

RESERVA

RESERVA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

“DISEÑO, OPERACIÓN Y PROTECCIÓN DE
INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES.
SISTEMA DE TIERRAS”.

TRABAJO DE SEMINARIO
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ CHOREÑO

ASESOR: ING. MARIA DE LUZ GONZÁLEZ QUIJANO



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES • CUAUTITLÁN
CAMPO 4**

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

3

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Diseño, operación y protección de instalaciones eléctricas

industriales. Sistema de Tierras.

que presenta el pasante: José Luis Hernández Choreño

con número de cuenta: 09758225-5 para obtener el título de:

Ingeniero Técnico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán izcalli, Méx. a 13 de Octubre de 2003

MODULO	PROFESOR	FIRMA
<u>I</u>	<u>M.I. Benjamín Contreras Santacruz</u>	
<u>III</u>	<u>Ing. María de la Luz González Quijano</u>	
<u>IV</u>	<u>Ing. José Gustavo Orozco Hernández</u>	

AGRADECIMIENTOS

LOS SUEÑOS SIEMPRE SE ALCANZAN CUANDO SE TIENE EL RESPALDO DE TODOS TUS SERES QUERIDOS.

A ELLOS LES DEDICO ESTE TRABAJO POR SU APOYO Y COMPRESIÓN

GRACIAS A:

A MI PADRE POR TODO LO QUE ME ENSEÑO Y ME CORRIGIÓ CUANDO FUE NECESARIO EN TODA ESTA ETAPA DE MI VIDA.

A MI MADRE POR EL APOYO INCONDICIONAL QUE SIEMPRE ME HA BRINDADO.

A MIS HERMANOS QUE SIEMPRE ESTUVIERON PRESENTES EN MIS LOGROS Y FRACASOS.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO POR FORMARME EN SUS AULAS.

A MIS PROFESORES Y COMPAÑEROS DE LA FES-C POR COMPARTIR SU AMISTAD, CONOCIMIENTOS Y EXPERIENCIAS.

J.L.H.CH

ÍNDICE

	PÁG.
Introducción	3
Capítulo 1. - Conceptos básicos	
1.1 Breve Reseña histórica.	4
1.2 Definición	5
1.3 Elementos que componen un sistema de tierras	9
1.4 Parámetros de tensión	15
Capítulo 2. - Métodos de Medición	
2.1 Medición de la resistividad del terreno. Resistividad	20
2.2 Técnicas de medición.	21
2.3 Factores que influyen en la resistividad del suelo	23
2.4 Valores prácticos	26
2.5 Resistencia de tierra	28
2.6 Electrodo	34
2.7 Electrodo Químico	34
2.8 Arreglo de electrodos	35
Capítulo 3.- Aplicaciones	
3.1 Equipos que deben ser conectadas a tierra	37
3.2 Red de tierras	39
3.3 Conductores de la red de tierra	40
3.4 Número de electrodos en un sistema de tierras	42
3.5 Resistencia por sistemas de tierras.	46

Capítulo 4.- Diseño practico de un sistema de tierras

4.1 Diseño preliminar 48

4.2 Diseño de un sistema de tierra 50

4.3 Mantenimiento. 62

Conclusiones 64

Bibliografia. 65

INTRODUCCIÓN

En los inicios del uso de la electricidad en forma comercial, los sistemas de puesta a tierra se utilizaban para tener un voltaje más de referencia, actualmente, sus aplicaciones son más extensas, ya que se utiliza para limitar las sobretensiones debidos a descargas atmosféricas, a fenómenos transitorios en los circuitos, a contactos accidentales de mayor tensión así como limitar la diferencia de potencial a tierra del circuito durante su operación normal.

Ahora una eficiente instalación de tierra sigue siendo uno de los mejores fundamentos de la seguridad.

Una conexión sólida a tierra facilita la operación de los dispositivos de protección contra sobrecorriente, en casos de falla a tierra, de hecho también los dispositivos de protección contra sobretensiones necesitan una conexión a tierra para su correcta operación.

Para los sistemas de distribución eléctrica tanto en plantas industriales como en subestaciones es un factor de máxima importancia la correcta conexión a tierra que tiene por objeto disminuir o reducir el peligro que presenta un sistema eléctrico, ya sea, por su propia energía o causado por factores externos, unos eventuales y otros previsibles, y la más importante proporcionar un grado de seguridad máxima al personal y de protección al equipo.

Bajo esta razón todo sistema eléctrico debe ser diseñado para prevenir el peligro de cualquier contacto accidental de las partes metálicas con los elementos que contienen tensión. Esto se reduce si estas partes metálicas no energizadas se establecen bajo una conexión a tierra bien diseñada.

El encargado de realizar el diseño de puesta a tierra, debe apoyarse de ciertas técnicas para seleccionar el sistema adecuado a la mejor protección posible.

El objetivo de este trabajo es dar un apoyo al ingeniero proyectista para diseñar, determinar y llevar a cabo una adecuada conexión a tierra en un sistema eléctrico.

CAPITULO I
CONCEPTOS
BÁSICOS

SISTEMA DE TIERRAS

I. CONCEPTOS BÁSICOS.

1.1 Breve Reseña Histórica

Por cuestiones metodológicas se da el marco histórico, señalando únicamente las fechas y los eventos más importantes en orden cronológico.

- ❖ 1720 S. Gray y G. Whaclar realizan los primeros estudios sobre resistividad de rocas.
- ❖ 1746 Watson descubre que el suelo es conductor.
- ❖ 1879 Primera muerte con energía generada por el hombre a 250v.
- ❖ 1904 Se publican las primeras recomendaciones sobre sistemas de puesta a tierra en Alemania.
- ❖ 1915 Se idean los arreglos tetraelectrónicos.
- ❖ 1915 Invención de los electrodos marca Copperweld.
- ❖ 1918 O. S. Peters desarrolla el método de los tres electrodos para medir resistencia de puesta a tierra.
- ❖ 1961 Primera versión de la norma IEEE80 "*Guide for safety in A.C. Substation Grounding*" Nace el factor de irregularidad Ki.
- ❖ 1970 IBM y HP comenzaron a utilizar el cable aislado de tierras para equipo electrónico.
- ❖ 2000 La IEEE reafirma la norma IEEE – el 30 de enero de 2000.
- ❖ 2002 Última actualización del NEC aprobada en septiembre de 2000.

- ❖ 2002 Se publica la norma IEC 60364-5-54. *Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements, protective conductors and protective bonding conductors.*

1.2 Definición.

A efecto de cumplir nuestro objetivo es necesario que se den las siguientes definiciones para que exista una mejor comprensión.

- ❖ TIERRA (*GROUND o EARTH*).- Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, tierra, masa, chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua.
- ❖ PUESTA A TIERRA (*GROUNDING*).- Grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuyen las corrientes eléctricas de falla en el suelo. Comprende electrodos, conexiones y cables enterrados.

En este punto se hace necesario ampliar nuestro objetivo principal, pues ya no solo debemos buscar garantizar la integridad de las personas y cuidar la instalación eléctrica de daños, sino que también procurar servir como un punto de referencia común de tensión

- ❖ ASPECTOS GENERALES DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

Objetivos

- Seguridad de las personas.
- Protección de las instalaciones

Funciones:

- Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Servir de referencia al sistema eléctrico.
- Conducir y disipar las corrientes de falla con suficiente capacidad.

- ❖ REQUISITOS MÍNIMOS DE UN SISTEMA DE TIERRAS. El valor de la resistencia debe ser el adecuado para cada tipo de instalación
 - La variación de la resistencia debida a cambios ambientales debe ser mínimo.
 - Su vida útil debe ser mayor de 20 años.
 - Debe ser resistente a la corrosión.
 - Su costo debe ser el más bajo posible, sin que comprometa la seguridad.
 - Debe permitir un mantenimiento periódico.
 - Cumplir los requerimientos de las normas y especificaciones.

- ❖ Donde se requieren

Según el *National Electrical Code (NEC)*, la necesidad de instalación o no instalación de puestas a tierra se rigen con la clasificación de los sistemas eléctricos. En la práctica de la ingeniería actual, se requieren sistemas de tierra en:

- Aparatos eléctricos de fábricas y residencias.
- En sistemas de corriente continua
- Centro de estrella en generadores y transformadores.
- Pararrayos
- Torres de líneas de transmisión y de comunicaciones
- Sitios de carga y descarga de combustibles.
- Herramientas eléctricas portátiles.
- Maquinas de generación de electricidad.
- Trabajos en líneas desenergizadas.

❖ TIPOS DE SISTEMA DE TIERRA

Existen tres tipos.

- a) Sistema de Tierra de Protección (para equipos) : Conjunto de conexiones, cables y clavija que se acoplan a un equipo eléctrico; para prevenir electrocuciones por contactos con partes metálicas energizadas accidentalmente.

- De carcasas
- De herramientas portátiles.

b) Sistema de Tierra de Servicio (para sistemas eléctricos): Es lo que pertenece al circuito de corriente; sirve tanto para condiciones de funcionamiento normal, como de falla. Como se muestra en figura 1.1

- De equipos de comunicaciones
- De equipos de computo
- De pararrayos
- De subestación.

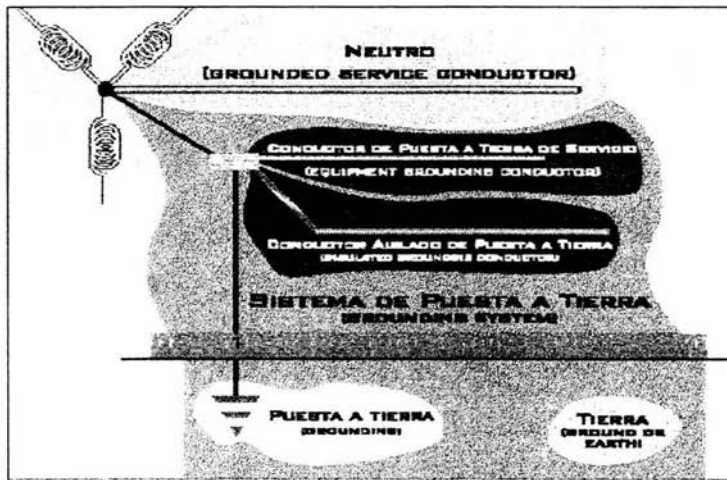


Fig.1.1 Sistema de Tierra de Servicio

c) **Sistema de Tierra Temporal (para trabajos de mantenimiento):** Dispositivo de puesta en corto circuito y a tierra, para protección del personal que interviene en redes energizadas. Como se muestra en figura 1.2.

- De baja tensión
- De Media tensión
- De alta tensión
- Para carga y descarga de materiales.

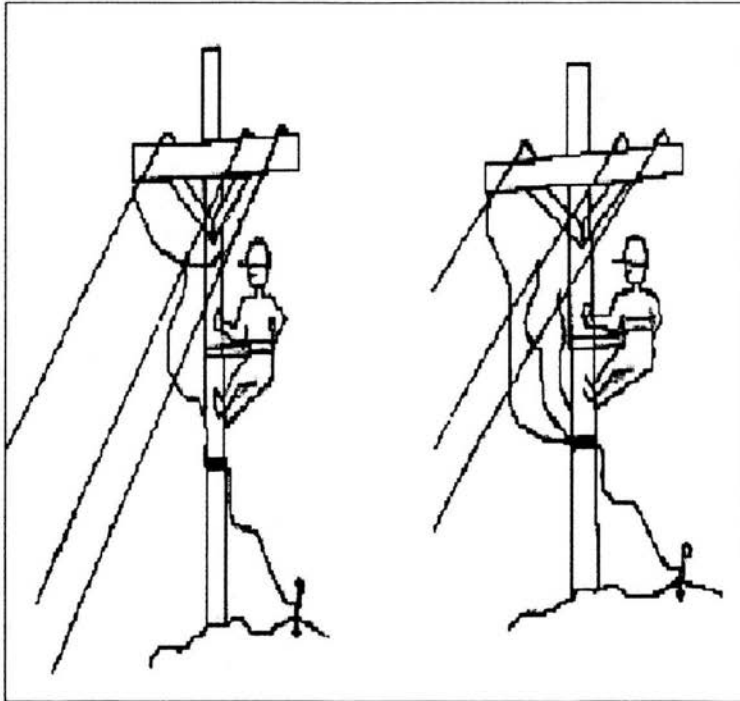


Fig.1.2 Sistema de tierra temporal

1.3 Elementos que componen un Sistema de Tierras.

El Sistema de Tierras se encuentra formado por:

- Conductores.
- Conectores.
- Tomas de tierra.
- Registros.

a) Conductores.

Es un conductor desnudo, por lo general de cobre, sin aislamiento, al descubierto, de forma visible que no puede ser fácil su deterioro por acciones mecánicas o químicas. Este conductor de tierra se ha de instalar en el interior de un tubo de acero (conduit). Su función es conducir únicamente la corriente de falla a tierra; por lo que se dice que: “el conductor a tierra deberá conducir corriente en condiciones normales de operación”:

b) Conectores.

Deben de tener un contacto eléctrico perfecto, tanto con las partes metálicas que se quieren poner a tierra, como los propios conductores del sistema que formaran redes (derivaciones, cuando hay cruces de conductores). Así como con el electrodo o placa que forman la toma de tierra principal, el elemento que permite esta unión lo llamamos conector.

Tipos de conectores más usuales:

- a) Conectores exotérmicos.- Son los que permiten hacer uniones permanentes a base de fundiciones de metales, que se logran con moldes especiales para ello. Véase figura 1.4
- b) Conectores mecánicos.- Son los que permiten su colocación a través de tornillos y dispositivos mecánicos que aprisionan los conductores a unir hasta lograr tener un buen contacto. Véase figura 1.3

Tipos de conectores

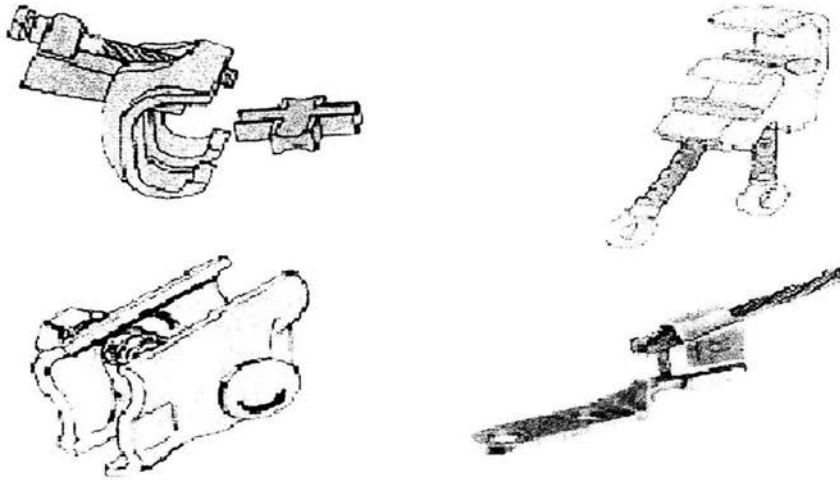


Fig.1.3 Conectores Mecánicos

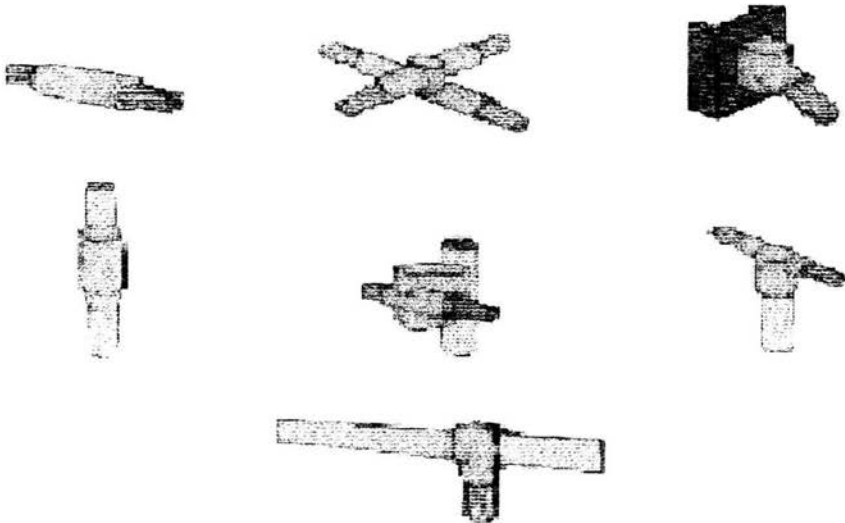


Fig.1.4 Conexiones exotérmicas

c) Tomas de Tierra.

La conexión a tierra en las instalaciones eléctricas se lleva a cabo mediante tomas de tierra, que son cuerpos metálicos, conductores enterrados en el suelo y que hacen la unión con el terreno.

Las tomas de tierra más utilizadas en la práctica son:

1. Por medio de dispersores.- Es el más empleado en la práctica y consiste en meter verticalmente en el terreno tubos metálicos, que llevan como fin dispersar la corriente en la tierra.

Los dispersores o electrodos avalados por las normas son:

- Cobre sólido: indudablemente son los de mayor vida útil, puesto que pueden pasar de los 30 años. Su única debilidad es que al tratar de introducirlas a golpes, se pueden deformar.
- Copperweld: es una marca registrada del proceso “*solid Cladding*” que consiste en una fundición libre de oxígeno, para adhesión del cobre al acero mediante temperatura y presión. Hoy en día este proceso solo se emplea en fabricación de alambres y cables.
- Electrodepositadas: son varillas de acero con un recubrimiento de cobre por medio de un proceso de electrodeposición. Para este proceso la IEC 60364-5-54 exige mínimo 100µm y la UL 467 exige 250 µm. También se fabrican otras de tres metales: acero recubierto de cinc y luego de cobre.
- Acero galvanizado: se admiten solamente para terrenos no corrosivos, con recubrimiento de 70 µm.
- Acero inoxidable: están avalados por las normas pero su costo los hace poco recomendables.
- Bronce: las normas los avalan si tienen como mínimo el 80% de cobre.

Para tener una buena conductividad del terreno y puesto que son tubos las dispersiones, éstos se llenan con una solución salina la cual es introducida en los orificios que van dispuesto en el dispersor, saturando de esta forma las regiones más profundas del terreno.

Como se ha dicho, si con un solo dispersor no se obtiene la resistencia deseada, hay que hacer arreglos en paralelo (como se explica en el Capítulo II) con otros dispersores y que deben de estar a una distancia no menor a 2 metros.

2. En forma de placa.- Este tipo de toma de tierra se recomienda en terrenos donde la profundidad vegetal es importante, se entierran por lo general de 0.5 a 1 metro de profundidad, este tipo de tomas no son de mucho uso debido a su alto costo y al inconveniente de que el paso de corriente se concentra en las aristas, que tienen una superficie total pequeña y que puede ser peligroso al personal debido a la poca profundidad a la que se encuentra, sin embargo, esto puede remediarse, perforando las placas para aumentar la longitud de estas aristas.

A continuación se presentan algunas recomendaciones para elegir una toma de tierra en forma de placas.

- i) Las placas se entierran en forma vertical a una profundidad suficiente para encontrar un terreno lo suficientemente húmedo.
- ii) Cuando se encuentren capas de roca, grava, gravilla, o cualquier otra, la placa deberá instalarse horizontalmente a una profundidad menor a 2 metros.

Otros tipos de tierra que existen son:

- En forma de bucle.
- En forma de estrella.
- De red estrellada en bucle.
- En malla.

Tabla 1.1 Tipos de electrodos

Tipo De Electrodo	Materiales	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Espesor (mm)	Recubrimiento μm
Varilla	Cobre	12.7			
	Acero inoxidable	10			
	Acero galvanizado en caliente	16			70
	Acero con Recubrimiento Electrodepositado de cobre	14			250
Tubo	Cobre	20		2	
	Acero inoxidable	25		2	55
	Acero Galvanizado en caliente	25		2	55
Fleje	Cobre		50	2	
	Acero inoxidable		90	3	
	Cobre cincado		50	2	40
Cable	Cobre	1.8 para	25		

		cada hilo			
	Cobre estañado	1.8 para cada hilo	25		
Placa	Cable		20000	1.5	
	Acero inoxidable		20000	6	

ELECTRODOS

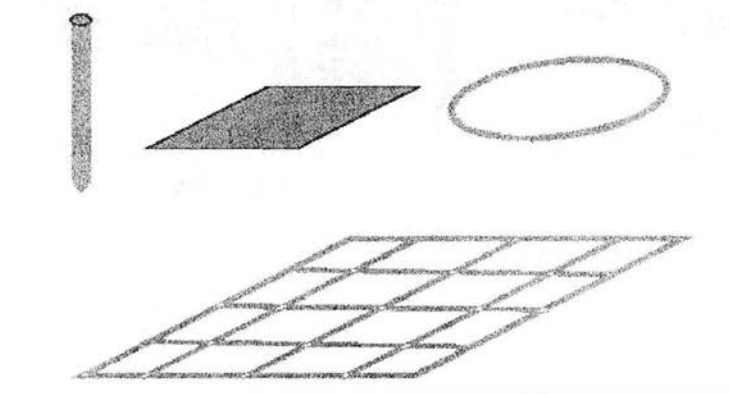


Fig. 1.5 Tipos de electrodos

d) Registros.

Son excavaciones acondicionados para tener acceso a ciertos puntos del sistema de tierra. Son por lo general tubos de 30 cm de diámetro en donde están alojado un dispersor unido a un conductor, estos registros permiten hacer mezclas de tierras y llenar los registros con ellas, así se logra una más eficiente y rápida dispersión de a corriente en el terreno.

Generalmente esta mezcla está compuesta por arena, carbón y sal.

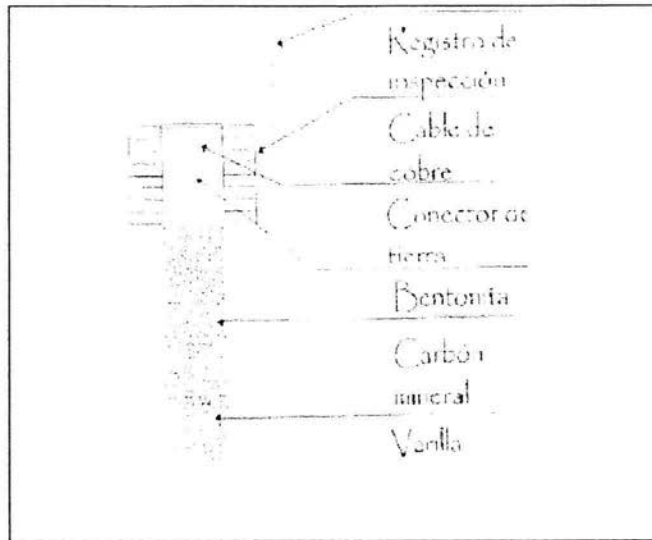


Fig. 1.6 Registro

1.4 Parámetros peligrosos.

Cuando ocurre una falla a tierra se pueden presentar potenciales peligrosos que pueden dañar a las personas o a los equipos cercanos a la falla. Estos potenciales son:

- Potencial de toque o Contacto
- Potencial de paso
- Potencial Transferido

Antes de explicar cada uno de estos potenciales debemos mencionar algunas consideraciones sobre la corriente de fibrilación.

a) Corriente de Fibrilación

Es aquella que se produce al existir una diferencia de potencial entre dos partes del organismo. El potencial tolerable del cuerpo humano está en función de esta corriente, que

al circular por el corazón, lo primero que causa es una arritmia cardiaca, procediendo a detenerlo por completo causándole la muerte.

De algunos experimentos, se determino la siguiente ecuación:

$$I = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad \text{para 50 Kg.} \qquad I = \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad \text{para 70 Kg.}$$

Donde:

I = corriente de fibrilación

t = tiempo que circula la corriente

Esta ecuación no es funcional para tiempos largos o muy cortos.

Los efectos más comunes de la circulación de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano son: percepción, contracciones musculares, inconciencia, fibrilación ventricular, bloqueo de los nervios respiratorios y quemaduras. Con un miliamper generalmente se presenta la percepción, que es justo el momento en que se tiene conciencia de que circula una corriente por el cuerpo. Corrientes de 1 a 6 mA, traen como consecuencia el engarrotamiento de los músculos.

b) Potencial de Toque o de Contacto

Este potencial se presenta cuando se toca una estructura por la cual circula una corriente de falla. Tomando las consideraciones de corriente de fibrilación y de resistencia de cuerpo humano, el potencial que podemos soportar está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Potencial de toque} = \frac{116 + 0.17\delta s}{\sqrt{t}} \quad \text{para 50 Kg.}$$

$$\text{Potencial de toque} = \frac{157 + 0.24\delta s}{\sqrt{t}} \quad \text{para 70 Kg.}$$

Donde:

δs = Resistividad de la superficie del suelo en ohms-metro (por regla general es grava, tezontle o una tarima de madera con un tapete)

t = Duración de la falla en segundos

c) Potencial de paso

Es el potencial que puede soportar una persona que se encuentre parado o caminando cerca del lugar de la falla, si no se rebasa este potencial, se produce una contracción muscular en las piernas, es decir, no responden a los impulsos del cerebro y el individuo cae al piso, donde queda expuesto a las corrientes que circulan por el corazón, las siguientes ecuaciones nos ayudan a calcular este potencial para diferentes pesos:

$$\text{Potencial de paso} = \frac{116 + 0.7\partial s}{\sqrt{t}} \quad \text{para 50 Kg.}$$

$$\text{Potencial de paso} = \frac{157 + \partial s}{\sqrt{t}} \quad \text{para 70 Kg}$$

d) Potenciales transferidos

Estos se producen cuando existen elementos metálicos que salen del lugar de la falla, como son: hilos de guarda, tuberías, etc.

Bajo condiciones normales el equipo eléctrico que está expuesto a tierra opera a nivel de voltaje cero o cercano a cero y este potencial es idéntico al de una red remota. Durante una condición de falla se eleva el potencial con respecto a la red remota, existiendo una diferencia de potencial, que es proporcional a la magnitud de la corriente en la malla de tierras y a su resistencia.

No es práctico e incluso es casi imposible diseñar un sistema de tierras en base a los potenciales transferidos, es más prácticos aislar las tuberías o elementos metálicos que salen de las subestaciones.

e) Duración de Falla (t)

Después de analizar las ecuaciones de potenciales peligrosos, se ve la importancia de reducir el tiempo de falla, la experiencia dice que los casos de muerte por electrocución, por lo general, son por exposición a fallas de larga duración, el tiempo típico de apertura de interruptores es de $\frac{1}{2}$ segundo, sin embargo el peligro de fibrilación ventricular disminuye con tiempos de falla de $\frac{1}{3}$ de segundo.

Por esto, es importante coordinar adecuadamente las protecciones y así librar en el menor tiempo posible la corriente de falla.

CAPITULO II
MÉTODOS DE
MEDICIÓN

2. MÉTODOS DE MEDICIÓN.

2.1 Medición de la resistividad del suelo. Resistividad

Para realizar un sistema de tierras se deben efectuar mediciones de resistividad del terreno como primer paso.

La resistividad de un terreno es la propiedad que tiene como conductor de electricidad, la roca, la arena y los suelos secos tienen alta resistividad, es decir, no conducen electricidad, en cambio los suelos con alto contenido de humedad tienen baja resistividad, por lo tanto es necesario conocer la resistividad del terreno.

Entonces tenemos que la resistividad representa la resistencia de una muestra de la materia considerada, cuyas dimensiones son la unidad, por ejemplo, un cubo de un metro (Figura 2.1) de lado, dicho cubo se sitúa entre dos placas y se mide su resistencia, que se expresará en ohmios por metro ($\Omega \cdot M$)

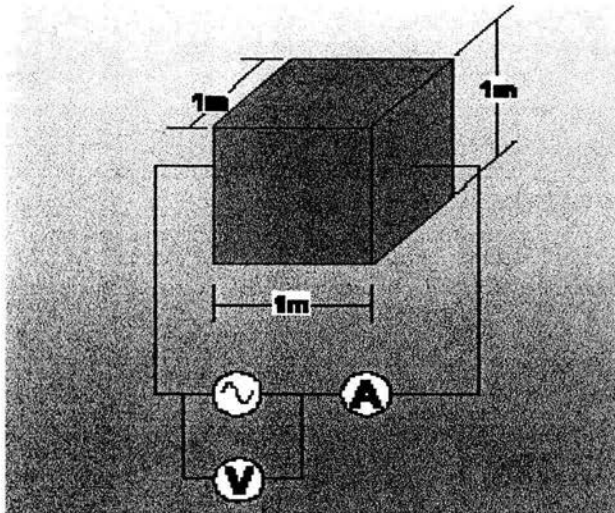


Fig. 2.1 resistividad

Una manera práctica de obtener la resistividad del terreno es mediante el uso de tablas que nos proporcionen valores aproximados de la resistividad de los diferentes tipos de suelos en donde se vaya a instalar un sistema de tierras, pero lo más conveniente es hacer una medición física en el terreno y en distintos puntos del mismo, resaltando las diferencias importantes en localización superficial y en profundidad

2.2 Técnicas de Medición.

a) Método de Wenner

Para efectuar la medición de resistividad del suelo es necesario hacer circular una corriente por el mismo, el método más usual es de Frank- Wenner, denominada también de los “Cuatro Electrodo”, el equipo utilizado es un *megger* de tierra de cuatro bordes y la medición se efectúa como se indica en la figura 2.2

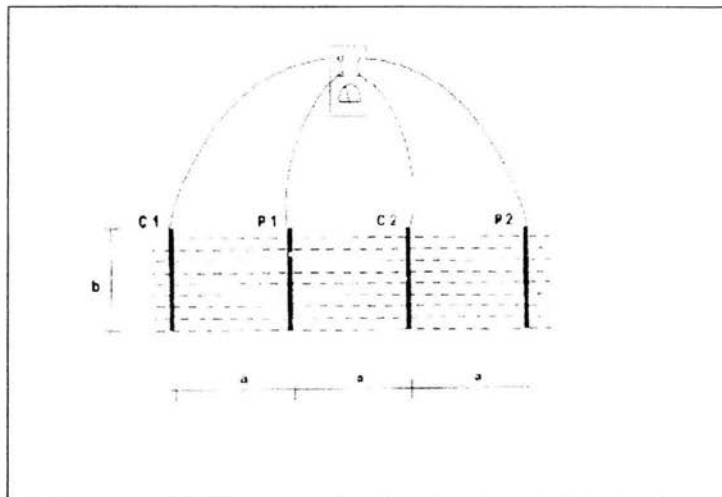


Fig.2.2 método de los cuatro electrodos

Donde:

P = Resistividad en ohms- metro.

a = Separación entre electrodos en metros.

b = Profundidad.

R = Lectura *megger* en ohms.

Se recomienda una relación:

$$\frac{a}{b} > 20$$

Donde b es generalmente de 50 cm., y a de 10 metros. Entonces la resistividad será:

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

Pero si $a \gg b$, entonces:

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

Este método a pesar de que se publicó en 1915 sigue vigente, y los métodos diferentes para medir la resistividad que se han desarrollado se basan en su teoría. Hay que decir que este método es para un suelo homogéneo, esto quiere decir que cuando el suelo es de una capa se pueden efectuar mediciones de resistividad con diferentes separaciones de electrodos y el valor de resistividad será el mismo.

Si el suelo es heterogéneo, es decir, cambia sus propiedades a cierta profundidad en dos o más capas entonces la medición de resistividad cambiará con la separación de los electrodos.

b) Método De Lee

Consiste en enterrar cinco electrodos como se muestra en la figura 2.3, en la medición solo se utilizan cuatro, circulando una corriente en los extremos y midiendo la caída de potencial en A y B o en B y C, la resistividad esta dada por:

$$\rho = 4\pi a R_{AB}$$

$$\rho = 4\pi a R_{BC}$$

Tiene la ventaja de poder efectuar dos mediciones y si los resultados difieren el suelo no es homogéneo en la parte superficial.

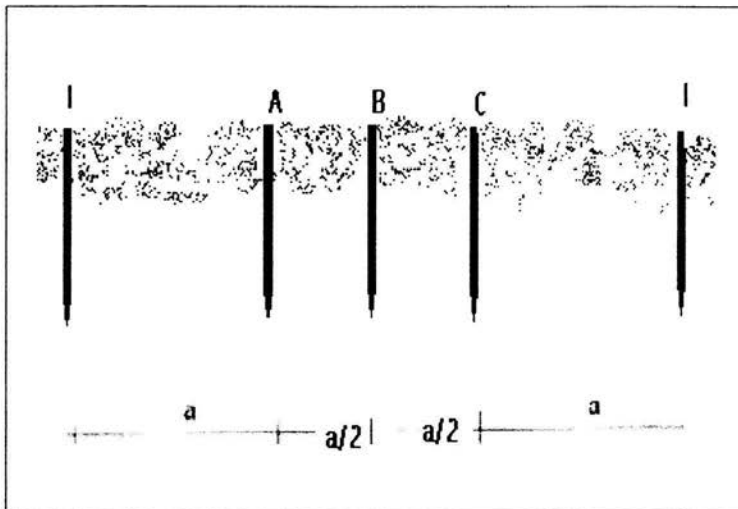


Fig. 2.3 Método de Lee

2.3 Factores que influyen la resistividad del suelo.

En algunos lugares no solo se encuentran variaciones verticales, sino también horizontales, esto generalmente ocurre en tierras que han sido explanadas o en rellenos de

construcciones. Naturalmente cuanto menor es la resistividad, mejor resulta el terreno, por esta razón, hay que desplazar las tomas de tierras hasta encontrar terreno húmedo, si esto resulta difícil, habrá que efectuar un tratamiento químico de corrección del terreno.

Los factores que afectan son:

- a) Absorción: atracción de una sustancia sólida sobre un fluido, de modo que las moléculas de éste penetren en ella. Tiene gran influencia, por ser la conductividad en los suelos de tipo iónica con electrolitos.
- b) Compactación y presión del suelo: un suelo más compacto presenta una mayor continuidad física, lo que un principio facilita una mejor conductividad, siempre y cuando se llegue a las capas de menor resistividad, por lo anterior, es recomendable esperar un cierto tiempo después de construida un sistema de tierras, para realizar la medición de su resistencia.
- c) Concentración de sales: Siendo la resistividad de un suelo dependiente de la cantidad de agua retenida en éste, y conociéndose el hecho de que la resistividad del agua está gobernada por las sales disueltas en ésta, se dice que la resistividad del suelo es influenciada por la cantidad y tipo de sales disueltas en esta agua.
- d) Densidad: es un parámetro que debe controlarse con el fin de asegurar que se manejan materiales, que tienen relación directa con la porosidad.
- e) Estratificación del suelo: la composición del suelo es generalmente estratificada en varias capas o formaciones diferentes (de resistividades diferentes).
- f) Humedad del suelo: La resistividad del suelo disminuye en la medida que aumente la humedad del suelo.
- g) Nivel freático: dado que las puestas a tierra se instalan en zanjas de 0.5 m. De profundidad o los electrodos se entierran hasta 6 m., es necesario determinar con anterioridad cual es el nivel freático particular del sitio.
- h) Porosidad: es la fracción del volumen total de roca correspondiente al espacio poral. La porosidad se clasifica de acuerdo con el ordenamiento físico del material que encierra un poro y a la distribución y forma de los poros.

i) Granulometría del suelo: la resistividad del suelo esta influenciada por la dimensión y la presencia de granos de diversos tamaños. Se consideran dos aspectos: la capacidad de retención de agua en las capas del suelo y la continuidad física del suelo, en ambos casos la influencia de una granulometría mayor tiende a aumentar la resistividad debido a la menor capacidad de retención de agua en el suelo, dejándola fluir hacia capas mas profundas o evaporarse; menor contacto entre los granos resultando una menor continuidad eléctrica.

La resistividad en muchos terrenos se ve influida por su contenido de humedad, lo cual, como se ha dicho anteriormente, a mayor humedad del suelo tendremos una menor resistencia del mismo.

Por temperatura la resistividad aumenta lentamente a medida que la temperatura desciende hasta 0° C por debajo de este punto, la resistividad crece rápidamente al descender aún más la temperatura, por esta razón muchas veces será conveniente profundizar las tomas de tierra hasta encontrar capas de tierra situadas bajo zonas susceptibles de congelación en las estaciones frías.

Hay métodos que nos permiten reducir la resistividad del terreno, por ejemplo, se pueden utilizar las sales minerales como cloruro de sodio (Na Cl), sulfato de magnesio, cloruro de calcio disuelto en agua y vertidas sobre el terreno o sobre el mismo electrodo si este es tubular, sin embargo en algunos casos se presenta el fenómeno de la corrosión.

Otro método es la colocación de capas de carbón (o grafito en polvo), situadas directamente en contacto con los electrodos en forma de placa, anillo o malla.

2.4 Valores prácticos de la resistividad.

RESISTIVIDAD PROMEDIO DE LA TIERRA

TERRENO	RESISTIVIDAD EN OHMS- CM		
	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO
RELLENOS (CENIZAS, ESCORIAS, DESECHOS SALINOS)	2370	590	7000
ARCILLAS, EXQUISITOS SUELOS ARCILLOSOS, MARGAS.	4060	340	16300
MISMOS CON ARENA Y GRAVA.	15800	1020	135000
GRAVAS, ARENAS, PIEDRAS CON CONTENIDOS DE DESECHOS	94000	59000	458000

RESISTIVIDAD APROXIMADA DE LA TIERRA

TERRENO	RESISTIVIDAD EN OHMS- CENTÍMETRO
HÚMEDO O SUELO ORGÁNICO	10-50
DE CULTIVO ARCILLOSO	1000
TIERRA ARENOSA HÚMEDA	3000

TIERRA ARENOSA SECA	1000
TIERRA CON GUIJARROS Y CEMENTO	1000
SUELO ROCOSO	3000
ROCA COMPACTA	1000

EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA

TEMPERATURA EN GRADOS CENTÍGRADOS	RESISTIVIDAD EN OHMS- CENTÍMETROS
20	7200
10	9900
0 (AGUA)	13800
0 (HIELO)	30000
- 5	79000
- 15	330000

EFECTO DEL CONTENIDO DE LA HUMEDAD EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA

CONTENIDO DE HUMEDAD EN % DE PESO	RESISTIVIDAD EN OHMS- CM SUELO SUPERFICIAL	ARENA MOLDEABLE
0.0	1000000000	1000000000

2.5	250000	150000
5.0	165000	43000
10.0	5300	18500
15.0	1000	10500
20.0	2000	6300
30.0	6400	4200

CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SUELO

TIPO DE TIERRA	RESISTIVIDAD EN OHMS- METRO
TIERRA ORGÁNICA HÚMEDA	10
TIERRA HÚMEDA	100
TIERRA SECA	1000
ROCA	5700
AGUA DE MAR	100
CONCRETO	10000

2.5 Resistencia de Tierra

Lo ideal para las tomas de tierra es que su resistencia sea de cero, siendo esto así, las corrientes que circulan por ellas no producen aumento de tensión entre el punto de la

toma y otros puntos de la tierra distantes de él. Aunque es difícil saber cuál es la resistencia adecuada de una toma de tierra lo recomendable siempre es un valor pequeño.

Debido a que existe la resistencia de tierra, la corriente que circula por ella da lugar a un aumento de tensión en el equipo conectado, en relación con los puntos distantes a la toma, y a gradientes de potencial eléctrico en sentido horizontal sobre la superficie de la tierra, especialmente en las cercanías del sistema de tierras, estas circunstancias presentan un peligro de choque eléctrico para el personal y para el equipo un daño en el aislamiento.

Para solucionar esto, es suficiente con encontrar la corriente de falla a tierra, con los valores de reactancia desechamos la resistencia del sistema, la del terreno y la de falla, el error así provocado es pequeño y siempre dentro de los márgenes de seguridad.

Por cuestiones prácticas la resistencia del terreno requerida para el sistema de tierras de una subestación, una vez que su resistividad ha sido determinada, depende del terreno y del área, por lo tanto:

$$R_t = \frac{\rho}{4r}$$

Donde:

R_t = Resistencia del terreno en OHMS

r = Radio equivalente en metros, de un círculo que cubre la misma área que la ocupa la red

ρ = Resistencia promedio del terreno OHMS- Metro.

Como el área del círculo es $A = \pi (r^2)$

Despejamos r , $r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$

Reduciendo

$$r = 0.564 \sqrt{A}$$

Sustituyendo en

$$R_t = \frac{\rho}{4(0.564)\sqrt{A}}$$

Otros métodos de medición son:

- ❖ De Caída de tensión.
- ❖ De la Regla del 62%.
- ❖ De los Cuatro Potenciales o de Tagg.
- ❖ De la Pendiente.
- ❖ De Intersección de Curvas.
- ❖ Selectivo.
- ❖ De Triangulación o de Nippold.
- ❖ Estrella Triángulo.
- ❖ Por Corriente Inyectada.
- ❖ Por Tensión Inducida.
- ❖ Con Referencia Natural.

Método de la caída de tensión

Consiste en circular una corriente entre dos electrodos fijos, uno auxiliar (c2) y el otro de prueba (c1), midiendo la caída de tensión entre otro electrodo auxiliar (p2) y el electrodo bajo medición (p1), este segundo electrodo auxiliar (p2) se va desplazando y conforme se mueve se van tomando lecturas y graficando hasta obtener un figura como la siguiente:

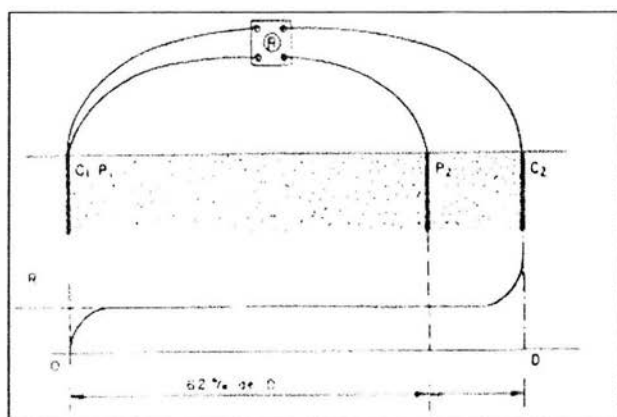


Fig. 2.4 Método de la caída de tensión.

El valor de resistencia a tierra de la red es el que se obtiene en la intersección del eje de resistencia (R) con la parte paralela de la grafica al eje de las distancias (D).

Si la curva no presenta un tramo paralelo, quiere decir que la distancia escogida no es suficiente.

Resumen comparativo de los métodos de medición de resistencia.

MÉTODOS	SITIOS DE APLICACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	OBSERVACIONES
1. De la curva de caída de potencial	Para puestas a tierra pequeñas o mas complejas, si se grafica toda la curva	De fácil comprensión. Exige pocos cálculos.	En PT extensas exige grandes longitudes de cable.	Es el método mas didáctico, incluso las graficas sirven para la aplicación de otros métodos.

2. De la regla del 62%	Para puestas de tierra pequeñas, medianas y grandes	Simple y rápido de aplicar	Requiere conocer el centro eléctrico. Exige distancias grandes	Es el mas aplicado, Cuando el valor hallado no satisface, se debe verificar la resistividad del terreno y las zonas de influencia a respetar.
3. De los 4 potenciales	Para puestas a tierra medianas y grandes	No es necesario la determinación del centro eléctrico	Exige distancias tan grandes como los métodos anteriores. Requiere muchos cálculos.	Es un método poco utilizado. Los resultados son aceptables, cuando se toman distancias grandes.
4. De intersección de curvas	Para grandes puestas a tierras, como subestaciones o estaciones de comunicación.	Permite menores distancias que los anteriores. No es necesario determinar el centro eléctrico.	Necesita mas ingeniería, como cálculos y gráficos.	Es un método que ahorra distancias y permite calcular el valor donde otros métodos no lo podrían hacer por falta de espacio.
5. De la pendiente	Es ideal para grandes puestas a tierra, como subestaciones	Ídem al anterior. Es mas grafico y necesita menos cálculos.	En suelos no homogéneos, debe tenerse mayor cuidado	Buena técnica para grandes sistemas.

6. Estrella triángulo	Para pequeñas puestas a tierra en locales urbanos	No requiere distancias largas	Necesita muchos cálculos. Con distancia pequeñas el error es grande.	Técnica para áreas urbanas. Debe usarse cuando los métodos anteriores no aplican.
7. Por corriente inyectada	Para subestaciones grandes o terrenos de muy alta resistividad.	Garantiza una alta corriente	Requiere una planta de energía portátil o una fuente lejana.	Puede tener interferencias con otros sistemas de baja frecuencia.
8. Por tensión inducida	Para puestas a tierra de un solo electrodo.	Solución para casos donde el error no es importante	Presenta errores grandes cuando hay corrientes de desbalance.	Son pinzas diseñadas para lazos de tierra. Solamente se debe usar como aproximación.
9. Con referencia natural	Uso en último caso, solo para alguien calificado	Resuelve el problema de que siempre se puede medir	Puede confundir y el resultado no es confiable.	Pueden cometerse errores grandes. Debe utilizarse solamente en caso de que otro método no pueda ser usado.

2.6 Electrodo.

Existe cierta confusión respecto al electrodo de un sistema de tierra, algunos piensan que el electrodo sólo es una varilla enterrada, sin embargo, un electrodo puede consistir en un conductor enterrado en forma horizontal o vertical, una placa enterrada, una varilla, una varilla con relleno químico, varias varillas en paralelo, mallas de cables enterrados, entre otras más.

En la realidad lo que mas importa es el valor de resistencia a tierra del electrodo.

El electrodo común (varilla enterrada) es un medio económico de instalar un sistema de tierra, sin embargo, generalmente su valor de resistencia a tierra es alto y frecuentemente se tiene que recurrir a instalar de dos o más varillas en paralelo para lograr un valor aceptable.

El Código Nacional Eléctrico (N.E.C. de E. U.) recomienda una resistencia a tierra máxima de 25 OHM, y el Código Británico 10 OHM como máximo, por lo que tomaremos como valor máximo el de 10 OHM.

2.7 Electrodo Químicos.

Consisten en modificar el medio que rodea el electrodo, bajando la resistividad del suelo, los más comunes son:

- ❖ Carbón Mineral (COKE)

Ha venido a sustituir al carbón vegetal, por tener mejores cualidades, pero dependen cierta medida de la humedad.

- ❖ Sulfatos.

Han caído en desuso debido a sus propiedades corrosivas sobre los metales, en especial el cobre.

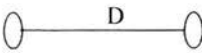
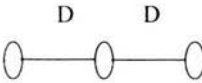
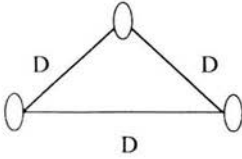
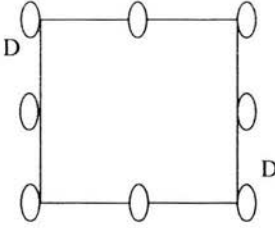
- ❖ Sales.

Al igual que los sulfatos, ya no son tan utilizados, pues además de ser corrosivos se diluyen fácilmente con el agua.

❖ Bentonita.

Se utiliza como medio artificial para bajar la resistividad del terreno y a la vez reducir el valor de resistencia a tierra, la bentonita en si es una arcilla y su principal propiedad es su capacidad de absorber y retener agua.

2.8 ARREGLOS DE ELECTRODOS

VALORES ESPERADOS	ARREGLO
2 Electrodo en paralelos reducen al 55% la resistencia de uno.	
3 Electrodo en línea recta reducen al 35%.	
3 Electrodo en delta, reducen al 38%	
8 Electrodo en cuadro reducen al 17%	

CAPITULO III
APLICACIONES

3.APLICACIONES.

3.1 Equipos que deben ser conectados a tierra.

Los sistemas de tierra se emplean en subestaciones de potencia, en plantas generadoras, en líneas de transmisión, en sistemas de cómputo, sistemas de conmutación.

En los diseños de las redes de tierra se está teniendo mayores cuidados ya que el uso generalizado de los sistemas de cómputo y comunicaciones, en general, en equipos con componentes electrónicos muy sofisticados no se pueden permitir elevaciones de potencial pues este tipo de elementos se dañan con la menor elevación de potencial.

Por este motivo, todas las canalizaciones, estructuras y cubiertas metálicas de conductores y equipos (ajenos al circuito eléctrico) deben ser puestas a tierra, con el objeto de evitar que éstos tengan un potencial mayor que el de tierra en un momento dado.

a) Conexión a Tierra de Estructuras.

Las estructuras de acero de edificios deben conectarse a tierra en la base de cada una de las columnas que forman esquina y en las intermedias a distancias no mayores de 18 metros, las derivaciones de unión tiene que ser de cable de cobre de un calibre no menor que el número 2/0 A. W. G.

Las estructuras y cajas metálicas del mecanismo de control, pararrayos, interruptores, transformadores, rejillas y elementos similares, se conectan individualmente a la barra o cable central de tierra en forma análoga a la estructura del edificio.

b) Conexión a Tierra de Motores.

Los armazones de motores deben conectarse a tierra por medio de un conductor de cobre unido mediante un conector de presión, sujeto al motor por debajo de la cabeza de uno de los tornillos de la carcasa, el otro extremo del conductor de tierra se conecta por medio de abrazaderas o terminales al elemento de unión a tierra más cercano.

c) Conexión a Tierra de los Ductos para Alambres Conductores.

Todo el material expuesto a cruzamientos debe ser conectado a tierra, se entiende por todo el equipo que sirve para proteger y conducir las líneas eléctricas y se incluyen los

gabinetes de conexión y tableros, caja de conexiones, caja de derivación, caja de aparatos de control, tuberías, acoplamientos, tuberías conduit, ductos, cable armado y enrejados.

En general, se deben conectar a tierra toda clase de cajas, gavetas, accesorios u otros elementos metálicos que no conducen corriente, si tiene algún contacto metálico con cable armado o ductos metálicos que contengan conductos eléctricos.

Absolutamente todas las conexiones a tierra deben estar bien apretadas y tener superficies perfectamente limpias, y deben ser removidos todos los materiales de recubrimiento como esmalte, óxido, entre otros, de los puntos en donde se conecta la tierra.

d) Conexión a Tierra de Lugares en donde se encuentran Generadores o Motores Eléctricos.

Deben contar con un cable colector de conexión a tierra tendido de acuerdo con las reglas para la instalación de barras o cables interiores, y miembros de acero estructural, tubería general de agua del edificio, se deberán de conectar a este cable colector.

La conexión a tierra de motores, generadores, transformadores y sus mecanismos de control tienen que ejecutarse con cable número 1/0 A. W. G., como mínimo.

La unión de las conexiones a las cajas de los aparatos que se comunican con tierra se pueden utilizar colectores especiales de presión

e) Conexión a Tierra de Subestaciones Tipo Intemperie.

En general, la barra o cable conector de tierra tiene que calcularse de tal forma que la resistencia máxima de la línea a tierra no exceda de 2 OHMS en subestaciones chicas, instaladas a la intemperie y de 0.5 OHMS en grandes subestaciones. En general es muy recomendable la unión a tierra de cada una de las columnas de soporte de la estructura de acero.

Una cerca metálica colocada alrededor de una subestación tipo intemperie tiene que estar conectada a tierra, si la cerca se encuentra en la inmediata cercanía de la subestación y el cable colector de unión a tierra tiene menos de 1 OHMS, la cerca puede conectarse a este cable a intervalos de 7.63 metros, mediante cable de calibre mínimo de 1/0 A. W. G., ahora, si la cerca esta alejada de la instalación o si la resistencia del cable colector es mayor de 1 OHMS, no deberá conectarse la cerca de este cable. Para este caso se instalará una serie de varillas o electrodos de 3/4" de diámetro por 10 pies de longitud a lo largo de la

cerca con un espaciamiento mínimo de 7.63 metros, el extremo superior de estas varillas estará enterrado a 30 centímetros de la superficie del suelo y se conectará uno con la cerca usando cable de cobre 1/0 A. W. G., como mínimo.

3.2 Red de tierras.

Esta red está básicamente formada por conductores que se encuentran horizontalmente enterrados en el suelo a una profundidad que va entre 0.5 metro y 1 metro. Esta práctica es muy común y ofrece lo siguiente:

- Da un circuito de baja impedancia para la circulación de la corriente de tierra.
- Evita que durante la circulación de la corriente, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de una subestación.
- En una subestación, un solo conductor no es suficiente para darnos la conductividad necesaria, y a esto hay que adicionarle las conexiones de motores, maquinaria, estructuras, entre otras. Una red ideal resulta si esta bien enterrada y con varillas suficientes, es por sí un excelente sistema de tierras.

Se recomienda además que un cable continuo forme el perímetro exterior de la malla, con una separación de 3 a 5 metros de la pared exterior la malla quedará constituida por cables colocados paralelos y perpendicularmente con un espaciamiento razonable, los cables que forman la malla deben colocarse a lo largo de las hileras de estructuras para facilitar la conexión de los mismos.

También es importante que en cada cruce de conductores de la malla estos deban conectarse rígidamente entre sí y en los puntos adecuados, conectarse a electrodos de tierra, se recomienda además construir registros en los mismos puntos.

Hay que hacer la aclaración que el exceso de cruces de cables y conexiones, reduce la eficiencia del sistema, puesto que en cada conexión se agregan resistencias de contacto.

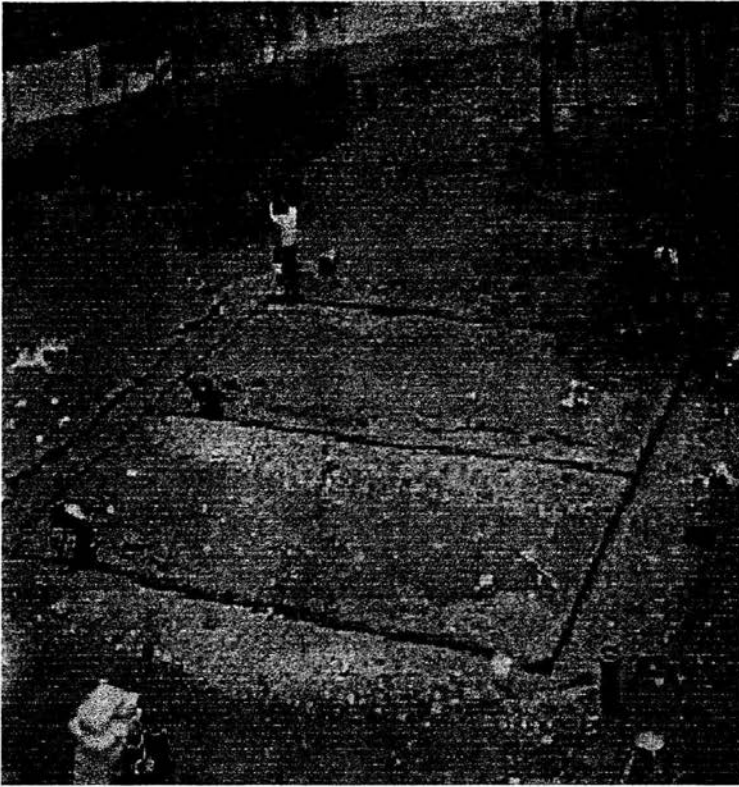


Fig. 3.1 Red de tierras

3.3 Conductores de la Red de Tierra

El sistema de una malla o red de tierra, debe estar diseñado considerando lo siguiente:

- Deberá resistir fusión o deterioro de juntas eléctricas bajo condiciones más severas de combinación de magnitudes de corriente y duración de falla.
- Debe tener alto grado de rigidez mecánica.
- Deberá tener suficiente conductividad de modo que no contribuya a formar diferencias de potencial locales peligrosos.

La relación entre el circular mil y el área en mm^2 para un conductor es:

$$1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm}$$

$$1/1000 \text{ in} = 0.0254 \text{ mm}$$

DIMENSIONES DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS DESNUDOS

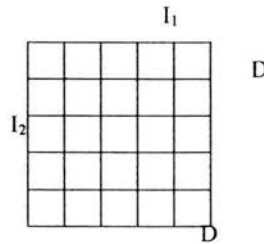
CALIBRE	SECCIÓN		DIÁMETRO	
	C.M.	MM^2	PULG.	MM.
A. W. G. M. C. M.				
20	1022	0.5176	0.03196	0.812
18	1624	0.8232	0.04030	1.024
16	2583	0.3090	0.05082	1.291
14	4107	2.0810	0.06408	1.628
12	6530	3.3090	0.08081	2.053
10	10380	5.2610	0.10190	2.588
8	16510	8.3670	0.12850	3.264
6	26258	13.3030	0.16200	4.115
4	41740	21.1480	0.20430	5.189
2	66370	33.6520	0.25760	6.543
1	83690	42.4060	0.28930	7.348
0	105500	53.4770	0.32490	8.252
00	1331100	67.4190	0.36480	9.266
000	167800	55.0320	0.40960	10.403
0000	211600	107.2250	0.46000	11.684

3.4 Número de Electrodoes en un Sistema de Tierras.

La mayor parte de los conductores empleados en los sistemas de tierra están hechos de cobre, que es el material con mayor conductividad y con un bajo costo.

Las profundidades que se han establecido por normas internacionales y de México, a la que se colocará la red a partir de la superficie del suelo es de 0.5 a 1 metro, por otra parte, al aumentar la profundidad disminuye la resistencia de la red, el costo de la instalación no se justifica y no muestra mejoras importantes en la operación de la red. Si el área tiene por lados I_1 y I_2 , por lo general la longitud total del conductor de tierra se disminuye como una cuadrícula enterrada a la profundidad ya establecida.

La distancia a la que se deben localizar los conductores que forma la cuadrícula se calcula:



La longitud total del conductor será:

$$L = I_1 \left(\frac{I_2}{D} + 1 \right) I_2 \left(\frac{I_1}{D} + 1 \right)$$

Donde:

$$L = \frac{2I_1I_2}{D} + I_1I_2$$

Entonces:

$$D = \frac{2I_1I_2}{L - I_1I_2}$$

Donde:

D = Longitud de cobre cuadro

I₁ = Longitud del lado mayor del rectángulo

I₂ = Longitud del lado menor del rectángulo

L = Longitud total del conductor de la malla.-

Ahora, dimensionar eléctricamente un electrodo significa determinar las dimensiones en función de la resistencia o tierra que se desea.

En la práctica se recurre para el cálculo del dimensionamiento a formulas empíricas o gráficas que proporcionan una orientación primaria y se comprueba durante la instalación la resistencia obtenida, aumentado eventualmente la profundidad, la extensión o el número de dispersores hasta alcanzar la resistencia deseada.

Su localización se lleva a cabo donde los potenciales son mayores tales como las esquinas de la red y a través del cálculo para reducir la resistividad del sistema en puntos clave.

El tipo de electrodo más común es el cilíndrico o de varilla de 2.44 a 3.05 metros con un diámetro de 1.6 cm (5/8"), tiene la ventaja de que se entierra a una razonable profundidad del terreno y puede alcanzar frecuentemente capas más profundas.

La resistencia de una varilla Copperweld de 5/8" de diámetro por 3.05 metros:

$$R_v = \rho (0.41) \Omega$$

El número de varillas se determina en función del área para asegurar una resistencia de 25Ω como máxima, marcada por ROIE (Reglamento de Obras e Instalaciones Eléctricas).

Aunque en realidad el valor que siempre se utiliza como valor práctico para instalaciones industriales es de 0.1 a 6 Ω.

Para calcular el número de electrodos de tierra que se necesitan para obtener la resistencia requerida en la subestación, se puede emplear la siguiente fórmula, recomendada para la seguridad en la puesta a tierra en corriente alterna de IEEE:

$$N = \frac{\rho}{2\pi R_t L_1} \left(\ln \left(\frac{4L_1}{D} \right) - 1 \right)$$

Donde:

N= número de electrodos a tierra

L₁= longitud del electrodo

D= radio del electrodo

ρ= resistividad del terreno

R_t= resistencia de la tierra

Ahora, para determinar la mínima longitud del conductor cuando se usan electrodos de tierra.

La distancia mínima entre 2 varillas es 2r, donde r es el radio de un área protegida por una varilla.

Siendo el área de una varilla

$$Av = \frac{A}{N}$$

Donde:

Av= Área protegida por la varilla

A= Área de la subestación

N= Numero de electrodos

Tenemos:

$$Av = \pi r_1^2$$

Donde:

$$\frac{A}{N} = \pi r_1^2$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{A}{\pi N}}$$

Por lo tanto, la longitud total mínima es:

$$L = 2r_1^2 N^2 = 2N^2 \sqrt{\frac{A}{\pi N}}$$

Y la separación entre electrodos será:

$$r_1 = \sqrt{\frac{A}{\pi N}}$$

Después de la instalación del sistema de tierras se debe medir el valor de la resistencia, si resulta demasiado alta, se deben agregar más electrodos hasta obtener el valor deseado de la resistencia de tierra.

En estos casos se emplea la siguiente ecuación:

$$Na = Nc \left[\left(\frac{Rm}{Rg} \right)^2 - 1 \right]$$

Donde:

Na = Número adicional de electrodos por agregar.

Nc = Número adicional de electrodos existentes.

Rm = Resistencia de tierra medida.

Ry = Resistencia de tierra deseada.

3.5 Resistencia por Sistemas de Tierra.

Resistencia de la red

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} L n \frac{4L}{d}$$

donde:

R = resistencia de la red

ρ = resistividad del terreno Ω -m

L = longitud total de la red

d = diámetro del conductor

El valor obtenido es correcto ya que las normas indican, que el valor no debe sobre pasar de los 10Ω , y puede ser menor a 1Ω .

CAPITULO IV

DISEÑO

4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

4.1 Diseño preliminar.

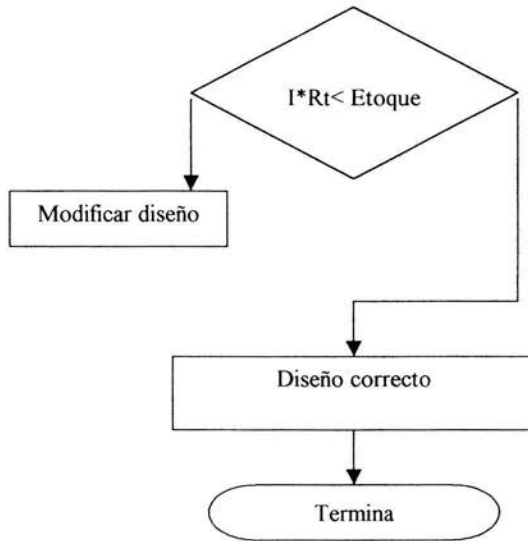
Todo diseño de puesta a tierra debe asegurar, hasta donde la ingeniería lo permita, limitar las elevaciones de potenciales en el momento de falla, en la zona de influencia.

A continuación se muestran los pasos esenciales para diseñar un sistema de tierras según la metodología IEEE 80.

1. Condición geométrica: el diseño requiere que la malla sea cuadrada o rectangular.
2. Capa superficial: es prenda de garantía para la seguridad de las personas. En el caso de subestaciones interiores, con el fin de cumplir las normas de tensiones de seguridad, luego de instalar los equipos de patio se debe recubrir el piso de concreto con materiales de caucho o de vinilo, en subestaciones tipo exterior se recomienda una capa de gravilla.
3. Conductor: se acostumbra a emplear como mínimo 2/0 AWG de calibre de cobre, para construir las mallas y en recientes encuestas en diferentes compañías de distribución eléctrica se tiene que la mayor parte usa conductor calibre 4/0 AWG.

En la actualidad los reglamentos vigentes exigen la conexión a tierra de todas las partes metálicas que puedan energizarse en un momento dado por una falla a tierra.

Para determinar si el diseño de tierras es correcto, debe cumplirse con la siguiente condición:



La pregunta es si $I * R_t$ es menor que el potencial de toque, si la respuesta es positiva, es diseño es correcto, es decir, que al producirse una falla en el sistema, el voltaje máximo que se presenta no puede dañar a los equipos ni a las personas que se encuentran en el lugar.

Si la respuesta es negativa, se tendrá que modificar el diseño, a partir de la resistencia de malla, y se tendrán que incluir los siguientes parámetros:

Em: voltaje de malla en el centro de la esquina en Volts.

Ep: Voltaje de paso en un punto fuera de la esquina de la malla a 1 m en diagonal hacia fuera de la malla en Volts.

Km: factor de espaciamiento para voltaje de la malla.

Kp: factor de espaciamiento para voltaje de paso

Ki : factor de corrección por geometría de la malla

Kii: factor de corrección de peso que ajusta los efectos de los conductores internos de la esquina de la malla..

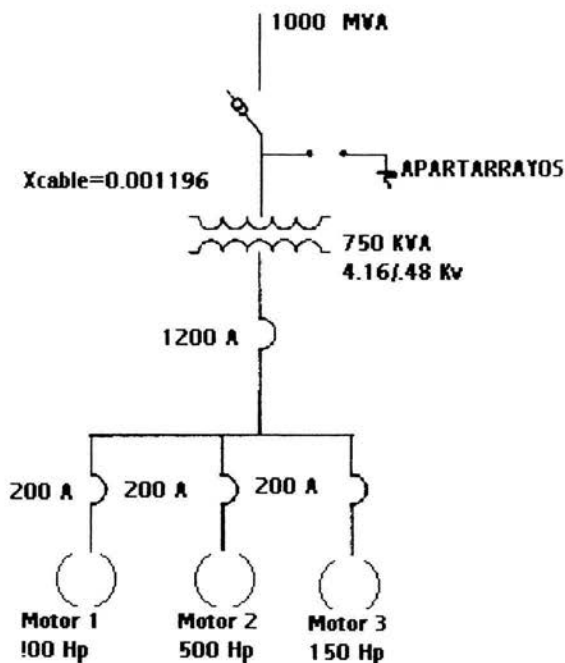
Calculo de los voltajes máximos de paso y malla

$$E_m = \rho * km * ki * It / L \quad \text{Voltaje de malla}$$

$$E_m = \rho * kp * ki * It / L \quad \text{Voltaje de paso}$$

4.2 Diseño de un sistema de tierras.

Como el objetivo de este capítulo es mostrar un ejemplo de un diseño de sistema de tierras tomemos como base el siguiente diagrama unifilar de una planta industrial.



$$KVA_2 = 1000$$

$$KV_1 = KV_2$$

X_1 = reactancia secuencia positiva

X_2 = reactancia secuencia negativa

X_0 = reactancia secuencia cero

KVA_2 = Base de potencia a la cual se desea referir las cantidades

KVA_1 = Base de potencia a la cual están expresadas las reactancias X

KV_2 = Base de tensión a la cual se desea referir las reactancias X'' y X'

KV_1 = Base de tensión a la cual están expresadas las reactancias X.

- Reactancia de la red

$$X_{red} = X_2 = X_1 = X_0 = \frac{KVA_2}{KVA_1} = \frac{1000}{1000,000} = 0.001PU$$

- Reactancia del cable

$$X_{cable} = 0.001196PU$$

- Reactancia del transformador

Por tabla A.

TABLA A.

Reactancias típicas de transformadores. Reactancias por unidad en clasificación KVA de transformadores.

Clasificación del voltaje primario	Banco KVA (Trifásico o tres fases únicas)		
	25-100	100-500	Más de 500
2400/4160 Volts	0.015-0.016	0.050	0.055
13.8 Kv	0.015- .0025	0.050	0.055
46 Kv		0.060	0.065
69 Kv		0.065	0.070

Para 4.16 KV y 750 KVA

$$X_1=0.055$$

$$X_2 = X_1 \frac{KVA_2}{KVA_1} = 0.055 \frac{1000}{750} = 0.0733PU$$

- Para interruptor 200 A

Por tabla B

TABLA B.

Reactancia de interruptores de circuitos de potencia de bajo voltaje

Interrupción		Reactancia en ohms
Clasificación - amperes	Clasificación amperes	
15,000 y 25,000	15 a 35	0.04
	50 a 100	0.004
	125 a 225	0.001
	250 a 600	0.0002
50,000	200 a 800	0.0002
	1000 a 1600	0.00007
75,000	2000 a 3000	0.00008
100,000	4000	0.00008

$$X_1 = 0.001$$

$$X_2 = \frac{X\Omega KVA_2}{(KV_2)^2 1000} = \frac{0.001(1000)}{.48^2 * 1000} = 0.0043PU$$

- Para motor 1 de 100 hp

Por tabla C

TABLA C.

Reactancias típicas de motores de inducción valores por unidad en bases de maquinas KVA (índices de HP).

	X''	X'
Arriba de 600 Volts	0.17	-
600 Volts y menos	0.25	-

$$X_1 = 0.25$$

$$X_2 = X_1 \frac{KVA_2}{KVA_1} = 0.25 \frac{1000}{100} = 2.5PU$$

- Para motor 2 de 500 hp

Por tabla C

$$X_1 = 0.25$$

$$X_2 = X_1 \frac{KVA_2}{KVA_1} = 0.25 \frac{1000}{500} = .5PU$$

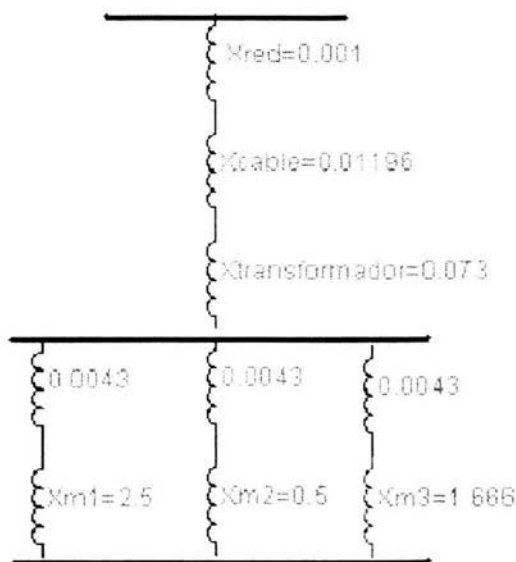
- Para motor 3 de 150 hp

Por tabla C

$$X_1 = 0.25$$

$$X_2 = X_1 \frac{KVA_2}{KVA_1} = 0.25 \frac{1000}{150} = 1.666 \text{ PU}$$

Diagrama de reactancias



$$X_{RCT} = X_{RED} + X_{CABLE} + X_{TRANSFORMADOR} = 0.001 + 0.01196 + 0.073 = 0.0755 \text{ PU}$$

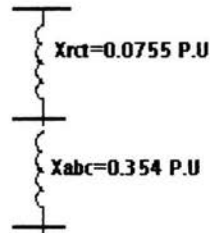
$$X_A = X_{INTERRUPTOR} + X_{MOTOR1} = 0.043 + 2.5 = 2.543 \text{ PU}$$

$$X_B = X_{INTERRUPTOR} + X_{MOTOR2} = 0.043 + 0.5 = 0.543 \text{ PU}$$

$$X_C = X_{INTERRUPTOR} + X_{MOTOR3} = 0.043 + 1.666 = 1.6703 \text{ PU}$$

$$X_{ABC} = \frac{X_A * X_B * X_C}{X_A + X_B + X_C} = \frac{2.543 * 0.543 * 1.6703}{2.543 + 0.543 + 1.6703} = 0.354 P.U$$

Quedando el diagrama:



Para calcular la X_{eq}

$$X_{EQ} = \frac{X_{RCT} * X_{ABC}}{X_{RCT} + X_{ABC}} = \frac{0.0755 * 0.354}{0.0755 + 0.354} = 0.0622 P.U$$

Para la corriente de corto circuito I_{cc} .

$$I_{cc} = \frac{KVA_2}{\sqrt{3} * KV_1 * X_{EQ}} = \frac{1000}{\sqrt{3} * 0.48 * 0.0622} = 19328.86 \text{ AMP.}$$

El diseño de conexión del sistema de tierras se hará considerando lo siguiente:

- Corriente de falla a tierra 19328.86 Amp.
- Área cubierta por la Subestación 30*90 mts.
- Duración de la falla 0.5 seg.
- Resistividad del suelo 100 Ω -metro.
- Resistividad superficial (concreto) 7000 Ω - metro.
- Profundidad de la red 0.5 mts.
- Tipo de conector mecánico
- Tensión de operación 4.16/48 kv
- Calibre del cable 4/0 AWG 0.013 m

a) Ajuste de la corriente de falla por los factores de crecimiento y decremento.

$D = 1$ y $C = 1$ ya que no se tienen programadas futuras ampliaciones, quedando:

$$I = D * C * I_F$$

$$I = 1 * 1 * 19328.86 = 19328.86 \text{ AMP.}$$

b) longitud mínima requerida por la red

Haciendo referencias a investigaciones hechas por el IEEE publicadas en su guía para el diseño de redes de tierra, en el cual, para el cálculo de la longitud del conductor que se utilice un valor entre 1-3 para $KmKi$ ya que dentro de este rango, se encuentra dicho producto.

$$L = \frac{1.5 \rho l \sqrt{t}}{165 + 0.25 \rho s} = \frac{1.5 * 100 * 193288 * \sqrt{0.5}}{165 + 0.25 * 7000} = 10705$$

Donde

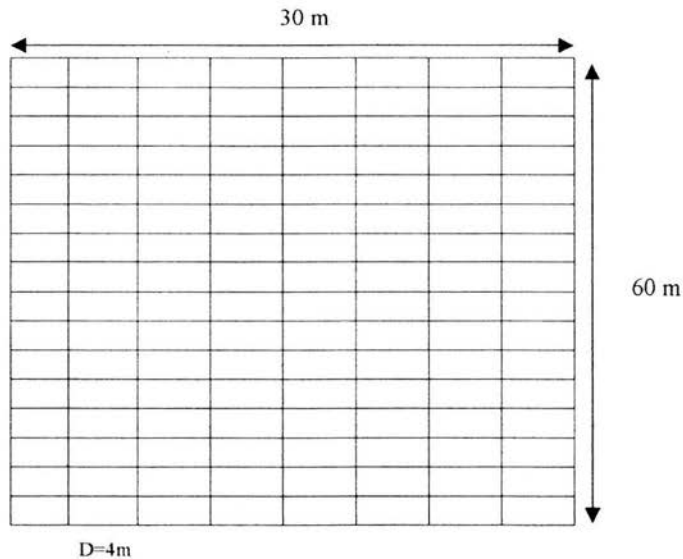
ρ_s = resistividad superficial (gravilla, concreto).

Con este valor de L calculamos la separación D.

$$D = \frac{2L_1 * L_2}{L - L_1 * L_2} = \frac{2 * 30 * 60}{1070.5 - 30 - 60} = 3.67 \approx 4m$$

$$A = 30 m * 60 m$$

$$D = 4$$



Ahora calculamos numero de conductores verticales y horizontales.

$$n_1 = \frac{\text{dimension vertical del area}}{\text{separacion entre conductores}} + 1 = \frac{30}{4} + 1 = 8.5 \approx 8$$

$$n_2 = \frac{\text{dimension horizontal del area}}{\text{separacion entre conductores}} + 1 = \frac{60}{4} + 1 = 16$$

$$\text{Numero de varillas} = \frac{60}{6} + 1 * \frac{30}{6} + 1 = 66$$

Para la instalación uniforme de estas varillas consideramos una separación de 2 veces la longitud de la varilla (3.05 m)

La longitud del conductor queda de la siguiente forma:

Conductores verticales	$N_1 L_2 = 8 * 60 = 480$
Conductores horizontales	$N_2 L_1 = 16 * 30 = 480$
Numero de varillas	66

TOTAL = 1026 m

c) Resistencia de la red

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} L_n \frac{4L}{d} = \frac{100}{2\pi * 1026} * L_n \frac{4 * 1026}{0.013} = 0.1962 \Omega$$

donde:

R = resistencia de la red

ρ = resistividad del terreno Ω -m

L = longitud total de la red

d = diámetro del conductor 4/0 0.013 m

El valor obtenido es correcto ya que las normas indican, de que el valor no debe sobre pasar de los 10Ω .

d) Voltaje tolerable de toque y de paso

$$\text{Potencial de toque} = \frac{157 + 0.24 \rho s}{\sqrt{t}} = \frac{157 + 0.24 * 7000}{\sqrt{0.5}} = 2598.3 \text{ Volts}$$

$$\text{Potencial de paso} = \frac{157 + \rho s}{\sqrt{t}} = \frac{157 + 7000}{\sqrt{0.5}} = 10123.05 \text{ Volts}$$

Como se especifico anteriormente, debe de cumplirse la relación:

$$\text{Si } I \cdot R_T < E_{\text{TOQUE}}$$

$$19328.8(0.1962) < 2598.3$$

$$3793 < 2598.3$$

Vemos que la relación establecida no se cumple, por lo que se hacen los siguientes cálculos:

$$E_M = \rho \cdot K_M \cdot K_i \cdot I_F / L$$

$$E_p = \rho \cdot K_o \cdot K_i \cdot I_F / L$$

Donde :

$$K_M = \frac{1}{2\pi} \left[\text{Ln} \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \text{Ln} \frac{8}{(2n-1)} \right]$$

$$h=0.5 \text{ m}$$

$$D=4$$

$$d=0.013$$

$$n=3$$

$$K_M = \frac{1}{2\pi} \left[\text{Ln} \left[\frac{16}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.013} + \frac{(4+2(0.5))^2}{8 \cdot 4 \cdot 0.013} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.013} \right] + \text{Ln} \frac{8}{(2 \cdot 3 - 1)} \right]$$

$$K_M = 1.32$$

$$K_i = 0.656 + 0.172$$

Para E_m

$$E_m = 100 \cdot 1.32 \cdot 1.172 \cdot 19328.8 / 1026$$

$$E_m = 2914.46$$

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} W \right]$$

W=0.5

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{1} + \frac{1}{4.5} + \frac{0.5}{4} \right]$$

$K_p=0.428$

$E_p=100*0.428*1.172*19328.8/1026$

$E_p=944.5$

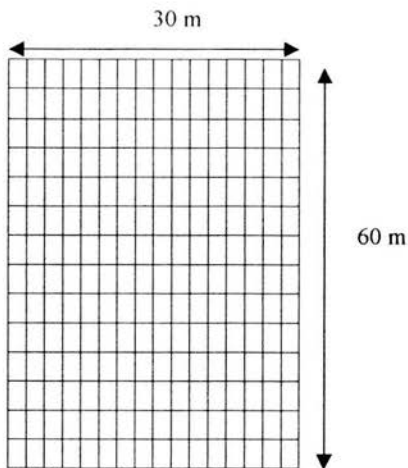
Voltajes Máximos que soporta cuerpo humano (70 Kg)		Voltajes Máximos que se presentan en una falla.	
Paso	10123.05	> 944.55	✓
Toque	2598.03	< 2914.46	×

El potencial de malla es el más alto que puede presentarse en la subestación y es superior al potencial de toque.

Por lo tanto sé rediseña la malla

A = 30 m * 60 m

D = 2 m



Calculamos de nuevo la longitud L

$$n_1 = \frac{30}{2} + 1 = 16 * 60 = 960$$

$$n_2 = \frac{60}{2} + 1 = 31 * 30 = 930$$

$$\text{No. De varillas} = \frac{60}{6} + 1 * \frac{30}{6} + 1 = 11 * 6 = 66$$

La longitud del conductor queda de la siguiente forma:

Conductores verticales	960
Conductores horizontales	930
Numero de varillas	66

TOTAL = 1956 m

Recalculamos la resistencia de la red

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d} = \frac{100}{2\pi * 1956} * \ln \frac{4 * 1956}{0.013} = 0.1082 \Omega$$

donde:

R= resistencia de la red

ρ = resistividad del terreno Ω -m

L= longitud total de la red

d= diámetro del conductor 4/0 0.013 m

El valor obtenido es correcto ya que las normas indican, de que el valor no debe sobre pasar de los 10Ω y puede ser menor a 1Ω .

Como se especificó anteriormente, debe de cumplirse la relación:

$$\text{Si } I \cdot R_T < E_{\text{TOQUE}}$$

$$19328.8(0.1082) < 2598.3$$

$$2092.9 < 2598.3$$

Se cumple la relación, por lo tanto el diseño queda aprobado.

4.3 Mantenimiento

El mantenimiento, como toda función administrativa, requiere de análisis para conocer las fallas y sus medidas preventivas, el planeamiento para determinar los recursos necesarios y una programación para determinar la época de su realización.

Cuando se ejecuten labores de mantenimiento en un sistema eléctrico que involucren los sistemas de tierra, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Para conexiones a la puesta a tierra de la red normal, todos los cables deben ir desnudos.
- Para conexiones a la puesta a tierra de equipos sensibles, todos los cables deben ir aislados en color verde.
- El calibre de los cables verdes debe ser como mínimo del No. 14 AWG.
- Todas las conexiones de tierra deben ser realizadas con soldadura exotérmica o con conectores mecánicos certificados y aprobados por el sector eléctrico.
- Todos los tomacorrientes deberán quedar bien polarizados.
- Si se emplean materiales de la mejor calidad, se espera una vida de 20 años para el sistema de tierra.
- No deben instalarse las tomas de tierra directamente dentro del agua, pues, aunque disuelve las sales del terreno, resulta mala conductora y existe mayor probabilidad de corrosión.

- Se recomienda tratar terrenos con sal común, la cual actúa sobre el agua haciéndola mejor conductora.
- Debe evitarse la instalación de tomas de tierra en terrenos corrosivos, en tales casos se recomienda emplear varilla en lugar de cable conductor, canalizándolo en tubo de plástico en la parte enterrada, hasta el empalme con la placa o estaca.
- En sitios pavimentados, se procurara que el conductor de tierra no quede aprisionado en el pavimento dejando alrededor un espacio sin pavimentar que se rellenara con una capa de tierra compactada encima de la carbonilla de coke y con otro capa de área y de tierra.
- Si se tienen varios sistemas de tierra en una misma instalación, estas deberán interconectarse.

Se sugiere el siguiente plan de mantenimiento para un sistema de tierra.

Realizar a:	Acción Preventiva
1. Un año	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de resistencia de puesta a tierra. • Revisión y ajustes necesarios del sistema.
2. Cinco años	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de resistencia de puesta a tierra de cada subsistema del sistema. • Medición de resistencia de puesta a tierra de todo el sistema de tierra interconectado
3. Diez años	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión de conexiones al electrodo. • Las actividades de cada año.

CONCLUSIONES

Un sistema de puesta a tierra es una parte, si no la mas importantes, de una instalación eléctrica y por lo tanto debe de dársele el tratamiento acorde con su trascendencia, es decir que si no se llega a un punto óptimo, deben hacerse esfuerzos para llevarlo a la mejor condición, antes de su puesta en servicio.

Los sistemas de tierra son componentes cada vez mas necesarios en los sistemas eléctricos, puesto que además de permitir la conducción hacia el suelo de cargas eléctricas originadas por rayos, electricidad estática o fallas del sistema, deben de poseer la capacidad de dispersión y disipación de las fallas.

El principal objetivo del sistema de tierras es el de dar seguridad y protección al personal que labora en operación y mantenimiento en equipo eléctrico, es por esto que todo tipo de estructuras metálicas, carcazas de equipo electromecánico que estén en cercanía inmediata con circuitos eléctricos deben ser conectados correctamente a tierra. También es importante para la protección de maquinaria y equipos, así como para su correcto funcionamiento.

Con esto nos referimos a que la conexión a tierra tiene que ser suficiente, tanto como para la corriente normal, como la que se pudiera producir por una corriente de falla, ya que un contacto accidental entre un estructura o un cuerpo metálico no conectado a tierra con un circuito eléctrico, tendrá el mismo potencial que tiene el circuito y este se convertirá en un peligro al ser tocado accidentalmente por alguien.

Hay que resaltar que para tenga un mejor funcionamiento debe de aplicarse un mantenimiento periódico para que siempre este en buenas condiciones, tomando en cuenta las consideraciones que se dieron en el capítulo IV.

Bibliografía.

- ☞ CASAS OSPINA, Favio .Tierras. Soporte de la Seguridad Eléctrica. Segunda Edición. Editorial SEGELECTRICA. 2003.
- ☞ Ingeniería y Sistemas Técnicos Especializados S.A de C.V. Curso Plantas Eléctricas de Emergencia , Instalaciones Eléctricas y Refrigeración.
- ☞ HARPER Enrique. Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas.
- ☞ Grupo GAMA PLANTAS DE LUZ. Curso Plantas Eléctricas de Emergencia y sistemas de Tierras.
- ☞ Cursos Abiertos. Diplomado en Instalaciones Eléctricas. Sistema de Tierras. Facultad de Ingeniería UNAM.
- ☞ National Electrical Code. National Fire Protection Association.
- ☞ Reglamento de Obras e Instalaciones Eléctricas (ROIE). Dirección de normas SIC.



FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES • CUAUTITLAN
CAMPO 4

R E S E R V A

R E S E R V A