



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

40
209

ESTUDIO DEL SISTEMA DE TIERRA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

ALEJANDRA LETICIA VAZQUEZ HURTADO

ASESOR: ING. MA. DE LA LUZ GONZALEZ QUIJANO

CUAUTITLAN-IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1994

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 está 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
AVENIDA DE
MEXICO

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

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

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodriguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Estudio del Sistema de Tierra

que presenta la pasante: Alejandra Leticia Alvarez Hurtado
con número de cuenta: A222693-2 para obtener el TITULO de:
Ingeniera Mecánica Electricista.

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 28 de Octubre de 1994

PRESIDENTE Ing. Esteban Corona Escamilla
VOCAL Ing. Ricardo L. Ramirez Verdeja
SECRETARIO Ing. Ma. de la Luz González Quijano
PRIMER SUPLENTE Ing. Castillo Rodríguez Arciniega
SEGUNDO SUPLENTE Ing. Francisco Gutiérrez Santos

Eloisa E 31/oct/94
Alvarez 11/dic/94
Quijano 31/oct/94
Castillo 17/nov/94
Gutiérrez 4/dic/94

AGRADECIMIENTOS

A DIOS :

QUIÉN ME DIO LA VIDA Y LA OPORTUNIDAD DE TERMINAR MI CARRERA.

A MIS PADRES:

QUIENES ME ALENTARON Y APOYARON EN EL TRANSCURSO DE LA CARRERA HASTA SU TÉRMINO.

A MI ASESOR:

QUIÉN ME APOYÓ Y ME GUIÓ PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO.

A MIS HERMANAS Y AMIGOS:

QUIENES COLABORARON DIRECTA E INDIRECTAMENTE EN LA ELABORACIÓN DE ESTE TRABAJO.

INDICE

Agradecimientos

Introducción

CAPITULO 1

SISTEMA DE TIERRA	Página
1.1. Definición.	1
1.2. Objetivos del sistema de tierras.	3
1.2.1. Conexión a tierra de los equipos eléctricos industriales	3
1.2.2. Conexión a tierra de los equipos no eléctricos	3
1.3. Importancia del sistema de tierras.	5
1.4. Disposiciones básicas de las redes de tierra.	6
1.4.1. Sistema radial.	6
1.4.2. Sistema de anillo.	6
1.4.3. Sistema de malla.	6
1.5. Clasificación de los sistemas de tierra de acuerdo con su funcionamiento.	9
1.5.1. Sistema de tierras para neutros.	9
1.5.2. Sistema de tierras para estructuras y partes no energizadas.	11
1.5.3. Sistema de tierras para apartarrayos.	14

	Página
1.6. Materiales y componentes de un sistema de tierras.	16
1.6.1. Conductores.	16
1.6.2. Electrodo.	17
1.6.2.1. Clasificación de los electrodos para el sistema de tierra	19
1.6.3. Conectores y accesorios.	22

CAPITULO 2

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO

2.1. Factores que afectan la resistividad del terreno.	27
2.1.1. Efecto del contenido de humedad.	27
2.1.2. Efecto de la temperatura.	29
2.1.3. Efecto de las sales minerales.	29
2.2. Métodos de medición de la resistividad del terreno.	31
2.3. Técnicas de medición.	34
2.3.1. Método de los cuatro puntos ó método de Wenner.	34
2.3.2. Método de tres puntos o caída de potencial	39
2.3.3. Método de la pendiente.	40

CAPITULO 3

PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS

ESTRUCTURA DE DISEÑO	Página
3.1. Datos de entrada.	41
3.2. Determinación de la corriente máxima de falla a tierra.	42
3.3. Cálculo del calibre del conductor.	43
3.4. Diseño preliminar del sistema de tierra.	46
3.4.1. Longitud mínima requerida para la red.	46
3.4.2. Cálculo del número de varillas.	48
3.5.3. Resistencia de la red.	48
3.5. Comprobación de la seguridad de la red.	49
3.5.1. Potencial de paso para el hombre.	49
3.5.2. Potencial de contacto para el hombre.	50
3.5.3. Potencial de transferencia.	52
3.5.4. Potencial de contacto de malla	53
3.5.5. Potencial de paso en la malla	54
Ejemplo de un sistema de tierras.	55

CAPITULO 4

PROCEDIMIENTO DE CALCULO POR COMPUTADORA

4.1	Secuencia de programación	67
4.2.	Diagrama de flujo	70
4.3.	Resultados	71

Nomenclatura

Conclusiones

Bibliografía

INTRODUCCION

El propósito del sistema de conexión a tierra es proporcionar una trayectoria de baja impedancia entre el neutro del sistema eléctrico y el terreno. Bajo estas circunstancias, las personas y los animales que, intencional o accidentalmente, establezcan contacto con las estructuras metálicas directamente unidas al sistema de conexión a tierra, se encontrarán en condiciones de seguridad.

Dependiendo de la magnitud de la diferencia del potencial entre las estructuras y el suelo, pueden existir condiciones peligrosas para las personas. Las situaciones que pueden presentarse dan origen a dos condiciones:

- a) Una persona tocando una estructura que se encuentra a un voltaje diferente al del suelo sobre el que está parado, será sometida a una diferencia de potencial que producirá la circulación de una corriente a través de su cuerpo (potencial de contacto).

- b) Una persona caminando sobre la superficie del suelo cercano al sistema de conexión a tierra, será sometida a una diferencia de potencial entre sus pies, la cual producirá la circulación de una corriente a través de sus piernas (potencial de paso).

La circulación de corriente en el cuerpo humano constituye un peligro, por lo que los sistemas de conexión a tierra deberán ser diseñados para controlar las distintas condiciones de operación del sistema eléctrico, y la magnitud de la corriente que circulará a través de las personas como producto de las tensiones de paso y contacto.

En el presente documento se presentan los diversos elementos que integran una base para el diseño y evaluación de los parámetros que determinan las condiciones de operación - comportamiento de los sistemas de conexión a tierra, bajo condiciones desfavorables de operación causadas por una falla de circuito corto.

CAPITULO I

SISTEMA DE TIERRAS

1.1. Definición.

Un sistema de tierras, es una red de interconexión de las instalaciones y equipo en un área específica, con un número determinado de conectores desnudos enterrados en el terreno, que proveen una tierra común para los dispositivos eléctricos o estructuras metálicas de la subestación y/o planta en general.

Las redes desnudas instaladas horizontalmente cerca de la superficie son efectivas para controlar los altos voltajes, pero la combinación de una red horizontal con un número de varillas verticales enterradas en el terreno, garantiza, en mayor grado, la disipación de la corriente de falla hacia tierra con rapidez y sin peligro para el personal.

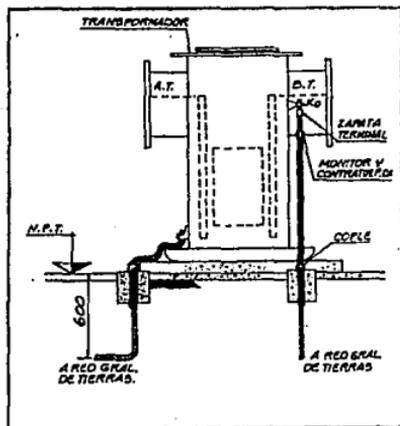
Se ha generalizado en llamar al sistema de tierras como, conexión a tierra del sistema de distribución o conexión a tierra del equipo, siendo éstos dos conceptos diferentes.

Conexión a tierra del sistema de distribución.

Es la conexión a tierra del neutro de un sistema eléctrico, o cualquiera de los conductores portadores de corriente figura num. 1.1.

Conexión a tierra del equipo.

Es la conexión a tierra del equipo eléctrico, mediante uno o más de sus partes metálicas que normalmente no conducen electricidad.



CONEXIÓN A TIERRA DE TANQUE Y NEUTRO DEL TRANSFORMADOR.

Figura num.1.1

1.2. Objetivos del sistema de tierras.

1.2.1. Conexión a tierra de los equipos eléctricos industriales.

- Limitar el potencial entre las partes no conductoras de corriente del equipo eléctrico, a un valor de seguridad bajo las condiciones de operación normal o a normal del sistema figura num. 1.2.
- Obtener una trayectoria de baja impedancia para las corrientes de falla a tierra, evitando que se puedan originar arcos o calentamiento de suficiente magnitud para iniciar la ignición de materiales combustibles o gases explosivos cerca del punto de arco.
- Asegurar que el personal no sea un medio de conducción hacia tierra de la corriente de falla, al ofrecer menor resistencia al paso de la misma.

1.2.2. Conexión a tierra de los equipos no eléctricos.

- Contar con una protección contra la electricidad estática producida por fricción, resultado del movimiento de bandas transportadoras, papel, textiles, bandas de transmisión, combustibles, entre otros.

- Asegurar la continuidad de las conexiones a tierra, para el facil dren de la corriente de corto hacia la malla de tierra figura num. 1.3.

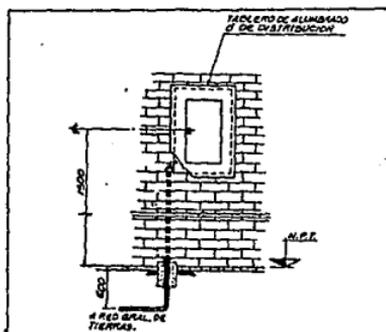


Figura num. 1.2.

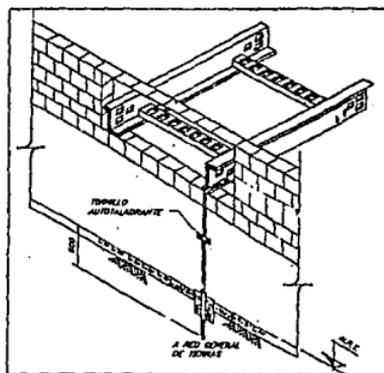


Figura num. 1.3.

1.3. Importancia del sistema de tierras.

La importancia de un sistema de tierras radica en los siguientes factores:

- a. Proteger al ser humano de potenciales de peligro bajo condiciones de falla ocasionadas por:**
 - **Contactos accidentales.**
 - **Corrientes derivadas de falla a tierra.**
 - **Corrientes de circuito corto.**
 - **Corrientes provocadas por el accionamiento de interruptores.**
 - **Corrientes estáticas.**
 - **Corrientes debidas a la operación de apartarrayos.**

- b. Contar con una canalización segura para la descarga de la corriente de corto hacia el terreno. Además de tener un medio para desenergizar al sistema cuando se requiera darle mantenimiento.**

- c. Facilitar, mediante la operación de relevadores, la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos, evitando la destrucción parcial o total del equipo.**

- d. Dar continuidad y confiabilidad al servicio eléctrico.**

- e. Evitar que las altas corrientes dañen por calentamiento el aislamiento del equipo, provocando un envejecimiento prematuro y mal funcionamiento.
- f. Disponer de un medio adecuado para la conexión de los neutros de los equipos.

1.4. Disposiciones básicas de las redes de tierra.

Para las redes de tierra se han considerado básicamente tres sistemas.

1.4.1. Sistema radial.

Consiste en uno o varios electrodos a los que se conectan las derivaciones de cada equipo figura num. 1.4.

1.4.2. Sistema en anillo.

Es la conexión de un cable de cobre en forma de anillo alrededor de la superficie ocupada por el equipo de la planta o subestación, haciendo derivaciones a cada uno con cable de menor calibre figura num. 1.5.

1.4.3. Sistema de malla.

Consiste, en una combinación de conductores paralelos y perpendiculares que forma una red unida con electrodos varillas figura num. 1.6.

La red deberá extenderse sobre toda el área de maniobras del equipo o subestación, y algunas veces más allá de la cerca del predio.

En áreas donde no es posible obtener una baja impedancia espaciando los electrodos de la malla sobre una área grande, como se da en condiciones más favorables, se acostumbra un uso alternativo de una red remota, el uso de varillas de tierra muy profundas en combinación con un tratamiento químico del terreno, o uso de arcilla o bentonita.

Sistema radial

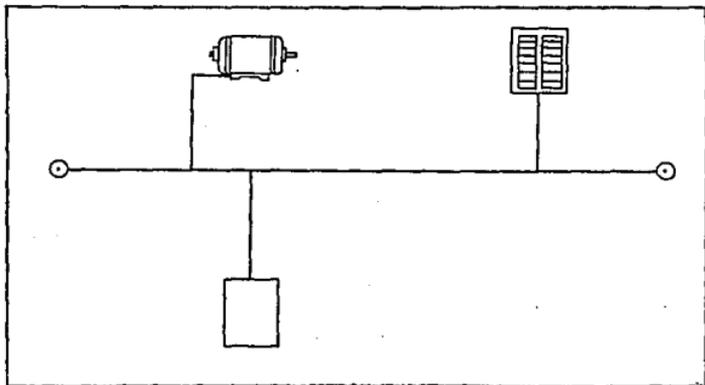


Figura num. 1.4.

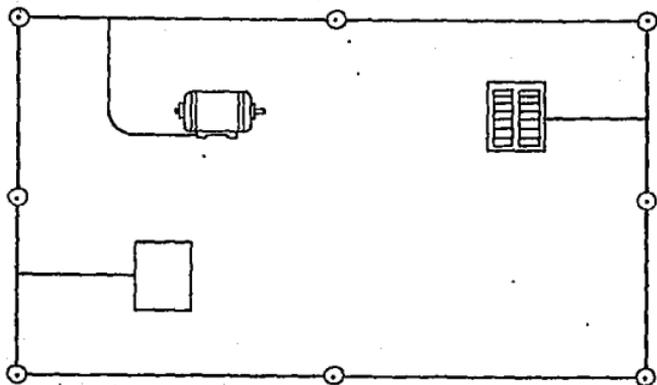


Figura num. 1.5.

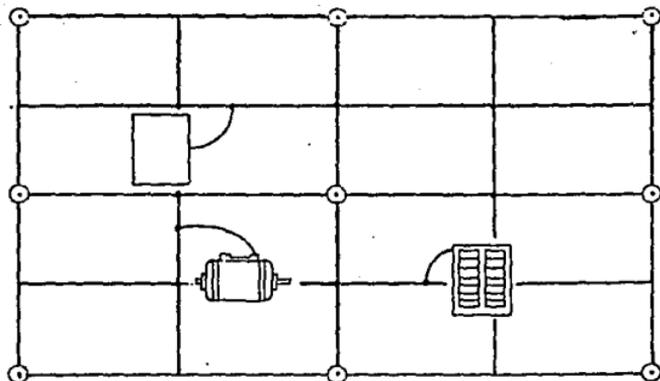


Figura num. 1.6.

1.5. Clasificación de los sistemas de tierra de acuerdo a su funcionamiento.

Los sistemas de tierra se clasifican de acuerdo con la función que desempeñan :

1.5.1. Sistema de tierras para neutros.

En un sistema eléctrico donde existe un neutro, éste se puede encontrar conectado a tierra de la siguiente manera:

a. Sólidamente aterrizado.

Un sistema de potencia se considera que está sólidamente aterrizado, cuando el neutro del generador, o el transformador principal está conectado por medio de un conductor de impedancia casi cero a tierra.

La principal característica del sistema, es su eficiencia para controlar las sobretensiones y su inmediata separación de los circuitos de falla por medio del disparo por instrumentos de sobretensión. Pueden adaptarse sensores para la protección contra arcos pequeños destructivos, garantizando la prevención de daños a equipos y el fácil restablecimiento del servicio en caso de falla.

La principal inconveniencia de este sistema es la presencia de voltajes peligrosos que existen en la cercanía de un arqueo, o en las proximidades de algún instrumento en el instante de la falla, lo cual implica que sólo se debe trabajar en los circuitos cuando se encuentren totalmente desenergizados.

b. Conectado a tierra a través de una resistencia.

El neutro se conecta a tierra a través de una resistencia, con el fin de limitar la magnitud de la corriente de falla a un valor relativamente bajo, pero suficiente para detectar y eliminar las fugas a tierra. El tamaño de la resistencia se elige en forma tal que la fuga a tierra se mantenga entre un 5% y un 20% de la corriente de falla trifásica. (tomado del procedimiento B.I.)

Este sistema está diseñado para el disparo automático a través de instrumentos de sobretensión calibrados de acuerdo con la corriente que se tenga con la resistencia. Donde se desea un control de sobrevoltajes transitorios, evitando la interrupción del servicio cuando suceda la falla. Su desventaja es la dificultad de poder localizar las fallas.

c. Conectado a tierra a través de un reactor.

Este método consiste en intercalar un reactor entre el neutro del sistema y la conexión a tierra, donde se controlan los sobrevoltajes generados en el sistema de fuerza por circuitos resonantes inductivos-capacitivos y no por contactos físicos con otros sistemas de mayor voltaje.

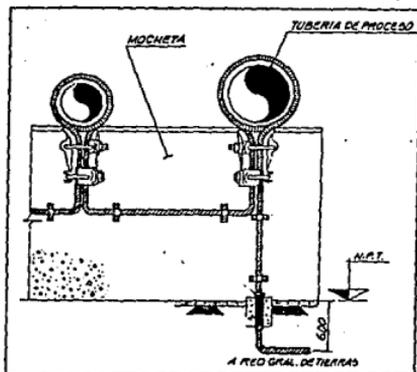
1.5.2. Sistema de tierras para estructuras y partes no energizadas.

Las partes de la instalación que normalmente no están sometidas a tensión y aquellas que tienen bajos niveles de voltaje que no representan ningún problema, deberán estar conectados al sistema de tierras.

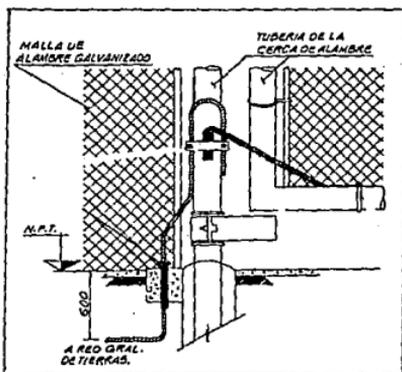
Dentro de las primeras se encuentran: las armaduras, tuberías, cercas metálicas, recipientes, tableros, gabinetes, charolas, ductos, tubos, carcazas, tubos metálicos de alumbrado, cubas de los transformadores, edificios, empuñaduras de los equipos, en general, todos los soportes metálicos de equipos y aparatos. Figuras num. 1.7

Para los segundos, los circuitos secundarios de los transformadores, las instalaciones de débil corriente (líneas telefónicas, telégrafos, teléfonos públicos, entre otros).

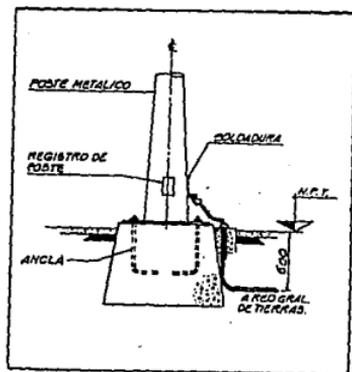
El tener un sistema de conducción de la corriente de falla y mantener un potencial casi cero en estructuras y partes metálicas no energizadas, se logra a través de los conductores, los cuales se seleccionan con la corriente mínima capaz de hacer funcionar el dispositivo de protección contra sobrecorriente, la duración de la falla para que se lleve a cabo su operación y la máxima temperatura que puede soportar el conductor antes de fundir el aislamiento o presentar averías en el mismo.



CONEXION A TIERRA DE TUBERIAS DE PROCESO EN MOCHETA



CONEXION A TIERRA DE CERCA DE ALAMBRE TIPO CICLON Y PUERTA METALICA.



CONEXION A TIERRA DE POSTE METALICO DE ALUMBRADO.

Figuras num.1.7.

En un sistema de Corriente Alterna (C.A.), el calibre del conductor del electrodo de tierra no debe ser menor al que se indica en la tabla núm.1.1. (1) para conductores de cobre. Si se trata de otro material, su resistencia eléctrica no debe ser mayor que la equivalente al conductor de cobre correspondiente.

SISTEMA DE CORRIENTE ALTERNA	
CALIBRE DE CONDUCTOR DEL ELECTRODO DE TIERRA	
Calibre del conductor más grande de la acometida ó su equivalencia para conductores en paralelo AWG ó MCM (Cobre)	Calibre del conductor del electrodo de tierra AWG ó MCM (Cobre)
2 ó menor	8
1/0	6
2/0 ó 3/0	4
4/0 a 350 MCM	2
400 a 600	1/0
600 a 1,100 MCM	2/0
Más de 1100 MCM	3/0

Tabla núm. 1.1

Para los sistemas de Corriente Directa (C.D.), el artículo 206.56 NTIE menciona la condición de instalación:

1) Normas Técnicas de Instalaciones Eléctricas (NTIE) art. 206.58 p.p. 59

Sistemas de corriente directa. Calibre del conductor de puesta a tierra.

El conductor de puesta a tierra para un sistema de abastecimiento de C.D., no debe ser más delgado que el conductor más grueso abastecido por el sistema, o su equivalente si no son del mismo material. En ningún caso el conductor de puesta a tierra debe ser más delgado que el calibre No. 8 AWG (8.37 mm²) de cobre.

1.5.3. Sistema de tierras para apartarrayos.

La protección contra descargas atmosféricas, es el proporcionar los medios adecuados para que la descarga pueda incidir con seguridad sobre una construcción y sea conducida en forma inofensiva hasta tierra, de manera que no origine daños durante su trayectoria.

Este sistema se emplea en subestaciones, aeropuertos, plantas industriales, edificios, chimeneas. Cuando la instalación sea interior se localizará fuera de pasillos, alejada de los equipos y zonas peligrosas para el personal.

El artículo 605.32 de las NTIE recomienda que; los apartarrayos deben conectarse a tierra lo más directamente posible, con un conductor de baja impedancia y alta conductividad eléctrica.

De un calibre no menor al más pequeño usado en la malla principal (2 AWG) el cual deberá de quedar conectado permanentemente a los circuitos que protegen al sistema, con el objeto de limitar las sobretensiones provocadas por las descargas atmosféricas o la operación de interruptores. Figura num. 1.8.

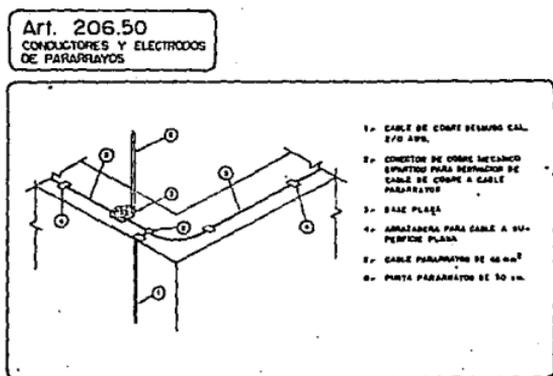


Figura num.1.8.

1.6. Materiales y componentes de un sistema de tierras.

Para que un sistema de tierras funcione correctamente, es necesario que los elementos que la constituyan, conductores, electrodos y conectores sean seleccionados adecuadamente de acuerdo a las características de la malla y del terreno.

1.6.1. Conductores.

Generalmente se utiliza el cable como un conductor. En el caso de conexiones de neutros y partes metálicas no energizadas puede emplearse el alambre.

El conductor a utilizar como material para los sistemas de tierra debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Ser eléctricamente continuo con una alta conductividad eléctrica.
- Tener alta capacidad eléctrica.
- Capacidad para soportar los efectos térmicos durante las condiciones de falla.
- Resistencia mecánica y robustez.
- Bajo índice de corrosión por efecto del terreno.

El conductor del electrodo de tierra y el conductor de puesta a tierra del equipo, deberán ser de cobre u otro material resistente a la corrosión, pudiendo ser sólido o trenzado, aislado o desnudo, de calibres adecuados, dependiendo el sistema que se utilice.

Se ha escogido el calibre mínimo de 2/0 AWG en conductores de cobre por razones mecánicas ya que eléctricamente, pueden usarse cables de cobre hasta calibres del 2 o 4 AWG.

La instalación de los conductores deberá protegerse si están expuestos a algún daño mecánico y deben de ser eléctricamente continuos, desde el punto de unión a las cubiertas de los equipos hasta el electrodo de puesta a tierra.

Por ningún motivo se deberá intercalar ningún interruptor automático, a menos que al abrirse éste desconecte todos los conductores de la fuente de alimentación.

En la tabla num 1.2, se muestran las características principales de los conductores desnudos de cobre.

1.6.2. Electrodo.

Los electrodos, también llamados dispersores o varillas de tierra, son generalmente de acero, acero galvanizado, acero inoxidable, copperweld o acero embebido en concreto. El material más empleado es el copperweld de 5/8 pulgadas con una longitud de 3.05 metros terminada en punta, sin revestimiento de pintura o barniz. Este material combina las ventajas del cobre con la alta resistencia del acero, tiene buena conductividad, excelente resistencia a la corrosión y resistencia mecánica suficiente para ser clavada en el terreno.

El uso de varillas sirve para que la malla esté en contacto con zonas más húmedas del subsuelo y obtener una menor resistividad eléctrica. Son especialmente importantes en terrenos desprotegidos de vegetación y cuya superficie al quedar expuesta a los rayos del sol está completamente seca.

ESPECIFICACIONES PARA ALAMBRES DE COBRE EN TEMPLES DURO, SEMIDURO Y SUAVE

CALIBRE	DIAMETRO NOMINAL	ANILAS DE LA SECCION TRANSVERSAL		PESO	D U R O			SEMI-DURO			S U A V E							
		MULTI	CIRCULAR		RESISTENCIA ELECTRICA 20 °C Y C. D. OHMS/KM	RUPTURA A LA TENSIÓN MNSA N°	RESISTENCIA ELECTRICA 20 °C Y C. D. OHMS/KM	RUPTURA A LA TENSIÓN MNSA N°	RESISTENCIA ELECTRICA 20 °C Y C. D. OHMS/KM	RUPTURA A LA TENSIÓN MNSA N°								
AWG	M.M.	mm ²	M.M. ²	kg / km														
4/0	11.684	0.4600	107.200	93.0	0.1652	2663.060	0.16487	3166.128	0.16090	2713.688	0.16090	2713.688	0.16090	2713.688	0.16090	2713.688	0.16090	2713.688
3/0	10.404	0.4096	86.000	75.0	0.20870	3048.099	0.20785	2570.551	0.20278	2152.332	0.20278	2152.332	0.20278	2152.332	0.20278	2152.332	0.20278	2152.332
2/0	9.298	0.3648	67.630	59.0	0.25317	2503.413	0.25182	2086.106	0.23568	1706.897	0.23568	1706.897	0.23568	1706.897	0.23568	1706.897	0.23568	1706.897
1/0	8.251	0.3246	53.460	47.0	0.33171	2048.911	0.33008	1671.978	0.32242	1353.542	0.32242	1353.542	0.32242	1353.542	0.32242	1353.542	0.32242	1353.542
1	7.348	0.2883	42.410	37.0	0.42792	1672.676	0.42622	1371.666	0.40651	1103.155	0.40651	1103.155	0.40651	1103.155	0.40651	1103.155	0.40651	1103.155
2	6.544	0.2578	33.630	29.0	0.53318	1362.160	0.53253	1111.320	0.51282	874.994	0.51282	874.994	0.51282	874.994	0.51282	874.994	0.51282	874.994
3	5.827	0.2284	26.670	23.1	0.67277	1106.330	0.66566	899.542	0.64635	694.006	0.64635	694.006	0.64635	694.006	0.64635	694.006	0.64635	694.006
4	5.189	0.2043	21.150	18.0	0.84781	863.592	0.84321	716.502	0.81532	550.216	0.81532	550.216	0.81532	550.216	0.81532	550.216	0.81532	550.216
5	4.671	0.1819	16.770	14.0	1.0968	721.677	1.0933	573.350	1.0278	436.317	1.0278	436.317	1.0278	436.317	1.0278	436.317	1.0278	436.317
6	4.115	0.1620	13.300	11.0	1.3478	560.806	1.3409	456.136	1.2963	346.051	1.2963	346.051	1.2963	346.051	1.2963	346.051	1.2963	346.051
7	3.665	0.1443	10.550	9.0	1.6926	467.206	1.6910	366.673	1.6345	274.425	1.6345	274.425	1.6345	274.425	1.6345	274.425	1.6345	274.425
8	3.284	0.1285	8.300	7.4	2.1438	374.673	2.1423	293.073	2.0811	217.637	2.0811	217.637	2.0811	217.637	2.0811	217.637	2.0811	217.637
9	2.945	0.1146	6.590	6.0	2.7085	297.426	2.7070	232.336	2.6453	172.926	2.6453	172.926	2.6453	172.926	2.6453	172.926	2.6453	172.926
10	2.645	0.1018	5.261	4.8	3.4265	240.645	3.4250	188.157	3.3772	139.436	3.3772	139.436	3.3772	139.436	3.3772	139.436	3.3772	139.436
11	2.385	0.9074	4.177	3.7	4.2981	191.827	4.2751	146.599	4.1340	112.846	4.1340	112.846	4.1340	112.846	4.1340	112.846	4.1340	112.846
12	2.083	0.8081	3.309	3.0	5.4022	152.863	5.3900	116.661	5.2102	89.566	5.2102	89.566	5.2102	89.566	5.2102	89.566	5.2102	89.566
13	1.828	0.7186	2.624	2.5	6.8343	121.666	6.7982	94.711	6.5718	71.033	6.5718	71.033	6.5718	71.033	6.5718	71.033	6.5718	71.033
14	1.678	0.6458	2.081	1.8	8.8158	96.844	8.732	75.598	8.2845	56.337	8.2845	56.337	8.2845	56.337	8.2845	56.337	8.2845	56.337
15	1.450	0.5870	1.650	1.5	10.8886	77.221	10.8108	60.328	10.4487	44.670	10.4487	44.670	10.4487	44.670	10.4487	44.670	10.4487	44.670
16	1.290	0.5062	1.306	1.2	13.7014	61.231	13.6362	46.172	13.1764	36.429	13.1764	36.429	13.1764	36.429	13.1764	36.429	13.1764	36.429
17	1.151	0.44538	1.038	1.0	17.2777	48.702	17.1891	36.424	16.5149	28.081	16.5149	28.081	16.5149	28.081	16.5149	28.081	16.5149	28.081
18	1.024	0.39630	0.8231	0.9	21.7666	36.708	21.6742	30.587	20.9491	22.300	20.9491	22.300	20.9491	22.300	20.9491	22.300	20.9491	22.300

TABLA NUM. 1. 2

En el caso de terrenos cuya constitución química del subsuelo no sea demasiado salina, se usan varillas de acero galvanizado. En subsuelos, cuyos componentes son más corrosivos, se utilizan las varillas tipo copperweld, las cuales son de Fe con recubrimiento de cobre soldado uniformemente.

Cuando las condiciones lo permitan, los dispersores se enterraran hasta sobrepasar el nivel de la humedad permanente, a una profundidad de 30 a 60 cm. bajo el nivel de piso. Cuando se encuentre un lecho de roca, puede enterrarse horizontalmente a la mayor profundidad que permita el mismo lecho de roca ²⁾.

1.6.2.1. Clasificación de los electrodos para el sistema de tierra.

Electrodos naturales.

Los constituyen principalmente las tuberías de agua, los revestimientos metálicos de pozos profundos y las estructuras metálicas con excepción de tuberías o tanques que contengan algún material combustible. Se recomienda que el usar este tipo de electrodos se complemente con un electrodo adicional.

²⁾ NTE art. 206.46.

Una tubería metálica subterránea para la conducción de agua fría puede usarse como electrodo de puesta a tierra, siempre y cuando esté en contacto directo con la tierra cuando menos 3 metros de longitud NTIE art. 206.46.

La tubería debe ser eléctricamente continua en su trayectoria hasta el punto de conexión con el conductor del electrodo de tierra. Si existen coples o secciones de tubos de material aislante, esta continuidad puede lograrse mediante puentes de unión

puentes de unión. Deben ser cobre u otro material resistente a la corrosión y deben ser de una sección tal que su capacidad de corriente no sea menor que la requerida para el conductor de puesta a tierra correspondiente.

Existen otros elementos metálicos que pueden ser utilizados como electrodos de tierra.

- Las estructuras metálicas de un edificio si está efectivamente puesta a tierra.
- Las varillas de refuerzo de acero ubicadas cerca del fondo de una cimentación de concreto que esté en contacto directo con la tierra. Es conveniente, para este fin, que las varillas sean de 13 mm. de diámetro como mínimo y de una longitud no menor de 6 metros. NTIE art. 206.46.

Electrodos artificiales.

Donde no se disponga de alguno de los electrodos descritos anteriormente, el electrodo de puesta a tierra puede estar constituido por una placa, barra o un tubo:

Electrodos de placa. Son utilizados en terrenos donde la profundidad de la tierra vegetal es por lo menos de 1 a 1.5 metros. Cada placa debe tener 2000 cm. 2 de superficie de contacto con la tierra, con un espesor mínimo de 6 mm. para cobre y 2 mm. si es de otro material. (3)

Electrodos de tubo. Deberán ser galvanizados, no menores de 19 mm. de diámetro exterior con una longitud de 2.40 metros. Son recomendados para terrenos húmedos. (3).

Electrodos de barra. Deberán de tener por lo menos 1.6 cm. de diámetro exterior y 1.27 cm. si es de otro material.(3)

Siempre que las condiciones del caso lo permitan, los electrodos deben de introducirse hasta sobrepasar el nivel de la humedad permanente. Los tubos o barras deben introducirse hasta una profundidad no menor de 2.40 metros, excepto cuando se encuentre un lecho de roca, en cuyo caso, se enterrará horizontalmente a la mayor profundidad que permita el lecho de roca.

3) NTIE, art. 208.4E, p.p. 55-57

Los electrodos deben ser preferentemente de una pieza y tener superficies metálicas bien limpias que estén libres de barniz o pintura.

La resistencia a tierra de los electrodos artificiales no debe ser superior a 25 ohms en las condiciones más desfavorables, cuando no se pueda lograr la resistencia con un sólo electrodo, deberá complementarse con otro adicional.

1.6.3. Conectores y accesorios.

Son aquellos elementos que sirven para unir una red de tierras, mantener un buen contacto con las superficies de los equipos, y de la misma forma unir otros conductores y varillas para formar el cuadrado de la malla.

Los conectores deberán de soportar la corriente de falla a la que pudiera estar sometido todo el sistema en forma continua.

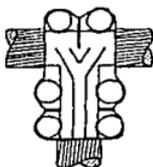
Estos conectores son principalmente:

Conectores mecánicos.

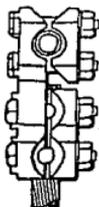
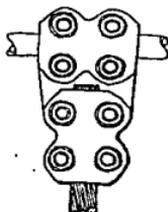
Están formados por dos piezas unidas por medio de tornillos, se caracterizan por la facilidad de instalación, debido a que pueden desconectarse de la red para poder hacer mediciones en la misma.

Son fabricados de bronce de alto contenido de cobre a una temperatura de 250 a 350 grados centígrados, el material de unión está fabricado en bronce al silicio. Como se muestran en las Figuras num. 1.10.

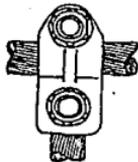
CONECTORES MECANICOS



CONECTOR EN "T"
PARA CABLE DE COBRE A CABLE DE COBRE
TIPO NT



CONECTOR EN "T"
PARA TUBO DE COBRE O ALUMINIO A CABLE
TIPO NNT-A



CONECTOR EN "T"
PARA CABLE DE COBRE A CABLE DE COBRE
TIPO QT

Conectores soldables.

Se ha incrementado el uso de los conectores soldables debido al ahorro de tiempo y costo que se obtiene al realizar las conexiones fuguras num. 1.11.

Una gran parte de los accidentes personales están relacionados con el contacto directo con partes o elementos metálicos no conductores de corriente. Por lo que es importante diseñar adecuadamente un sistema de tierras para una instalación eléctrica de una área con atmósfera peligrosa, así como en una normal.



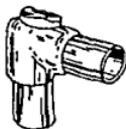
**LB CABLE HORIZ. A
ZAPATA O BARRA BUS.**



**SC EMPALME DE UN CABLE
A DOS O MAS CABLES**



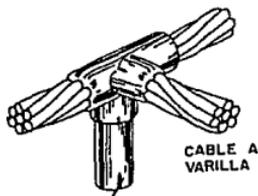
GM



FT
BUS DE TUBO DE COBRE
A VARILLA DE TIERRA

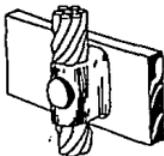


GT
EMPALME ENTRE GT
RECEPTACULO A VARILLA
Y CABLE

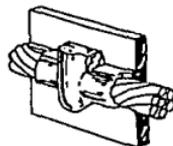


NT

CABLE A
VARILLA



VV
CABLE A ACERO
DESPEGADO A LA
SUPERFICIE



VG CABLE
A ACERO O
TUBO HORIZ. PEGADO
A LA SUPERFICIE

CAPITULO 2

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO

Los parámetros básicos para el diseño de una red de tierras, están determinados por las características naturales del suelo y la capacidad de circuito corto de la red eléctrica en el lugar de la instalación.

La resistividad del terreno es junto con la corriente de falla, los factores que más influyen en la determinación de las características de una red de tierras, por lo mismo, se hace indispensable conocer su valor y estructura, a través de mediciones de campo, procedimientos ó tablas estandarizadas.

Un cálculo preciso de la distribución de corrientes en el suelo durante una falla, es difícil de alcanzar, debido a las variaciones de la resistencia superficial a diferentes niveles, donde se pueden desarrollar elevados gradientes de potencial, que afecten extensas regiones de la superficie, creando una circulación de corriente latente, que en el momento de caminar por la superficie puede descargarse a través del cuerpo, al ofrecer menor resistencia que la propia malla.

Razón por la cual las características del terreno y la composición del suelo hasta una profundidad razonable, se considera homogénea.

2.1. Factores que afectan la resistividad del terreno.

La resistividad varía según la naturaleza del terreno. Especialmente en regiones en que las capas se han superpuesto unas a otras, presentándose una estratificación.

La resistencia se ve afectada directa o inversamente con algunos de los elementos del medio ambiente, el agua, la temperatura y la acumulación de sales minerales.

2.1.1. Efecto del contenido de humedad.

La cantidad de agua del terreno, es función directa de la composición del suelo, subsuelo, del nivel freático, de la temperatura y la época del año.

Una variación en el contenido de humedad hará más efectiva o no una conexión a tierra.

La tabla num. 2.1, muestra la variación que existe entre un terreno seco y uno húmedo, observando que la resistencia se comporta en forma inversa a la cantidad de agua contenida en el terreno.

Cuando este contenido se reduce por debajo del 22 % , la resistividad empieza a crecer bruscamente.

Si la cantidad de humedad es baja, se acostumbra usar varillas o electrodos verticales de suficiente longitud para llegar a las capas de mayor humedad, o instalar una malla de tierras a mayor profundidad, a efecto de que queden los conductores desnudos en contacto directo con tierra más humedad y obtener un valor de resistencia menor .

La grava o roca triturada colocada en la superficie ayuda a evitar la evaporación del agua, además su alta resistividad ayuda a reducir la magnitud de los choques eléctricos.

EFFECTOS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Campo de humedad en % de peso	Resistividad Ohms-Cm	
	TERRENO SUPERFICIAL 1000 X 10 ³	ÁREA COMPACTA 1000 X 10 ³
0		
2.5	250,000	150,000
5	165,000	43,000
10	53,000	22,000
15	21,000	13,000
20	12,000	10,000
30	10,000	8,000

Tabla num.2.1

2.1.2. Efecto de la humedad.

A medida que la temperatura desciende hasta 0 °C, la resistividad aumenta lentamente, por debajo de este punto tiende a crecer bruscamente. Por lo que es conveniente profundizar las tomas de tierra, hasta encontrar capas de terreno situadas en zonas susceptibles de congelación en las estaciones frías. Tabla num.2.2.

EFFECTOS DE LA TEMPERATURA

Temperatura		Resistividad Ohms-Cm
°C	°F	
20	68	7,200
10	50	9,900
0	32 (AGUA)	13,800
-5	23 (HELO)	79,000
-15	14	300,000

Tabla num. 2.2.

2.1. Efecto de las sales minerales.

En el suelo la conducción de corriente es gradualmente electrolítica. Por lo que la humedad y el contenido de sales afecta radicalmente el valor de la resistividad del suelo.

Cuando los electrodos de tierra no se pueden enterrar más, debido a la dureza del suelo, o por que son muy secos los lugares, un tratamiento químico en el terreno que rodea a la varilla, es un buen medio para bajar la resistencia del mismo.

Existen numerosas sustancias químicas para éste propósito, tales son. el cloruro de sodio, sulfato de cobre, sulfato de magnesio, carbonato de sodio, entre otras. Dentro de estos tratamientos, el más usado es el cloruro de sodio, el cual reacciona con el agua haciéndola mejor conductora.

Una de las ventajas de mezclar sustancias químicas en el terreno, es la reducción de la variación de la resistencia del suelo, que se presenta por cambio de estaciones, temporadas de sequía y humedad, las cuales son aplicadas generalmente en una trinchera circular alrededor de la varilla de tierra, de tal forma que se prevé un contacto directo entre la varilla y el terreno que la rodea.

La aplicación de un tratamiento químico, no es una forma permanente de mejorar la resistividad del terreno, debido a que los productos son generalmente lavados por el agua de lluvia y el drenaje natural a través del suelo, dependiendo de la porosidad del suelo y la cantidad de agua contenida. Por lo que se tiene que reemplazar en el momento en que la resistividad empiece aumentar.

EFFECTOS EL CONTENIDO DE HUMEDAD

Adición de sal en % por peso de humedad	Resistividad Ohms-Cm
0.0	10,700
0.1	1,800
1.0	460
5.0	190
10.0	130
20.0	100

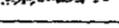
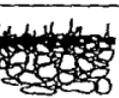
Tabla num. 2.3.

2.2. Métodos de medición de la resistividad en el terreno.

Una manera práctica de obtener la resistividad del terreno, es mediante el uso de tablas que nos proporcionan valores aproximados de resistencia de los diversos tipos de suelos. Tabla num.2.4.

Una segunda, es mediante mediciones de campo directas. Las cuales se efectúan en varios sitios del predio de la instalación. Para tal efecto se hace necesario pasar corriente a través del él, insertando electrodos en el suelo para lograr la circulación de corriente, el método para este fin es el de los 4 puntos.

TABLA NUM. 2.4

Resistividad ohmímetro	Tipo de terreno	Ejemplo
10 a 100	Terreno orgánico húmedo	
100 a 200	Terreno orgánico, pero no húmedo	
400 a 800	Terreno gélido	
1000 o más	Terreno rocoso	

Una segunda, es por medio de mediciones de campo. Las que se efectúan en diferentes sitios del predio de la instalación. Para tal efecto se hace necesario pasar corriente a través de él, insertando electrodos en el suelo para lograr la circulación de corriente.

Las mediciones deben incluir datos sobre temperatura, humedad, profundidad de medición y concentración de sales. En ocasiones cuando la resistividad es alta, existe la necesidad de desplazar los sistemas de tierra hasta encontrar terrenos adecuados, en proximidades de zonas regables (jardines) o, adecuar una canalización que permita regar el sistema de tierras en épocas de sequía.

Se recomienda que se cuadricule la zona en donde se desea medir, tomándose lecturas en las intersecciones de la cuadrícula.

Si la zona de medición es para una futura subestación, las líneas podrán ser a cada 5 metros . Si la zona de medición es para un edificio de proceso, las líneas podrán ser a 30 metros (Procedimiento de diseño ETP-002 B.1.)

En lo posible debe evitarse, la instalación de tomas de tierra en áreas corrosivas (basura, escoria, residuos industriales). En tales condiciones, o en caso de tierra salada, es conveniente emplear varilla en lugar de cable, enfundándola en un tubo de plástico.

La tabla num. 2.5, contiene los valores de resistividad para diferentes tipos de terreno - (tomada Getting Down to Earth Biddle Instruments, IEEE-80).

Tipo de Suelo	Resistividad ohm / cm (Rango)
Suelo superficial maleable	100 -5 000
Arcilla	200 -10 000
Arena y grava	5000 -100 000
Piedra caliza superficial	10 000 - 1 000 000
Piedra caliza	500 - 400 000
Pizarro	500 - 10 000
Arenisca	2 000 - 200 000
Granito, basalto	100 000

Tabla num. 2.5.

En sitios pavimentados, el conductor no debe de quedar aprisionado o embebido en el pavimento, dejando alrededor de la toma un espacio sin pavimentar que se rellenará con una capa de tierra, encima carbón, una capa de grava y arena, de esta forma se facilitará la penetración de agua de lluvia.

2.3. Técnicas de medición.

La resistividad del suelo para una red de tierras generalmente se determina recopilando datos de campo en el sitio en cuestión. Ya que existen variaciones tanto horizontal como verticalmente en la composición de un suelo, siendo conveniente realizar las pruebas de campo en varios lugares del terreno.

Se cuenta con tres métodos para la medición de la resistencia.

2.3.1. Método de los cuatro puntos o método de Wenner.

El método más usado para medir la resistividad promedio del terreno, es el de los cuatro puntos, basado en la teoría de Frank Wenner.

Consiste en utilizar 4 electrodos, o varillas de tierra, de 15.9 mm de diámetro, con una longitud de 75 mm a 1000 mm, enterrados a una misma profundidad, en línea recta con una separación uniforme entre ellas, los electrodos deberán conectarse al aparato por medio de cables de cobre con aislamiento para 600 volts calibre 14 AWG o mayor. Las terminales de corriente del instrumento C_1 y C_2 se conectan a través de los cables a las varillas de los extremos, las de potencial P_1 y P_2 a las varillas intermedias. Figura.num. 2.1.

Se energiza el instrumento y se toman las lecturas de resistencia en ohms.

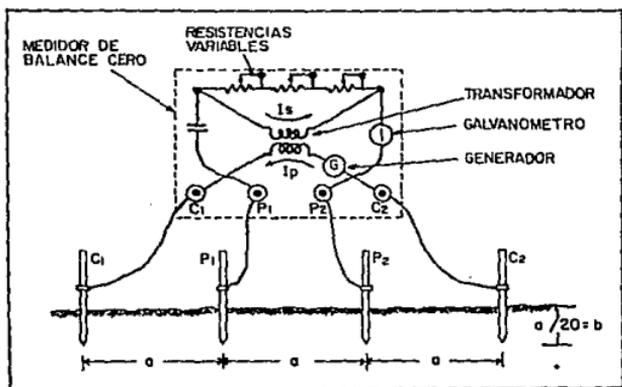


Figura num. 2.1.

Existen dos variaciones en este método.

a. Arreglo Wenner. Electrodo igualmente espaciados

Se calcula la resistividad mediante la fórmula :

$$\rho = 2\pi a r$$

donde:

r = resistencia medida en ohms.

a = separación entre electrodos en metros.

ρ = resistividad del suelo ohms-metro.

La fórmula anterior, es válida solamente si la distancia entre electrodos a es mayor que la profundidad b a la que se entierran las varillas.

En el caso que $a = b$ se debe usar la fórmula general:

$$\rho = \frac{4 \pi a}{n}$$

Con este arreglo los electrodos están espaciados como se muestra en la, Figura num. 2.2.

donde n tiene un valor entre 1 y 2 dependiendo de la relación b/a

Si :

$b = a$	$n = 1.187$
$b = 2a$	$n = 1.038$
$b = 4a$	$n = 1.002$

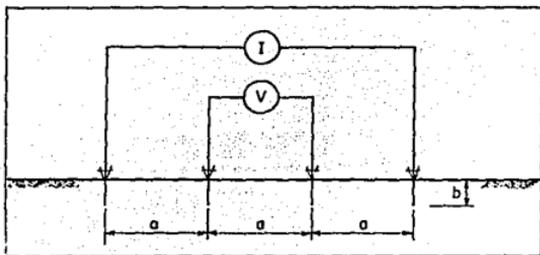


Figura 2.2.

Para $b \leq a$ se obtiene una resistencia promedio conocida como resistencia aparente. Sin embargo, los electrodos pueden intercambiarse sin alterar el resultado de la resistividad que se va a medir. Con la base anterior Carpenter sugiere tres configuraciones alternativas para las mediciones:

Configuración de electrodos	Expresión de resistividad
$C_1P_2P_1C_2$	$\rho_1 = 2\pi a R_1$
$P_2C_1C_2P_1$	$\rho_1 = 2\pi a R_1$
$C_1C_2P_1P_2$	$\rho_2 = 6\pi a R_2$
$P_1P_2C_1C_2$	$\rho_2 = 6\pi a R_2$
$C_2P_2C_1P_2$	$\rho_3 = 3\pi a R_3$
$P_2C_2P_1C_1$	$\rho_3 = 3\pi a R_3$

b. Arreglo Schulumberger - Palmer. Electrodo no igualmente espaciados.

Para medir la resistividad con espaciamiento grande entre los electrodos de corriente, se usa el arreglo mostrado en la figura num. 2.3.

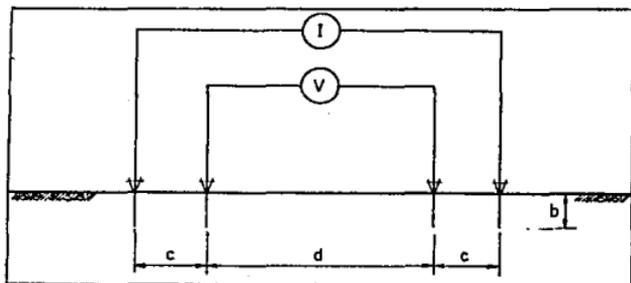


Figura num. 2.3.

Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca posible de los correspondientes electrodos de corriente, incrementando el potencial medido.

Una modificación del método de Wenner es la separación entre electrodos centrales o de la potencial localizados lo más cerca posible de los electrodos de corriente haciendo que se incremente el potencial medido. Si la profundidad "b" del electrodo es pequeña respecto a "d" y "c", entonces la resistividad aparente puede calcularse como:

$$\rho = \frac{\pi c (c + d) r}{d}$$

Con valores grandes de $\frac{d}{2c + d}$ las variaciones de resistividades medidas debidas a irregularidades en la superficie son reducidas a un mínimo, dando mediciones más precisas.

La fórmula empleada en este caso puede determinarse, si la profundidad "b" de los electrodos es pequeña comparada con la separación entre los a. Se recomienda una relación de $a = 20 b$ a una profundidad de 15 cm con una separación de 3 m (valores tomados del procedimiento B.I.ETP-002).

Con el fin de evitar el traslape de las áreas de influencia entre los tres electrodos dando como resultado una zona de estabilidad con poca resistencia.

2.3.2 Método de tres puntos o caída de potencial

El diagrama de conexión para este método se muestra en la figura 2.4.:

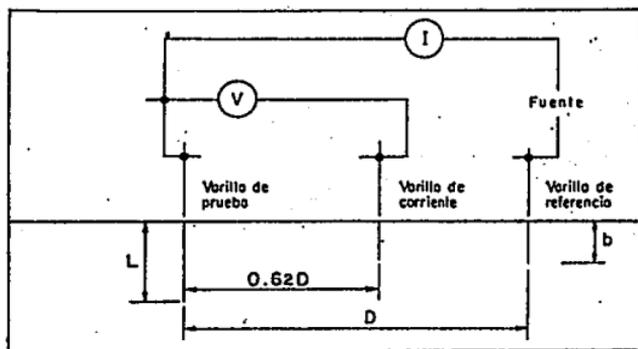


Figura num. 2.4.

La profundidad de L de la varilla de prueba localizada en el terreno es variable.

Las otras dos varillas conocidas como auxiliares o de referencia se entierran a poca profundidad " b ", espaciadas sobre una línea recta sobre la varilla de potencial localizada al 62. % de la distancia entre el electrodo de corriente y la de prueba.

Para minimizar la interferencia entre electrodos, la varilla de corriente deberá localizarse al menos a una distancia $5 L$ max alejada de la varilla de prueba (4).

Estas especificaciones para la localización de las varillas de referencia están basadas en la suposición de un suelo uniforme, donde la resistencia será calculada por:

4) Measurements of the Resistance of Physically and Large Earth Electrode System, IEEE Vol., 17 Num. 11

$$r = \frac{\rho}{2 \pi L} \left[\ln \frac{2.943 L}{d} \right]$$

Para la longitud L de la varilla, la resistencia r medida determina el valor de resistividad aparente, el cual cuando se grafica contra L es de gran ayuda para determinar las variaciones de la resistencia del terreno con la profundidad.

2.3.3 Método de la Pendiente.

En el caso de grandes redes de tierras, se utiliza el método de la "pendiente"; donde para valores obtenidos a diferentes distancias se calcula la pendiente de la curva resultante, por medio de la expresión:

$$u = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$$

El electrodo de referencia se instala en un extremo de la malla, de preferencia en una varilla de registro, mientras que el electrodo de potencial deberá instalarse a 0.2, 0.4 y 0.6 de la distancia del electrodo de corriente para obtener los valores R_1 , R_2 y R_3 .

CAPITULO 3

PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS

El presente capítulo está enfocado a establecer un ordenamiento básico de parámetros necesarios para el diseño de un sistema de tierras seguro para el personal y el equipo.

Se plantea la siguiente estructura de diseño.

ESTRUCTURA DE DISEÑO

3.1. Datos de entrada.

Datos necesarios para el diseño de una malla para el sistema de tierras.

Corriente de falla monofásica.

Resistividad del terreno.

Resistividad superficial.

Tiempo de duración de la falla.

Temperatura ambiente.

Longitud de la subestación.

Ancho de la subestación.

Profundidad de la red.

Tipo de conexión : soldable ó mecánica.

Longitud de varilla.

Diámetro de varilla.

Crecimiento futuro en el sistema eléctrico

3.2. Determinación de la corriente máxima de falla a tierra.

El valor de la corriente máxima de falla I_G se define como: el valor máximo de la corriente de circuito corto asimétrico que fluye entre la malla y el terreno que la rodea después de que se presenta la falla.

Para determinar la corriente I_G se necesita:

- a. Conocer el valor de la corriente de circuito corto, (I_{cc}).
- b. Afectarle por un factor de decremento D_f , (tomados de IEEE-80 pp. 14.9.4.) Tabla num. 3.1.
- c. Aplicarle cuando sea necesario, una corrección por crecimientos futuros en el sistema eléctrico (C_p). En caso de que no existieran incrementos se tomará el valor de $C_p = 1$.

FACTOR DE DECREMENTO

DURACIÓN DEL CHOQUE Y FALLA	FACTOR DE D_f			
	Segundos	Ciclos	X / R = 10	X / R = 20
0.008	1 / 2	1.578	1.648	1.675
0.1	6	1.125	1.232	1.378
0.25	15	1.100	1.200	1.310
0.5 ó más	30 ó más	1.028	1.052	1.077

Tabla num. 3.1.

Tomando en consideración los factores anteriores se obtiene la máxima corriente de falla de la ecuación 54 de IEEE STD 80 p.p 91.

$$I_g = I_{cc} \cdot C_P \cdot D_f \quad [\text{amperes}] \quad (1)$$

3.3. Cálculo del calibre del conductor.

Todos los elementos que componen un sistema de tierras, deben ser capaces de soportar la máxima corriente de corto sin que se fundan, ó deterioren. Por lo que el calibre del conductor se calculará a partir de la ecuación (2) o aplicando los factores, para la obtención de la corriente en circular mils

a. Por ecuación.

Para calcular el calibre del conductor de tierras adecuado se utiliza la fórmula de Sverak No. 33 de la Norma ANSI/IEEE STD 80-1986.

$$A = I_g \sqrt{\frac{T_g \alpha r p r (10^6)}{TCAP \cdot \ln \left[1 + \frac{T_m - T_a}{K_o + T_a} \right]}} \quad [\text{mm}^2] \quad (2)$$

Una vez determinada la sección transversal, se selecciona el calibre del conductor, consultando la tabla num 3.2.

b. Por factores.

La tabla num. 3.3., proporciona los factores que se aplican para la obtención de la máxima corriente de falla aproximada en circular mills, sin la utilización de la ecuación (2), siempre y cuando se cumplan las condiciones.

$T_a = 40\text{ }^\circ\text{C}$

$T_m = 1083\text{ }^\circ\text{C}$, punto de fusión del cobre

$T_m = 450\text{ }^\circ\text{C}$, para conectores soldables

$T_m = 250\text{ }^\circ\text{C}$, para conectores mecánicos.

Calibre y diámetro de conductores

CABLE		DIÁMETRO CONDUCTOR	
CIRCULAR MILLS	A.W.G.	Pulgadas	Milímetros
1,000,000		1.152	29.26
800,000		1.031	26.18
750,000		.968	25.35
700,000		.954	24.48
600,000		.863	22.08
500,000		.813	20.65
400,000		.728	18.49
350,000		.661	17.29
300,000		.630	16.00
250,000		.575	14.60
211,800	4/0	.528	13.41
187,800	3/0	.470	11.93
133,100	2/0	.419	10.64
105,500	1/0	.373	9.47
83,660	1	.332	8.43
66,370	2	.292	7.41
52,030	3	.260	6.60
41,740	4	.232	5.89
26,240	6	.184	4.67
16,510	8	.146	3.70
10,380	10	.116	2.94
6,530	12	.0915	2.32
4,110	14	.0726	1.84

Tabla num. 3.3

TAMAÑO MÍNIMO DE CONDUCTOR (CIRCULAR MILS / A)						
TIEMPO DE FALLA	100 % Cu	97 % Cu	40 % CCS	30 % CCS	97 % Cu / (450 °C)	Temperatura Límite (250 °C)
30.0	38.4	38.7	67.0	66.8	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	6.0	7.4	8.5	6.6	8.3

Tabla num. 3.3

CONSTANTES DE MATERIALES

DESCRIPCIÓN	% CONDUCTIVIDAD DEL MATERIAL	$\frac{(\rho_r)}{(\rho_c)}$ FACTOR a 28 °C	K (1 / ap) a 0 °C	TEMPERATURA FUSIÓN °C	$\frac{(\rho_c)}{(\rho_r)}$ a 28 °C (pH / cm)	VALOR EFECTIVO DE VALOR YCAP 31 sup 1 °C
ESTANDAR CABLE DE COBRE BRUVE	100.0	0.00393	234	1063	1.7241	3.422
CABLE DE COBRE DURO	97.0	0.00381	242	1064	1.7774	3.422
CABLE DE COBRE CON ALMA DE ACERO	40.0	0.00378	245	1064 / 1300	4.397	3.846
CABLE DE COBRE CON ALMA DE ACERO	30.0	0.00378	245	1064 / 1300	6.802	3.846
CABLE COMERCIAL DE ALUMINIO	61.0	0.00403	228	657	2.882	2.556
CABLE DE ALUMINIO CON ALEACION 3005	54.5	0.00353	263	690	3.2228	2.598
CABLE DE ALUMINIO CON ALEACION 6201	52.5	0.00347	268	660	3.284	2.598
CABLE DE ALUMINIO CON ALMA DE ACERO	20.3	0.00390	258	860 / 1300	8.4806	2.670
CABLE DE ACERO GALVANIZADO	8.5	0.00320	263	419 / 1300	20.1	3.831
ACERO INOXIDABLE 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

Tabla num. 3.4

3.4. Diseño preliminar del sistema de tierras.

El diseño preliminar del sistema de tierras se elabora a partir de plantear un cuadrículado de malla colocando el cable calculado en la sección 3.3. Con espaciamientos razonables en ambos sentidos a lo largo de las estructuras, tuberías, bardas, tanques, escaleras de acceso, procurando que el área de la malla sea lo más extensa posible para tener el mayor espacio protegido. El cable deberá ser continuo y bordear el perímetro de la malla, para evitar concentraciones de corriente en sus extremos.

En cada cruce de conductores, deben unirse rígidamente entre sí y en los puntos adecuados conectarse a electrodos de tierra (varillas) Donde sea posible, se recomienda construir registros en los mismos puntos, para medición de la resistencia de la red.

3.4.1. Longitud mínima requerida para la red.

El diseño preliminar debe ajustarse de tal manera que la longitud total de los conductores enterrados, incluyendo las varillas, sea cuando menos igual a la longitud mínima requerida para que la red sea segura, calculada con la ecuación (4).

Que se obtiene, igualando el valor del potencial de malla con el valor de potencial de contacto tolerable para el ser humano.

$$E_{\text{malla}} = K_m K_{ip} \frac{I_G}{L_M} \quad (3)$$

Despejándose L de la ecuación 3, se obtiene la longitud aproximada del conductor enterrado requerido para mantener el potencial de malla dentro de los límites de seguridad.

Para obtener el valor de kh se utiliza la siguiente expresión:

$$kh = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

Para mallas rectangulares con conductores en ambas direcciones igualmente espaciados (retícula cuadrada), el valor de n para determinar los factores K_m y k_i , se saca la media geométrica del número de conductores en ambas direcciones:

$$n = \sqrt{n_A n_B}$$

Si no se tiene malla cuadrada, el valor de n para determinar los factores k_s y k_i será el máximo n_A, n_B

Una vez determinada la cantidad de conductores paralelos, como perpendiculares de acuerdo al arreglo físico de los elementos, se procede a calcular la longitud total de la malla preliminar.

Para mallas con varillas, la longitud se obtiene con la ecuación :

$$L_M = L_C + 1.15 L_{VA} \quad (6)$$

siendo :

L_C es la longitud de los conductores paralelos como verticales.

L_V es la longitud de las varillas. Para lo cual se tiene que calcular primero el número de varillas que componen la red para después calcular la longitud del conductor que se conecta a la varilla.

3.4.2. Cálculo del número de varillas en la red.

El número total de varillas de 3 metros de longitud (L_v) y diámetro (d) se obtiene del cociente entre la resistencia malla y la resistencia de la varilla normal a partir de la ecuación:

$$\text{num. de varillas} = \frac{R_v}{R_m} \quad (7)$$

Cálculo de la resistencia de la varilla.

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L_v A} \log \frac{4L_v A}{d}$$

donde:

R_m es la resistencia de malla, valor que fluctúa entre 1 ohms a 10 ohms (NTIE artículo 603.2)

R_v es la resistencia de las varillas de tierra.

3.4.3. Resistencia de la red

La resistencia del sistema de tierras se calcula con el modelo matemático recomendado por IEEE STD 80.

$$R = \frac{\rho_s}{4r} + \frac{\rho_s}{L_M} \quad (8)$$

Cálculo del radio. $r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$

3.5. Comprobación de la seguridad de la red.

La seguridad se comprueba comparando los valores de potencial en la malla contra los potenciales tolerables para el cuerpo.

3.5.1. Potencial de paso para el hombre.

Se define al potencial de paso (E_p), como la diferencia que resulta entre la superficie del terreno y los pies separados un metro de una persona, en el momento que se presenta un flujo de corriente de falla hacia la malla del sistema de tierras.

Se ha determinado, que la resistencia de los dos pies en serie es aproximadamente de $6 \rho_s$ ohms. y, la resistencia para cada pie se supone de $3 \rho_s$ R_f , mientras que para el cuerpo es de 1000 ohms R_k , dando como resultado la ecuación No. 9.

La figura num. 3.1 muestra el circuito equivalente de la diferencia de potencial entre los pies y el terreno, llegándose a establecer la siguiente ecuación:

$$E_p = (R_k + 2R_f) I_k \quad ; k^2 t = 0.0135$$

sustituyendo valores

$$E_p = (1000 + 6\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

Reduciendo términos:

$$E_p = \frac{116 + 0.7\rho s}{\sqrt{t}}$$

[volts] (10)

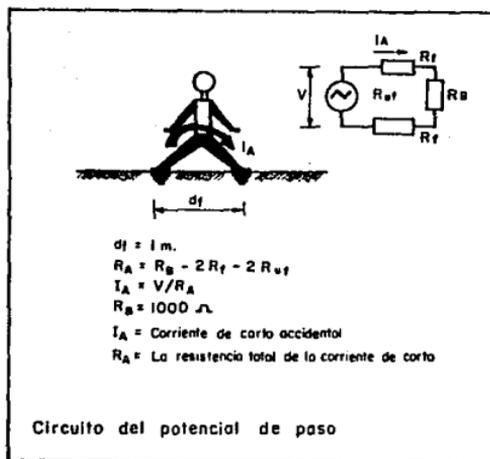


Figura num. 3.1.

3.5.2. Potencial de contacto para el hombre.

Se presenta, cuando aparece una diferencia de potencial entre la mano y los pies de una persona, en el momento que está tocando un objeto ó equipo aterrizado, cuando circula la corriente de corto en la malla .

La magnitud del potencial de contacto depende del espacio entre el terreno y el objeto aterrizado.

La figura num.3.2., muestra el circuito equivalente de la diferencia de potencial para un "contacto" entre la mano y los dos pies.

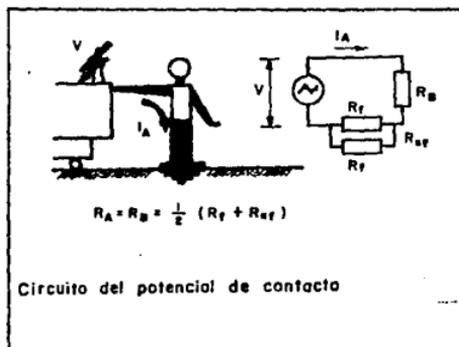
Del circuito equivalente tenemos:

$$E_C = (Rk + \frac{Rf}{2}) I_k$$

Substituyendo valores:

$$E_C = (1000 + 1.5 \text{ ps}) \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad \text{[volts]}$$

Figura num. 3.2.



Sustituyendo los valores se obtiene

$$E_c = \frac{116 + 0.17\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (11)$$

Como norma se ha tomado como valor máximo de tensión 1.2 seg. a 50 volts que puede soportar el cuerpo humano.

3.5.3. Potencial de transferencia

El potencial de transferencia se considera como un caso especial de potencial de contacto.

Se presenta cuando una persona se encuentra parada dentro del área de una planta y toca un conductor aterrizado en un punto remoto; o una persona parada en un punto remoto toca un conductor conectado a tierra en la planta. La tensión de choque eléctrico puede ser esencialmente igual a la elevación total de potencial de la malta de tierra y no la fracción de este total considerado en los potenciales de paso y contacto.

Las tensiones de transferencia son más difíciles de limitar y generalmente se requiere aislar las partes a tratar en forma especial.

Se escogen generalmente las tensiones de contacto de las estructuras conectadas a tierra al centro de un rectángulo de la malta, en lugar de las tensiones de contacto a una distancia horizontal de un metro del cable malta, ya que existen muchas posibilidades de que el objeto tocado a distancias superiores a un metro, este conectado directa o indirectamente a la malta.

Máximo potencial de la red.

Al potencial máximo en la malla se le conoce como el aumento de potencial sobre un punto remoto de la tierra.

Se obtiene multiplicando el valor de la resistencia (R) por la corriente máxima de falla. Ecuación (12)

$$E_{max} = R I_G \quad (12)$$

3.5.4. Potencial de contacto de malla.

La diferencia de potencial entre el conductor y la superficie del terreno en el centro del rectángulo de la malla.

Se obtiene de la ecuación :

$$E_{CM} = \rho K_m K_i \frac{I_G}{L_M} \quad (13)$$

3.5.5. Potencial de paso en la malla.

Una ecuación más exacta, para el cálculo de los potenciales de paso fuera de la malla es: el producto del factor geométrico k_s , el factor de corrección k_i la resistencia del terreno ρ y la densidad de corriente promedio por unidad de conductor enterrado I_G / L .

Donde las tensiones de paso y contacto están consideradas a una distancia horizontal de 1 metro del conductor principal de la malla.

Cálculo del factor K_s

Para una profundidad de $0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$.

$$E_{PM} = \rho K_s K_i \frac{I_G}{L_M}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{\pi^2/22}) \right] \quad (14)$$

Limitaciones en el empleo de las ecuaciones.

Cuando se emplen las ecuaciones anteriores, se recomiendan los siguientes límites para malla cuadrada o para malla rectangular que tengan el mismo número de conductores en ambas direcciones

$$h < 25$$

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

$$d < 0.25 h$$

EJEMPLO DE CÁLCULO DE UN SISTEMA DE TIERRA

Datos de entrada.

Corriente de falla monofásica	$I_{cc} = 6600 \text{ A}$
Resistividad del terreno	$\rho = 200 \Omega \text{ m}$
Resistividad superficial (grava en la superficie)	$\rho_s = 3000 \Omega \text{ m}$
Inverso del coeficiente térmico	$K_o = 242$
Tiempo de duración de la falla	$T_f = 0.5 \text{ seg. (30 ciclos)}$
Factor de capacidad térmica	$TCAP = 3.422$
Temperatura ambiente	$T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
Coficiente térmico	$p_r = 1.7774$
Longitud de la subestación	53 m
Ancho de la subestación	40 m
Relación de X / R en el bus de falla	10
Conexión tipo soldable de cobre al 97 % de conductividad	$T_m = 1084 \text{ }^\circ\text{C}$
Longitud de varilla	$L_{VA} = 3.05 \text{ m}$
Diámetro de varilla	$d = 0.0150 \text{ m.}$
Crecimiento futuro en el sistema eléctrico	25 %

Determinación de la corriente máxima de falla a tierra.

Ajustaremos la corriente de falla (I_{cc}) por los factores de crecimiento y decremento del sistema.

$C_p = 1.25$; La planta tendrá un 25 % de ampliación del sistema eléctrico:

$D_f = 1.026$ (valor tomado de la tabla 3.1 con $X / R = 10$ y con tiempo de falla de 0.5 seg.)

Utilizando la ecuación (1) se calcula el valor máximo de la corriente de falla

$$I_G = (1.25)(1.026)(6600) \quad \text{[amperes]}$$

$$I_G = 8464.50 \quad \text{[amperes]}$$

Cálculo del calibre del conductor.

El calibre del conductor se calcula con la ecuación (2) o aplicando los factores de la tabla num. 3.4. para el tamaño mínimo del conductor.

Por:

a. fórmula

$$A = IG \sqrt{\frac{Tfarp r(10^4)}{TCAP}} \sqrt{\frac{1}{\ln\left[1 + \frac{Tm - Ta}{Ko + Ta}\right]}} \quad [\text{mm}^2]$$

Sustituyendo valores

$$A = 8464.5 \sqrt{\frac{0.5(0.00381)(1.7774)10^4}{3.422}} \sqrt{\frac{1}{\ln\left[1 + \frac{1084 - 40}{242 + 40}\right]}} \quad [\text{mm}^2]$$

$$A = \frac{8464.5(2.528)}{1000} \quad [\text{mm}^2]$$

$$A = 21.398 \quad [\text{mm}^2]$$

Con esta área y en base a la tabla num. 3.2., se selecciona un calibre del conductor 2 AWG.

b. Por factores.

Utilizando los factores de la tabla num.3.3. se calcula el valor de I_G en circular mil:

$$I_G = 6600 \times 6.6 = 43560 \quad [\text{CM}]$$

Consultando la tabla num. 3.2. se tiene un calibre 2 AWG. Pero en base al artículo 603.2 de las NTIE -81, recomienda que los conductores de la malla sean de cobre, con un calibre mínimo de 4/0 AWG, y que los conductores de puesta a tierra del equipo no sean de un calibre menor al 2 AWG.

Diseño preliminar del sistema de tierra.

De acuerdo a la distribución del equipo, se planteará una malla de 21 conductores paralelos con 26 conductores perpendiculares

Longitud mínima requerida para la red.

La longitud mínima requerida, se calcula con la ecuación (4), la cual debe ser menor a la longitud total de la malla calculada a partir del número de conductores paralelos y perpendiculares más la longitud de las varillas.

a. Cálculo de la longitud mínima requerida partir de ecuación (4).

$$L = \frac{K_m K_i \rho \sqrt{I_G t}}{116 + 0.17 \rho_s} \quad [\text{m}]$$

$$L = \frac{K_m K_i \rho_{lG} \sqrt{l}}{116 + 0.17 R_s} \quad [m] \quad (4)$$

K_i , es un factor que toma en cuenta el flujo de corriente no uniforme en la red.

$K_i = 0.65 + 0.172n$ Siendo "n" la cantidad de conductores en paralelo en una dirección, excluyendo la cantidad de conductores que lo crucen.

K_m , se inclina por el efecto del número de conductores en paralelo de la red, el espaciamiento de los mismos (D), el diámetro de los conductores y la profundidad de enterramiento, (h).

Cálculo de K_m :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D-2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{Kh} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (5)$$

Para el valor de K_{ii} se tienen dos casos:

Caso 1. $K_{ii} = 1/(2n)^{2n}$, para mallas sin varillas de tierra o sólo alguna localizada en las esquinas del perímetro de la malla.

Caso 2. $K_{ii} = 1$, para varillas de tierra a lo largo del perímetro y en las esquinas.

Cálculo de Km de la ecuación (5).

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

$$K_{ii} = 1$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{0.6}{1}} = 1.2649$$

$$n = \sqrt{(21)(26)} = 23.36$$

$$D = 2.105$$

$$d = 0.015$$

Sustituyendo valores para encontrar Km:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\text{Ln} \left(\frac{(2.105)^2}{16(0.6)(0.015)} + \frac{(2.105 - (2(0.6)))^2}{8(2)(0.015)} - \frac{0.6}{4(0.015)} \right) + \frac{1}{1.2649} \text{Ln} \frac{8}{\pi(2(23.36)-1)} \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\text{Ln} (30.771 + 43.2423 - 10) \right] - 2.2632$$

$$K_m = \frac{1.127}{2\pi}$$

$$K_m = 0.2022$$

Calculo de Ki:

De la ecuación (6) se sustituye el valor de n

$$K_i = 0.656 + 0.172 (23.36)$$

$$K_i = 4.67$$

Sustituyendo los valores para encontrar la longitud mínima requerida :

$$L = \frac{0.2022(4.67)(200)(8464)(\sqrt{.5})}{116 + 0.17 (3000)} \quad [m]$$

$$L = \frac{1130353.64}{626} \quad [m]$$

$$L = 1805.67 \quad [m]$$

Para mallas con varillas, la longitud total de malla se calcula sumando la longitud de conductores horizontales, verticales y la longitud del conductor en la varilla.

$$L = L_c + 1.15 L_{VA}$$

Para L_c :

Conductores horizontales	21 (53) =	1113	[m]
Conductores verticales	26 (40) =	1040	[m]
	suma =	2153	[m]

El cálculo de la longitud de varillas se obtendrá de la siguiente manera:

Se calculará primero la cantidad necesaria de electrodos o varillas con la fórmula:

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L_v} \log \frac{4L_v}{d}$$

$$R_v = \frac{200}{2\pi(3.05)} \log \frac{4(3.05)}{0.015}$$

$$R_v = 10.43 \log 813.33$$

$$R_v = 30.35 \quad [m]$$

Sustituyendo valores en la ecuación (10):

$$\text{Num de varillas} = \frac{R_v}{R_m}$$

El valor de la resistencia de malla (R_m). en su gran mayoría es dado por el cliente . Para este ejemplo utilizaremos un valor 1.5 ohms.

$$\text{Num de varillas} = \frac{30.35}{1.50} = 20$$

El valor de L_v :

$$L_v = 1.15 (20 (3.05)) \quad [m]$$

$$L_v = 70.15$$

Sustituyendo valores, se obtiene la longitud

$$L_M = 2153 + 70.15 \quad [m]$$

$$L_M = 2223.15 \quad [m]$$

Comparando los valores de longitud mínima requerida L contra la total de la malla L_M .

$$L < L_M$$

$$1805.67 < 2223.15$$

Cumpléndose que la malla es capaz de disipar la corriente de falla a través del conductor, dentro de los límites tolerables del ser humano.

Resistencia de la red.

Utilizando el modelo matemático recomendado por la IEEE STD 80 pag. 23.

$$R = \frac{\rho_S + \rho_S}{4 r L_M}$$

Área cubierta por la malla

$$A = 53 (40) \quad [m^2]$$

$$A = 2120 \quad [m^2]$$

Si el radio se obtiene

$$r = \frac{A}{\pi};$$

$$r = \sqrt{\frac{2120}{\pi}}$$

$$r = 25.977 \quad [m]$$

Sustituyendo valores se obtiene la resistencia de la red

$$R = \frac{200}{4(25.977)} + \frac{200}{2223.15}$$

$$R = 2.014 \quad [\text{ohms}]$$

$$2 \text{ ohms} < 10 \quad [\text{ohms}]$$

La resistencia está dentro de los límites normalizados de las NTIE en su artículo 603.2 inciso c.

Comprobación de la seguridad de la red.

La seguridad de la red se obtiene comparando los valores de potencial de malla contra los potenciales tolerables para el cuerpo humano, los cuales deberán ser mayores.

Máximo potencial de la red.

De la ecuación (9), se calcula el máximo potencial que puede circular por la malla sin que se presente peligro de alto voltaje latente, para el hombre.

$$E_{\text{max}} = (2.014) (8464.5)$$

$$E_{\text{max}} = 17047.5 \quad [\text{volts}]$$

Potencial de paso tolerable para el hombre.

Aplicando la ecuación . . para una persona de 70 kg.

$$E_p = 1000 + 6 C_s P_s \frac{(0.157)}{\sqrt{t}}$$

Donde $C_s = 0.72$ (valor tomado de la pag. 8 - IEEE STD 80)

$$E_p = 1000 + 6(0.72)3000 \left(\frac{0.157}{\sqrt{0.5}} \right)$$

$$E_p = 3099.58 \quad [\text{Volts}]$$

Potencial de contacto tolerable para el hombre

De la ecuación . . del procedimiento, se calcula el potencial de contacto.

$$E_c = 1000 + 1.5 (0.72) 3000 \left(\frac{0.157}{\sqrt{0.5}} \right)$$

$$E_c = 1719.38 \quad [\text{volts}]$$

Potencial de contacto en la malla.

$$E_{cm} = \rho K_m K_i \frac{I_g}{L_M}$$

$$E_{cm} = 200(0.2022)(4.67) \left[\frac{8464.5}{2223.15} \right]$$

$$E_{cm} = 719.052 \quad [\text{volts}]$$

Potencial de paso en la malla.

$$E_{PM} = \frac{\rho I_G K_S K_I}{L_M}$$

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

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.60)} + \frac{1}{2.105+0.6} + \frac{1}{2.150} (1-0.5^{24}) \right]$$

$$K_S = 0.2348$$

Calculo de K_I

$$K_I = 0.656 + (0.172)(23.36)$$

$$K_I = 4.67$$

Sustituyendo valores en la ecuación

$$E_{PM} = \frac{200(8464.5)(0.2348)(4.67)}{2223.15}$$

$$E_{PM} = 834.98 \text{ [volts]}$$

Conclusión del estudio del sistema de malla.

La malla es segura si los potenciales tolerables para el hombre son mayores a los potenciales que se presentan en la malla:

potencial de paso para el hombre > potencial de paso en la malla

(E_p)	(E_{PM})
3099.58 (v)	834.98 (v)
(E_c)	(E_{cm})
1719.38 (v)	719.05 (v)

CAPITULO 4

4.1. Secuencia de programación.

El cálculo de la red de tierras se puede efectuar con mayor rapidez con la utilización de una computadora. Ahorrando tiempo en horas de ingeniería, además que permite una minorización de los errores que se presentan al hacer el cálculo en forma manual.

El diagrama de bloques muestra la secuencia para diseñar una malla de tierra con la siguiente secuencia.

Paso 1. Datos de entrada.

Son todos los datos necesarios para el diseño del sistema de tierras. Los parámetros más importantes son la resistividad y el valor de la corriente de circuito corto, además del área ocupada por la malla de tierra.

La resistividad del terreno podrá determinarse con alguno de los métodos descritos con anterioridad en el capítulo 3.

El valor de la corriente de falla, es la base del cálculo para conocer el calibre principal de la malla.

El área que ocupará la malla podrá determinarse a partir del plano general del arreglo de la subestación, donde se indican los límites y la disposición de equipos.

Paso 2. Dimensionamiento del conductor.

El diámetro del conductor se determina con las ecuaciones num. (1), (2) y la utilización de las tablas correspondientes.

La corriente de falla podrá calcularse con las fórmulas descritas anteriormente y será la máxima que podrá conducir cualquier conductor en el sistema de tierra. El tiempo de duración de la falla reflejará el tiempo máximo posible para la liberación de la falla, incluido el tiempo de una protección de respaldo.

Paso 3. Diseño preliminar de la malla.

El diseño preliminar de la malla deberá incluir un conductor rodeando el área completa de la subestación, además de conductores cruzados en dos direcciones formando una retícula para permitir la conexión a tierra de los diferentes circuitos, el espaciamiento entre conductores y la localización de varillas de tierra deberán basarse en la corriente I_g y en el área a proteger.

Para esta aplicación se utilizarán las ecuaciones mencionadas en la sección 3.4.1.

Paso 4. Cálculo de potenciales de paso y contacto tolerables.

Los potenciales tolerables, son indispensables en la determinación de un buen sistema de tierras, partiendo del hecho, de que la seguridad para el ser humano es primordial en el diseño de una red de tierras. Sección 3.5.

Paso 5. Cálculo de los potenciales de paso y contacto en la malla.

Los potenciales de paso y contacto resultan de aplicar las ecuaciones de la sección 3.5.4. y 3.5.5.

Paso 6. Comparación de los potenciales de paso del hombre contra los que se presentan en la malla.

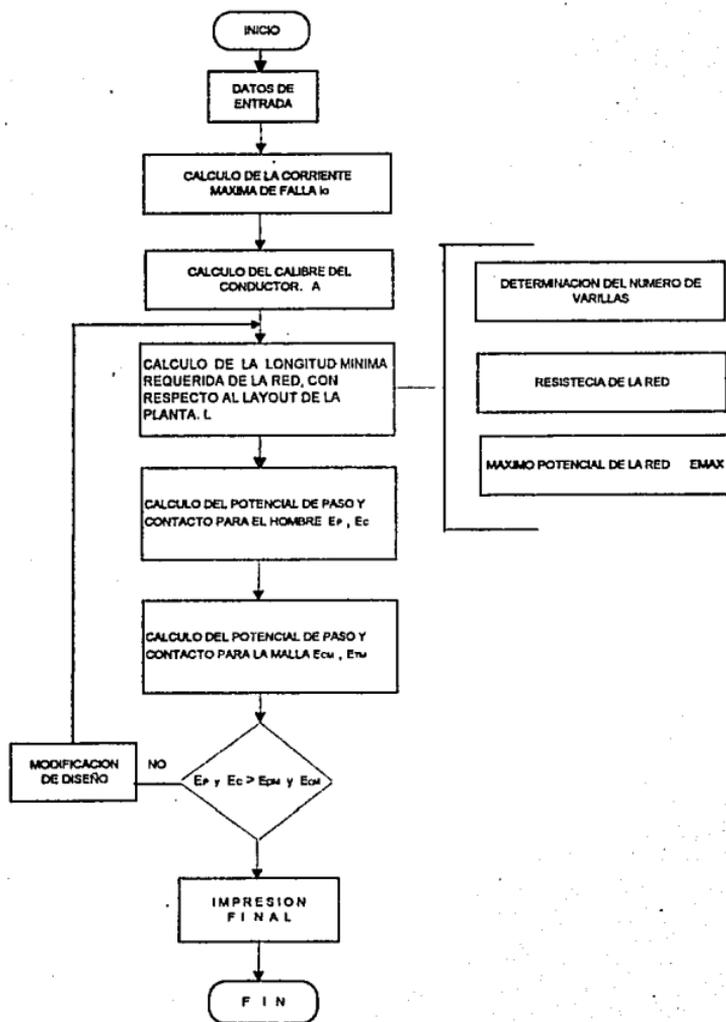
Si los voltajes de paso y contacto en la malla son menores que los voltajes tolerables de conductores adicionales, se tendrá que revisar el diseño preliminar, aumentando la longitud del cable , añadiendo varillas , conectando el sistema a redes remotas o aplicando un tratamiento químico al terreno.

Paso 7. Detalles de diseño.

Después de satisfacer los requerimientos de seguridad para la red, se procederá a revisar el diseño final para incluir conductores que hagan falta cerca de los equipos que se conectan a tierra, o adicionar varillas en las bases de los apartarrayos o en los neutros de los transformadores.

El cable que conecta a cada equipo deberá ser de calibre menor que el de la red principal a menos que sea el neutro del transformador o un centro de control de motores, los cuales deben de ir del mismo calibre que la malla principal.

DIAGRAMA DE FLUJO



* * * CALCULO DE REDES DE TIERRAS * * *

PROYECTO NO. : 484 HOJA NO. : 1
 CLIENTE : PYCORSA FECHA : 26 008 94
 AREA : SUBESTACION ELABORO : A.V.H.

* * * DATOS PARA EL CALCULO * * *

CORRIENTE DE FALLA A TIERRA EN AMPS. : 6600
 FACTOR DE CRECIMIENTO DEL SISTEMA : 1.25
 TIEMPO DE DURACION DE LA FALLA EN SEG. : .5
 FACTOR DE DECREMENTO : 1.026
 RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN OHMS : 200
 RESISTIVIDAD SUPERFICIAL EN OHMS : 3000
 PROFUNDIDAD DE LA RED EN MTS. : .6
 ANCHO DEL TERRENO EN MTS. : 40
 LARGO DEL TERRENO EN MTS. : 53
 NUMERO DE CONDUCTORES PARALELOS : 21
 LONGITUD DE ELECTRODOS EN MTS. : 3
 DIAMETRO DE ELECTRODOS EN MTS. : .015

∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨ ∨

1.- CORRIENTE MAXIMA DE FALLA A TIERRA

$IG = CF * FC * DF = 8464.5$ AMPERES

2.- CALCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR REQUERIDO

DE LA ECUACION DE ONDERDONK

$$A = IF / (\text{SQR}((\text{LOG}(((TM - TA) / (234 + TA)) + 1)) / (33 * TF)))$$

DONDE : TEMPERATURA MAXIMA PERMISIBLE EN °C : 1083
 TEMPERATURA AMBIENTE EN °C : 40
 SECCION MINIMA REQUERIDA EN CM. : 44457.68
 CALIBRE SELECCIONADO (AWG) : 4/0

3.-CALCULO DE LA LONGITUD MINIMA DE LA RED

DE LA FOMULA :

$$LM=(KM*KI*RT*IC+SQR(TF))/(116+(0.17*RS))$$

DONDE : $KM=(1/(2*3.14))*(LOG((D*D)/(16*H*DC)))+(1/3.14)*(LOG((3/4)*(5/6)*(7/8)*$
)

(EL NUMERO DE FACTORES DENTRO DEL PARENTESIS ES N-2)

$$KI=0.65+(0.172*N)$$

EL VALOR DE KM ES	:	0.2022
EL VALOR DE KI ES	:	4.67
LONGITUD REQUERIDA, EN MTS.	:	1805.6
LONGITUD TOTAL REAL EN MTS.	:	2223.15

4.-CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA RED

DE LA FOMULA :

$$R=(RT/(4*REQ))+RT/LM$$

DONDE : $REQ=SQR((LA*NA)/3.1416)$

(RADIO DE UN CIRCULO CON LA MISMA AREA CUBIERTA POR LA MALLA)

RESISTENCIA DE LA RED EN OHMS	:	2.01
-------------------------------	---	------

5.- CALCULO DEL NUMERO DE ELECTRODOS

DE LA ECUACION DE SCHWARZ SIMPLIFICADA

$$NV=(RT/(2*3.14*R*LM))*(LOG(((4*LM)/DC)-1))$$

NUMERO DE ELECTRODOS	:	20
----------------------	---	----

6.- CALCULO DE LOS POTENCIALES DE MALLA

MAXIMO AUMENTO DE POTENCIAL EN LA MALLA

EMAX = IG * R =	:	17809	VOLTS
-----------------	---	-------	-------

PROYECTO NO. : 484

HOJA NO. : 3

POTENCIAL DE PASO EN LA MALLA
DE LA FORMULA

$$EPM = (KS * KI * RT * IG) / LM = 834.20 \text{ VOLTS}$$

DONDE : $KS = (1/3.1416) * ((1/2 * H) + (1/(D+H)) + (1/2 * D) + \dots)$
(EL NUMERO DE TERMINOS DENTRO DEL PARENTESIS ES IGUAL A N)

POTENCIAL DE MALLA

DE LA FORMULA :

$$ECM = (KM * KI * RT * IC) / LM = 719.05 \text{ VOLTS}$$

7.-CALCULO DE LAS TENSIONES TOLERABLES

POTENCIAL DE PASO TOLERABLE
DE LA FORMULA :

$$EP = (116 + (0.17 * RS)) / \text{SQR}(TF) = 3099.58 \text{ VOLTS}$$

POTENCIAL DE CONTACTO TOLERABLE
DE LA FORMULA :

$$EC = (116 + (0.17 * RS)) / \text{SQR}(TF) = 1719.38 \text{ VOLTS}$$

8.- CONCLUSIONES

COMPROBACIONES DE LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD

A).-EL POTENCIAL DE PASO EN LA MALLA DEBE SER MENOR O IGUAL
QUE EL POTENCIAL DE PASO TOLERABLE

$$\text{SE CUMPLE QUE } EPM \leq EP \quad 834.20 < 3099.58$$

B).-EL POTENCIAL DE MALLA DEBE SER MENOR QUE EL POTENCIAL -
DE CONTACTO TOLERABLE

$$\text{SE CUMPLE QUE } ECM < EC \quad 719.05 < 1719.38$$

NOMENCLATURA

ps	Resistencia superficial	[Ω - m]
p	Resistividad del terreno	[Ω - m]
A	Área de la subestación	[metros]
a	Separación entre electrodos	[metro]
I_g	Corriente máxima de malla que fluye entre la tierra	[amperes]
R	Resistencia medida	[ohms]
C_p	Factor de crecimiento futuro en el sistema eléctrico	[adimensional]
D_t	Factor de decremento aplicado dependiendo del tiempo de duración de la falla	[adimensional]
I_{cc}	Corriente que circula por la malla	[amperes]
A	Sección transversal del conductor de la red en circular mils	[mm ²]
I_{cc}	Corriente de corto circuito	[amperes]
T_t	Tiempo de duración del flujo de corriente para determinar el calibre del conductor	[seg]
α_r	Coefficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T _r	[°C]

P r	Resistividad del conductor a la temperatura de referencia Tr	[$\mu\Omega/\text{cm}^2$]
Tm	Temperatura máxima permisible	[° C]
Ta	Temperatura ambiente	[° C]
Tr	Temperatura de referencia para las constantes del material	[° C]
TCAP	Factor de capacidad térmica	[J/cm ² /°C]
α_o	Coefficiente térmico de resistividad	[adimensional]
Ks	Factor de espaciamento para el voltaje de paso	[adimensional]
Lw	Longitud total del conductor	[metros]
Km	Coefficiente que toma en consideración el número de conductores paralelos, espaciamento entre conductores, diámetro del conductor y la profundidad a la cual está instalado	[adimensional]
Kl	Factor de corriente por irregularidades del terreno debido a la uniformidad de la densidad de corriente que fluye al terreno en las diferentes partes de la malla	[adimensional]
Kh	Factor que considera el efecto de la profundidad de la red	[adimensional]
Kii	Factor que toma en cuenta el efecto de los conductores interiores sobre las esquinas de la red	[adimensional]
Ki	$0.656 + 0.172 n$	[adimensional]

n	Número de conductores paralelos	[adimencional]
LVA	Longitud de la varilla copperweld	[metros]
d	Diámetro de la varilla de tierra	[pulg o mm ²]
D	Distancia entre conductores	[metros]
R_m	Resistencia de la malla preliminar. Dato fluctuante entre 1 ohm a 10 ohms	[ohms]
R_v	Resistencia de la varilla de tierra	[ohms]
R	Resistencia de la red	[ohms]
L_c	Longitud de los conductores	[metros]
L_v	Longitud de la varilla de tierra	[metros]
E_p	Voltaje de paso tolerable por el cuerpo humano de 70 kg. de peso	[volts]
E_{max}	Máximo potencial de la red	[volts]
E_c	Voltaje de contacto tolerable para una persona de 70 kg. de peso	[volts]
E_p	Voltaje de paso tolerable para una persona de 70 kg. de peso	[volts]
E_{PM}	Potencial de paso en la malla	[volts]
E_{CM}	Potencial de contacto en la malla	[volts]
h_o	Profundidad de referencia	[metros]
h	profundidad de la instalación de los conductores en la red de tierras	[metros]

CONCLUSIONES

Todos los sistemas eléctricos de alta y baja tensión deben de contar con un sistema de tierras adecuado durante la ocurrencia de una falla para: garantizar la seguridad del personal; proteger a los diferentes equipos eléctricos; contar con una adecuada detección y eliminación de las fallas; y limitar la elevación de potencial en el área de la red sobre el potencial natural del suelo.

Si se observa una falla en el sistema eléctrico, se presentará una sobrecorriente, por lo que no es suficiente contar con un sistema de tierras cualquiera, sino con una red capaz de soportar la corriente de corto circuito, absorber parte de ella, y canalizar el resto hacia el terreno para su total disipación.

Debido a las sobrecorrientes, una gran parte de los accidentes personales ocurridos en las industrias, están relacionados con el contacto directo con carcazas o partes metálicas no conductoras, las cuales se energizan en el instante de ocurrir una falla. Cuando el personal se acerca a tocarlas, ya sea por accidente o para darles mantenimiento, puede o no sufrir una descarga, dependiendo si la malla cumple adecuadamente con los parámetros de seguridad.

Los parámetros de seguridad consisten en que los potenciales de malla deben registrar un valor menor a los potenciales tolerables para el ser humano, es decir, ofrecer menor resistencia al paso de la corriente.

En el caso de que la red no sea capaz de disipar la sobrecorriente hacia el terreno, el personal se convierte en un medio seguro de descarga.

Otro tipo de accidentes, en su mayoría incendios, son ocasionados por fallas en los equipos, cargas estáticas o descargas atmosféricas en las áreas próximas a los puntos de contacto a tierra. Si la detección de la falla no es oportuna, la corriente de corto impactará al equipo, llegando, incluso, a provocar su destrucción.

En la fase de diseño, una red de tierras en una planta industrial debe asegurar que los voltajes de contacto y paso en la malla sean menores a los tolerables por el hombre. Para la protección contra descargas atmosféricas en edificios, torres de enfriamiento, estructuras metálicas, etc., es importante contar con un medio de baja impedancia, con el cual la descarga pueda entrar a tierra en forma directa, sin pasar a través de las cimentaciones.

En el caso de que el sistema de tierras no cumpla con los parámetros de seguridad anteriores, se deberá plantear un nuevo diseño que considere: un incremento en la red, mediante la reducción del espaciamiento de los conductores; un incremento en el número de varillas o registros-varilla enterrados; una interconexión de tubos de paso profundos a la red; o el tratamiento químico en los registros, para bajar la resistividad del terreno.

Otra opción es el agregar capas de roca triturada de alta resistividad en la superficie del terreno, para aumentar la resistencia en la superficie del terreno.

En el caso de contar con una red existente, donde ésta no cumpla con condiciones de seguridad, se deberá hacer una interconexión con una malla secundaria, o ánodos adicionales orientados a reducir la resistencia de la red.

Se deberán hacer mediciones periódicas de la resistividad de la red; dichas mediciones se efectuarán en los registros varilla y deberán mostrar un valor máximo de 10 ohms.

En el momento en que se aumente la carga eléctrica, es imprescindible revisar las condiciones de operación del sistema de tierras.

BIBLIOGRAFÍA.

- ANSI / IEEE STD. 80-1986
IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas
Sistemas de tierra, Ing. Rodolfo Lorenzo Bautista. Ed. Mayo 1990.
- Protección Eléctrica Industrial, Distribución de Energía Eléctrica en Plantas Industriales, Ing. Jesús Velazco Solís. Ed. 1992.
- Diseño de Subestaciones Eléctricas Industriales, Ing. Lorenzo Bautista. Ed. 1992
- Normas Técnicas para Instalaciones Eléctricas, revisión 1993 I.N.P.
- Power System Grounding and Transients and Introduction
A:P: Sakis Meliopoulos, Marcel Dekker, Inc. 1988.
- Diseño de Subestaciones Eléctricas, Ing. Raúl Martín. Ed. Mc Graw Hill, 1990.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas, Manual de Diseño de redes de Tierra para Subestaciones Eléctricas de Potencia, Ing. R. Velázquez S.
- Procedimiento de Diseño de Bufete Industrial ETP-200, Estudio de Resistividad del Suelo.
- Procedimiento de un Sistema de Pararrayos de Bufete Industrial ETP-300
- Lenguajes de Diagrama de Flujo. Ing. Organick Stenberg. Ed. LIMUSA, 1990
- Curso de Programación Gw Basica, Ing. Francisco Ceballos Sierra, Ed. Macrobit. Edición 2a. 1990.