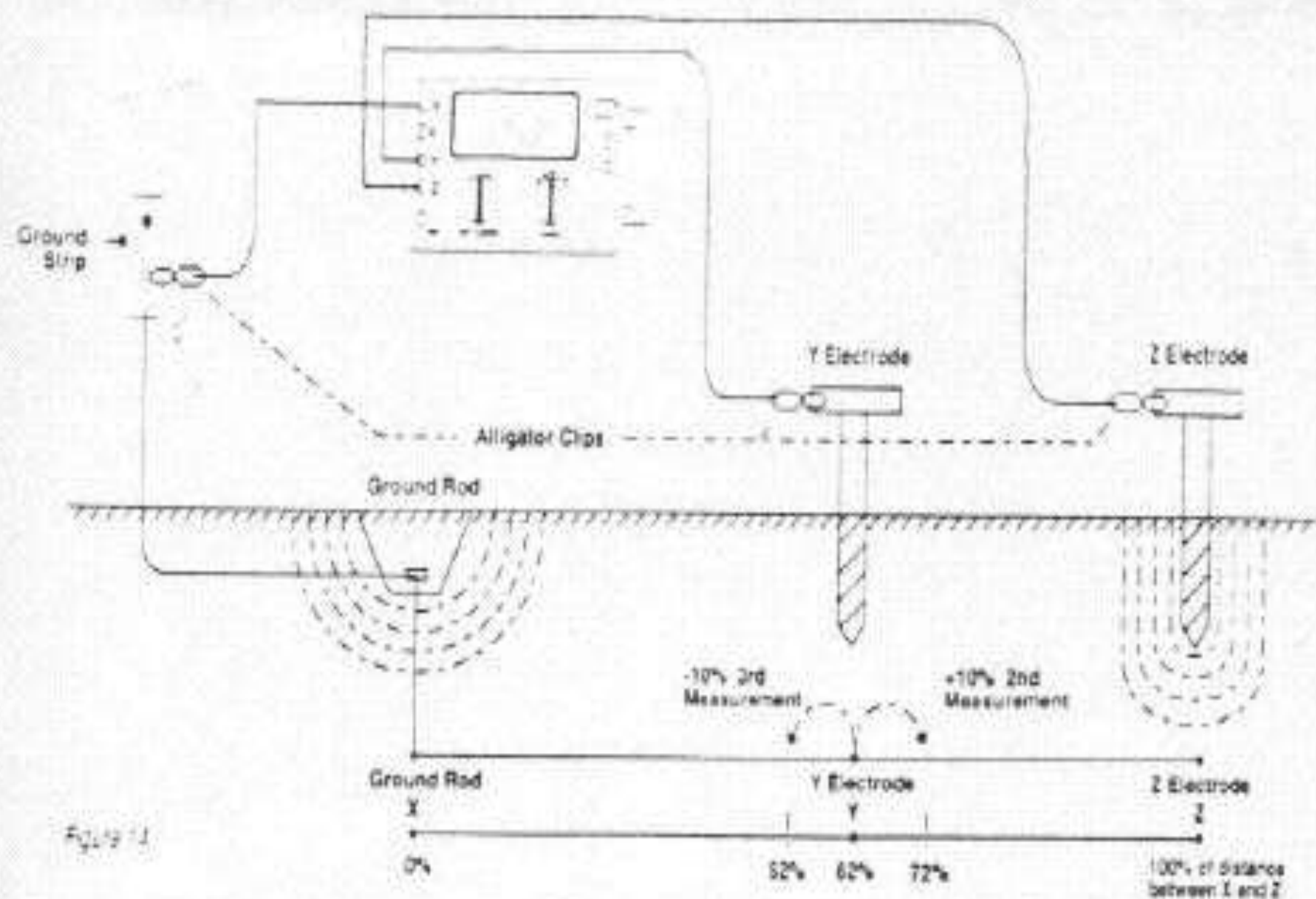
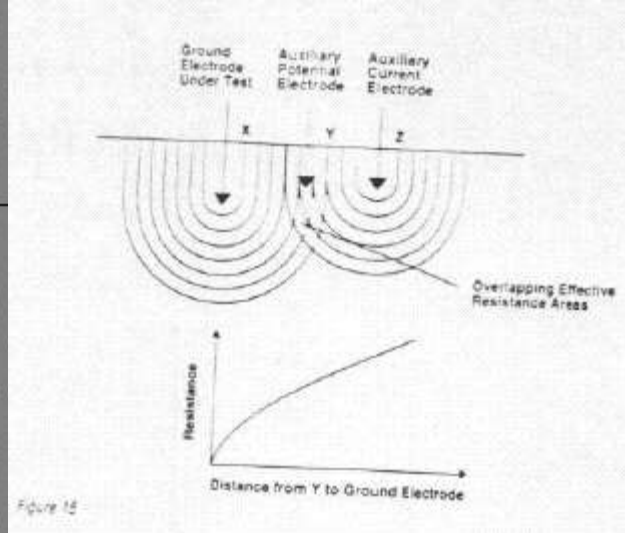
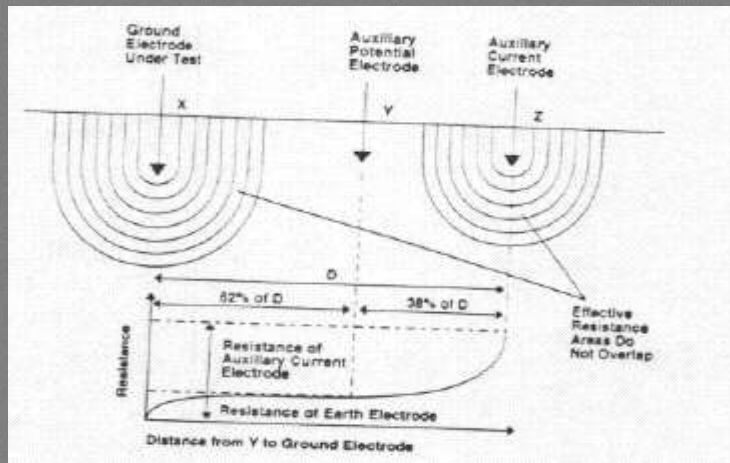


Fig. 12-1



Ahora consideremos la fig. 16 en donde los electrodos X y Z están suficientemente separados de tal forma que las áreas efectivas de resistencia no se traslapan, si nosotros aumentamos las medidas de resistencia encontraremos que los niveles de medición se pierden cuando Y se coloca al 62% de la distancia de X a Z, y que las lecturas en cualquiera de los dos lados de la posición inicial de Y se parecen más a las de la banda de tolerancia establecida.

Esta banda de tolerancia es definida por el usuario y expresada como un porcentaje de las lecturas iniciales: ± 2 , ± 5 , etc.





Metodo de los 2 puntos

MEDICIÓN DE DOS PUNTOS (MÉTODO DE SIMPLIFICADO)

Este es un método alternativo que se utiliza cuando se tiene disponible una excelente tierra. En áreas congestionadas donde es difícil encontrar espacio para colocar los dos electrodos auxiliares puede ser un problema. El método de medición de dos puntos puede ser aplicado. La lectura obtenida será la de las dos tierras en serie, en consecuencia, la tubería de agua u otra tierra deberá ser muy baja en resistencia de tal forma que sea despreciable en la medición final. Las resistencias guía deben ser medidas también y deberán ser deducidas de la medición final. Este método no es tan preciso como el método de los dos puntos (método del 62%) ya que es particularmente afectado por la distancia entre los electrodos de prueba entre la tierra muerta o tubería de agua. Este método no debe ser utilizado como un procedimiento estándar, pero puede ser usado en lugar de, como respaldo en áreas reducidas. Ver figura 18.

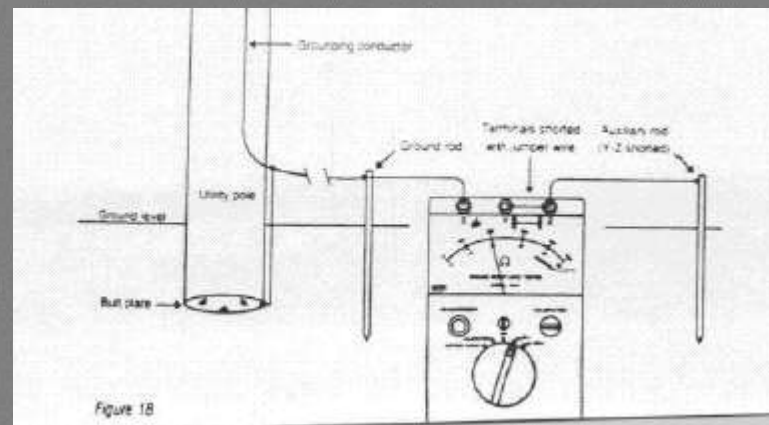


Figure 18

Metodo con pinza caimán

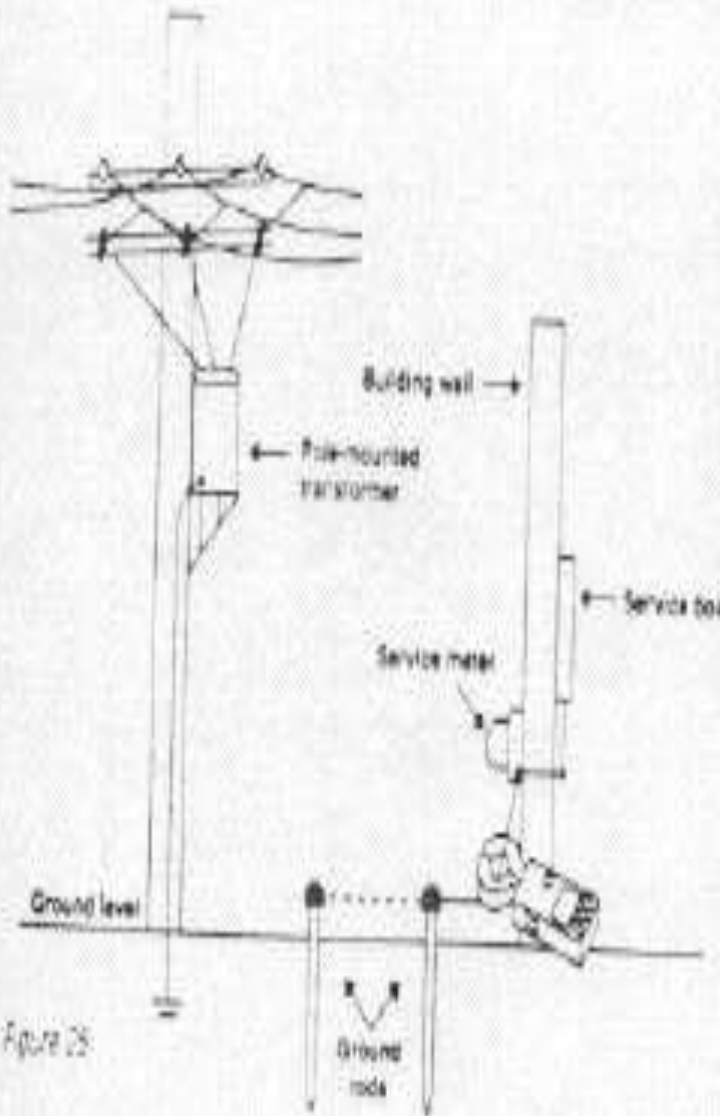


Figure 28



DETERMINACIÓN DEL CALIBRE DE LOS CONDUCTORES DEL SISTEMA DE TIERRA

De acuerdo a la NOM-001-SEDE-1999.

a) Conductor del electrodo de puesta a tierra. El conductor del electrodo de puesta a tierra debe ser de cobre o aluminio. El material elegido debe ser resistente a la corrosión que se pueda producir en la instalación, y debe estar adecuadamente protegido contra la corrosión. El conductor debe ser macizo o cableado, aislado, forrado o desnudo, y debe ser de un solo tramo continuo, sin empalmes ni uniones.



Capacidad o ajuste máximo del dispositivo automático de protección contra sobrecorriente en el circuito antes de los equipos, canalizaciones, etc. (A)	Tamaño nominal mm ² (AWG o kcmil)		
		Cable de cobre	Cable de aluminio
5	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 7. Tamaño nominal mínimo de los conductores de tierra para canalizaciones y equipos.



CONCLUSIONES

Un sistema de puesta a tierra consta de varios elementos como son: electrodos, conductor, tabillas de conexión, conectores, registros, compuestos químicos, etc.

Para poder instalar un sistema de puesta a tierra, es imprescindible conocer el valor de resistividad que tiene el terreno.

Es importante conocer el valor de la resistividad del terreno para que el sistema de puesta a tierra sea eficiente.

En un sistema de puesta a tierra el calibre del conductor que se utilice debe de ser el adecuado para poder soportar las altas corrientes de falla que podrían circular por dicho conductor.

Para determinar el calibre de este conductor se tiene que tomar en cuenta la norma oficial mexicana para instalaciones eléctricas

(NOM-001), ya que en esta se mencionan los calibres adecuados para cada tipo de instalación de puesta a tierra.