

5  
2ij

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán**

**INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LOS SISTEMAS  
DE CONEXION A TIERRA, APLICADOS EN  
REDES DE DISTRIBUCION Y SISTEMAS  
ELECTRICOS INDUSTRIALES**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
**P R E S E N T A N**  
**CARLOS CORTES PERULERO**  
**JOSE MANUEL MONTALVO LOYO**

Director de Tesis: Ing. Aquilino Sánchez Cabrera

Cuautitlán Izcoalli, Méx,

1986



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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.

# C O N T E N I D O

## INTRODUCCION

### C A P I T U L O I

#### ASPECTOS GENERALES

- I.1. CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE TIERRA.
- I.1.1. SISTEMAS DE TIERRA DE PROTECCION.
- I.1.2. SISTEMAS DE TIERRA DE OPERACION.
- I.1.3. SISTEMAS DE TIERRA PROVISIONALES.
- I.2. ELEMENTOS QUE COMPONEN UN SISTEMA DE TIERRA.
- I.2.1. CONDUCTORES.
- I.2.2. CONECTORES.
- I.2.3. TOMAS DE TIERRA.
- I.2.4. REGISTROS
- I.3. NUMERO Y DISPOSICION DE LAS TOMAS DE TIERRA

## C A P I T U L O II

### PRELIMINARES EN EL DISEÑO DE - UN SISTEMA DE TIERRA.

- II.1. GENERALIDADES
- II.2. EFECTOS DE LA CORRIENTE ELEC--  
TRICA EN EL CUERPO HUMANO.
  - II.2.1. SEGUN SU MAGNITUD
  - II.2.2. SEGUN LA DURACION
  - II.2.3. SEGUN LA FRECUENCIA.
- II.3. RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO.
- II.4. TENSIONES PELIGROSAS DEBIDO A\_  
LA INTENSIDAD DE LA CORRIENTE\_  
A TIERRA, OCASIONADAS POR UNA\_  
FALLA EN EL SISTEMA ELECTRICO.
  - II.4.1. TENSION DE CONTACTO.
  - II.4.2. TENSION DE PASO.
  - II.4.3. TENSION DE TRANSFERENCIA.

## C A P I T U L O III

### PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

- III.1. GENERALIDADES
- III.2. MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.
- III.3. FACTORES QUE DETERMINAN LA VARIACION DE LA RESISTIVIDAD DE UN TERRENO.
  - III.3.1. NATURALEZA DEL TERRENO.
  - III.3.2. EFECTO DE LA HUMEDAD.
  - III.3.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA.
  - III.3.4. TRATAMIENTO DEL SUELO.
- III.4. VALORES PRACTICOS DE LA RESISTIVIDAD.
- III.5. DETERMINACION DE LA MAXIMA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA.
  - III.5.1. FACTOR DE DECREMENTO. COMPENSACION POR EFECTOS DE CORRIENTE DIRECTA.
  - III.5.2. EFECTOS DE FUTUROS CAMBIOS,
  - III.5.3. METODOS QUE SE RECOMIENDAN PARA LIMITAR EL VALOR DE CORRIENTE

DE FALLA

III.6. RESISTENCIA DE TIERRA.

III.7. GRADIENTE DE POTENCIAL.

C A P I T U L O IV

ANALISIS PRELIMINAR PARA EL DI  
SEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

IV.1. GENERALIDADES

IV.2. RED DE TIERRAS

IV.3. CONDUCTORES DE LA RED DE TIE--  
RRAS

IV.3.1. RIGIDEZ MECANICA

IV.3.2. MATERIAL DEL CONDUCTOR

IV.4. LONGITUD DE CONDUCTOR REQUERI--  
DO PARA EL CONTROL DE GRADIENTE  
DE POTENCIAL.

IV.4.1. FACTOR DE UNIFORMIDAD "K<sub>i</sub>"

IV.4.2. TENSIONES DE PASO EN LA PERIFER  
RIA DE LA RED.

- IV.5. DIMENSIONAMIENTO DE LA RED
- IV.6. NUMERO DE ELECTRODOS EN UN SIS  
TEMA DE TIERRA.
- IV.7. RESISTENCIA DEL SISTEMA DE TIE  
RRAS.
- IV.8. OBSERVACIONES DEL SIENO PRELI-  
MINAR

## C A P I T U L O V

### CONEXION A TIERRA DE EQUIPO

- V.1. GENERALIDADES
- V.2. EQUIPOS QUE DEBEN SER CONECTA-  
DOS A TIERRA.
  - V.2.1. CONEXION A TIERRA DE ESTRUCTU-  
RAS
  - V.2.2. CONEXION A TIERRA EN LAS SUBES  
TACIONES TIPO INTEMPERIE
  - V.2.3. CONEXION A TIERRA DE LOCALES -  
EN DONDE HAY GENERADORES O MO-  
TORES ELECTRICOS.

- V.2.4. CONEXION A TIERRA DE LOS DUC-  
TOS PARA ALAMBRES CONDUCTORES.
- V.2.5. CONEXION A TIERRA DE MOTORES\_  
DIVERSOS.
- V.2.6. CONEXION A TIERRA DE EQUIPO -  
PORTATIL.

## C A P I T U L O VI

### PRINCIPALES METODOS DE CONE-- XION A TIERRA.

- VI.1. GENERALIDADES
- VI.2. SISTEMAS NO ATERRIZADOS
- VI.3. SISTEMA DE NEUTRO SOLIDAMENTE  
ATERRIZADO
- VI.4. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA A\_  
TRAVES DE RESISTENCIA.
- VI.5. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA A\_  
TRAVES DE UNA REACTANCIA.

C A P I T U L O VII

MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA -  
DE TIERRAS

C A P I T U L O VIII

DISEÑO PRACTICO DE UN SISTEMA  
DE CONEXION A TIERRA

C A P I T U L O IX

RECOMENDACIONES PARA UN SISTEMA  
DE TIERRA.

BIBLIOGRAFIA.

## INTRODUCCION.

En los sistemas de distribución eléctrica tanto en plantas industriales como en Subestaciones, la conexión correcta a tierra de dicho sistema es un factor de máxima importancia; tiene por objeto reducir al máximo el peligro que presenta un sistema eléctrico, ya sea, por su propia energía, o por causas externas, unas eventuales y otras previsibles; así como también proporcionar máxima seguridad al personal y protección al equipo eléctrico.

Es por esta razón, que todo sistema eléctrico debe estar diseñado para prevenir el peligro de cualquier contacto accidental de las partes metálicas circundantes con los elementos que se encuentren bajo tensión.

Este peligro se puede reducir y eventualmente eliminar haciendo que las partes metálicas que no esten a potencial y al suelo se establezca una conexión a tierra conveniente.

A fin de lograr la mayor seguridad posible en las instalaciones eléctricas el encargado de realizar el dise

ño del sistema de conexión a tierra deberá apoyarse de --  
ciertas técnicas para elegir el sistema de conexión a tierra  
más adecuado y así obtener la mayor protección posi--  
ble.

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación  
hemos tratado de obtener la información más actuali-  
zada, con la finalidad de que dicho trabajo sirva de guía  
al ingeniero proyectista, para determinar y ejecutar una\_  
conexión a tierra adecuada en el sistema eléctrico a su -  
cargo.

## CAPITULO I

### ASPECTOS GENERALES.

#### 1.1 CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE TIERRA.

##### 1.1.1 SISTEMAS DE TIERRA DE PROTECCION.

El sistema de tierras de protección persigue dos objetivos principales; Proteger al personal y proteger al equipo eléctrico en general durante las fallas a tierra - que se presentan en el sistema eléctrico.

Será función del sistema de protección mantener niveles de tensión y corriente aceptables que no resulten de peligro al personal y al equipo eléctrico que puedan ser dañados por los efectos destructivos potencialmente de sobre voltajes y elevadas corrientes durante las fallas a tierra.

Por lo tanto, es una norma fundamental de seguridad que todas las partes metálicas que no se encuentren bajo tensión normalmente, pero que pueden tener diferencias de potencial a causa de fallas accidentales, se deben conec-

tar a tierra; estas partes son las siguientes:

Tableros eléctricos.

Tanque de los transformadores ó interruptores.

Las carcazas de las máquinas eléctricas.

Las estructuras metálicas. Y en general todos los -  
soportes metálicos de equipos y aparatos.

### I.1.2 SISTEMAS DE TIERRA DE OPERACION.

El sistema de tierras de operación o de servicio, es el que se instala deliberadamente en determinados puntos de una instalación eléctrica con el fin de mejorar el funcionamiento, proporcionar una mayor seguridad o una mejor regularidad de operación. Los puntos del sistema por conectar a tierra pueden ser por ejemplo:

El neutro de los generadores.

El neutro de los transformadores conectados en estrella.

La conexión a tierra de los pararrayos, hilos de - -  
guarda, transformadores de potencial, cables de tierra, etc.

...

### I.1.3 SISTEMAS DE TIERRA PROVISIONALES.

Los sistemas de tierra provisiona] o de trabajo; son instalaciones eventuales que se hacen con frecuencia durante las actividades de trabajo en una instalación eléctrica; como son; mantenimiento, ampliaciones, reparaciones, etc.

Aunque sólo se traten de instalaciones temporales no se deben descuidar de ninguna manera la seguridad que debe proporcionar un buen sistema a tierra; por lo tanto, cuando las necesidades de alguna instalación o equipo requiera un sistema de tierras provisional, éste deberá ofrecer las mismas garantías de un sistema permanente a tierra.

## I.2 ELEMENTOS QUE COMPONEN UN SISTEMA DE TIERRAS.

### I.2.1 CONDUCTORES.

El conductor de conexión a tierra, es un conductor desnudo, por lo general de cobre, sin aisladores, al descubierto, de forma visible, y de tal forma que no resulte

fácil su deterioro por acciones mecánicas o químicas. En la vigente reglamentación está prohibido el tendido empotrado del circuito de conexión a tierra; cuando esto no fuere posible (por ejemplo, en el paso de tabiques, muros, etc.), el conductor de tierra se ha de instalar en el interior de un tubo de acero (conduit). Su principal función es conducir únicamente la corriente de falla a tierra; por lo tanto, el conductor a tierra no deberá conducir corriente en condiciones normales de operación del sistema eléctrico.

### I.2.2 CONECTORES.

Los conectores de un sistema de tierras han de tener un contacto eléctrico perfecto, tanto con las partes metálicas que se desean poner a tierra, como con los propios conductores del sistema que formarán redes (por ejemplo, cuando es necesario hacer una derivación, cuando haya cruce de conductores, etc.), así como también con la placa o electrodo que constituye la toma de tierra principal. El dispositivo que permite tales uniones es el conector.

Entre los conectores más usuales se cuentan con los

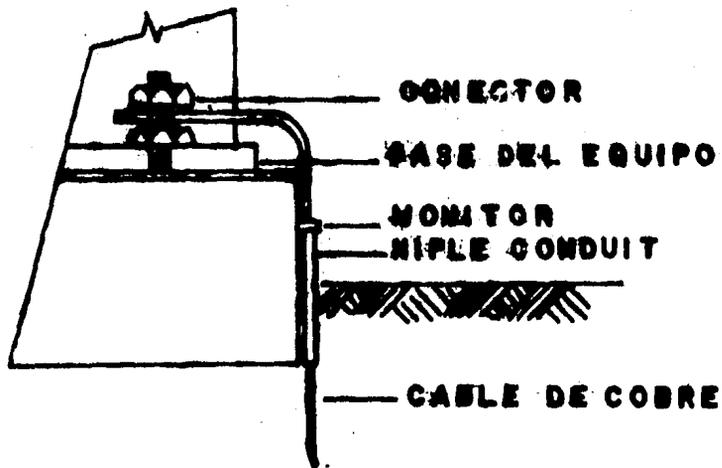
siguientes:

- a) Conectores soldables.
- b) Conectores mecánicos.

a) Los conectores soldables hacen uniones permanentes a base de fundición de metales, que se logran con moldes especiales.

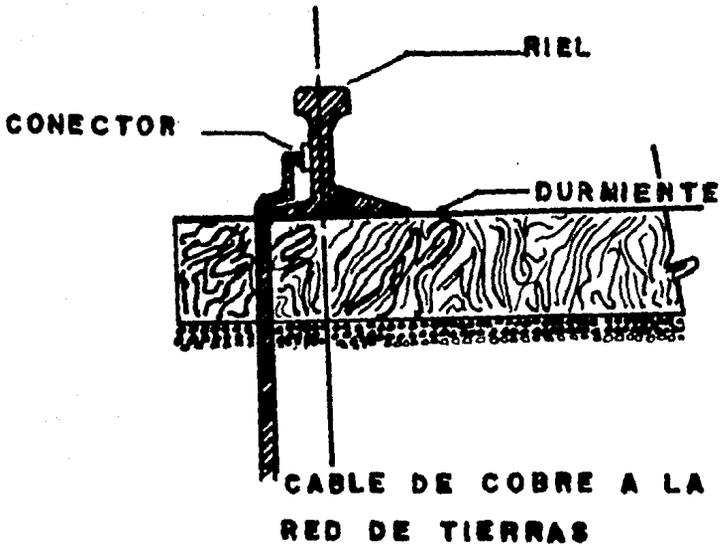
b) Los conectores mecánicos, permiten su colocación a base de tornillos y dispositivos que aprisionan las partes a unir hasta lograr un buen contacto.

A continuación se muestran algunos tipos de conectores en las figuras siguientes: . (I.1, I.2, I.3 y I.4.)



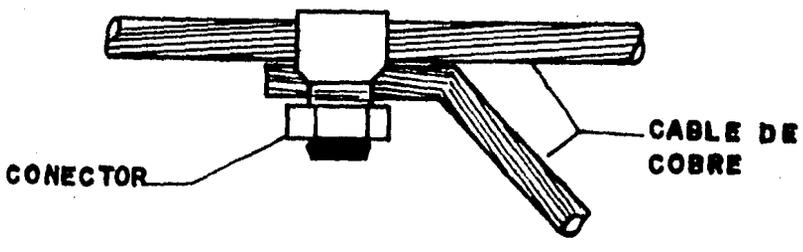
**DETALLE DE CONECTOR A TIERRA**

**FIG-1-1**

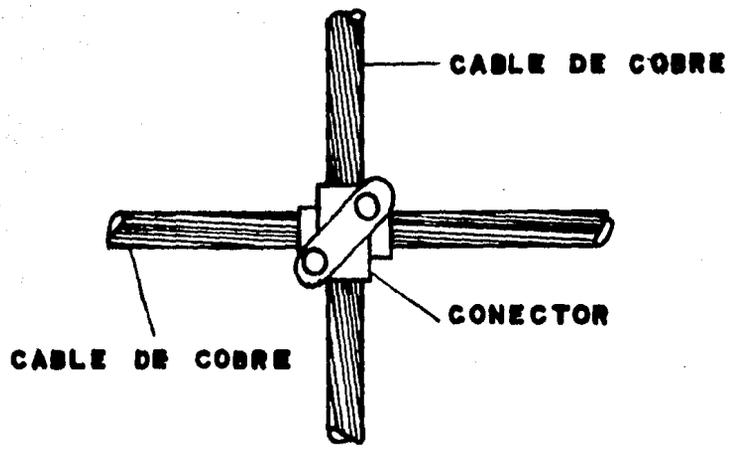


DETALLE DE CONECTOR A TIERRA

FIG. 1-2

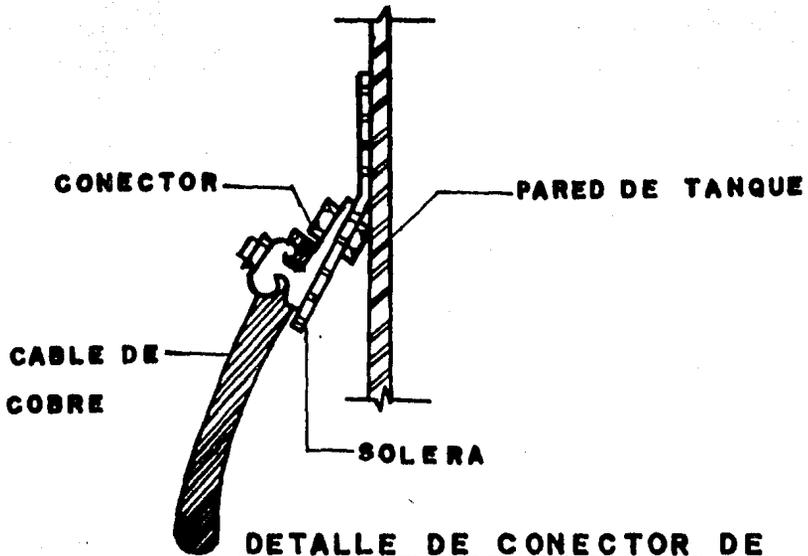


DETALLE DE UNA DERIVACION

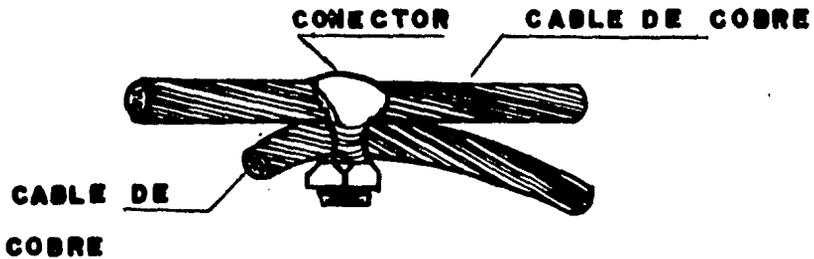


CRUCE DE CABLES

FIG.13



DETALLE DE CONECTOR DE  
CABLE A TANQUE



DETALLE DE CONECTOR DE  
CABLE A CABLE

FIG. 1-4

### I.2.3 TOMAS DE TIERRA.

Una conexión a tierra en las instalaciones eléctricas se lleva a cabo mediante tomas de tierra; que son - - cuerpos metálicos, conductores introducidos en el suelo y que forman unión conductora con el terreno.

La forma de la toma de tierra, el valor de su superficie y la resistividad del terreno determinan de que manera debe efectuarse la difusión de corriente.

A continuación veremos la toma de tierra más utilizadas en la práctica y que se ajustan a las prescripciones reglamentarias.

#### TOMAS DE TIERRA POR MEDIO DE DISPERSORES.

Este es uno de los sistemas más empleados en la práctica y consiste en clavar verticalmente en el terreno tubos metálicos, que tienen como finalidad dispersar la corriente en la tierra.

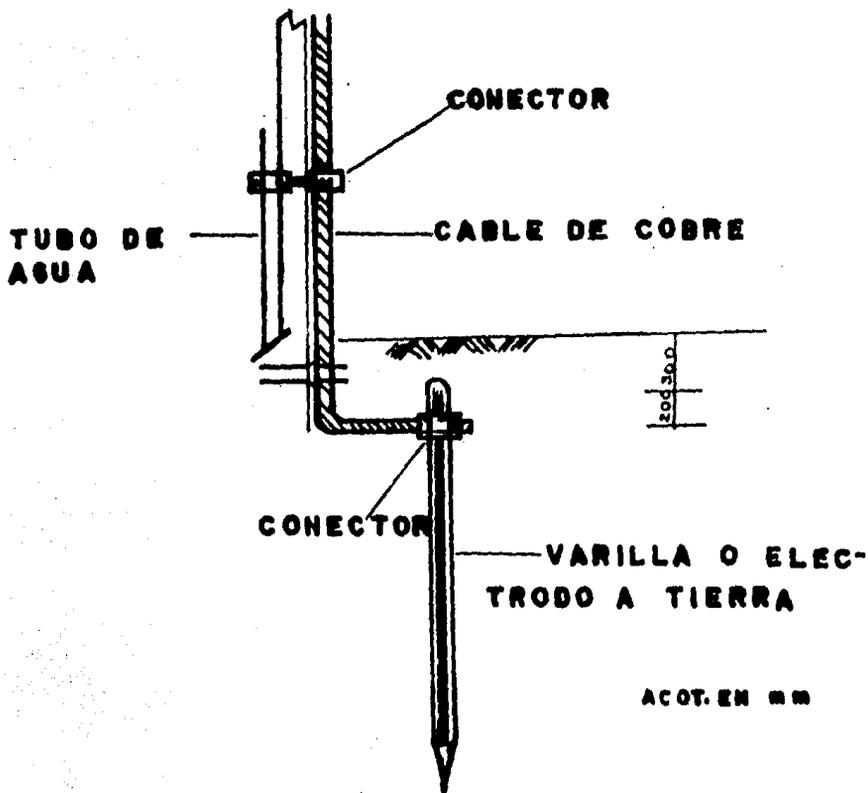
Estos dispersores han de ser de metal no férnico; de 2.44 a 3.05 mts. de longitud (8 a 10 pies), con un recubrimiento de cobre y diámetro de 15.9 mm (5/8"). Se en-

cuentran en el mercado en dos piezas para facilitar su manejo; el primer elemento está provisto de una punta de --acero templado y los demás elementos son encajables entre sí.

Para una buena conductividad del terreno y puesto --que los dispersores son tubos, éstos se llenan periódica-mente con una solución salina la cual es introducida en -los orificios que van dispuestos en el dispersor, saturan-do de esta forma las regiones más profundas del terreno.- La parte alta del mismo es rellena también de solución\_ salina.

Si con un solo dispersor no se consigue la resisten-cia deseada, se clavan en paralelo otros dispersores que\_ deben estar a una distancia no menor de 2 mts.

A continuación se muestran las siguientes figuras: -  
(I.5, I.6, I.7).



### DETALLE DE CONEXION DE UNA VARILLA A TIERRA

**FIG. 1-5**

TOMA DE TIERRA EN FORMA DE PLACA.

Este tipo de toma se recomienda en los terrenos donde la profundidad vegetal es importante, se instalan por lo general de 0.5 a 1 mt. de profundidad. El empleo de estas tomas de tierra no son de mucho uso, debido a su alto costo y al inconveniente de que la mayor parte de corriente de paso, se concentra en las aristas que tienen una superficie total muy pe-

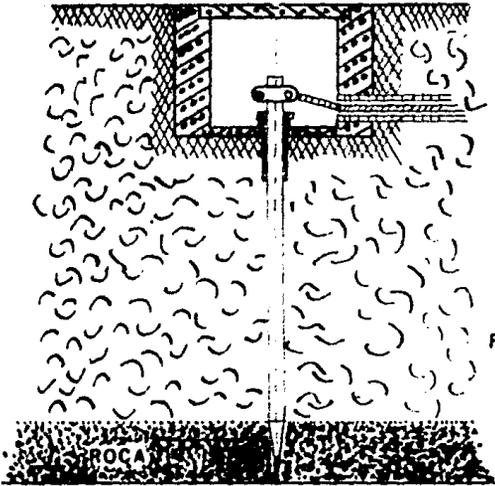


Fig. 1.6 Realización práctica de una toma de tierra de pica

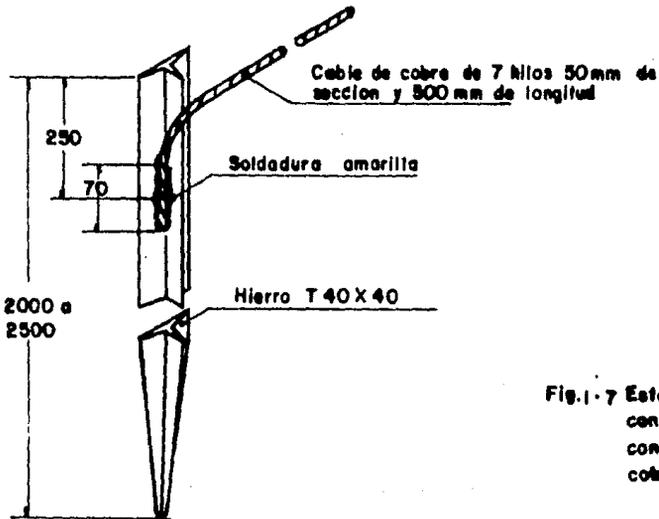


Fig. 1.7 Estaca de toma de tierra con hierro T de 40X40 y conductor de conexión de cobre recocido

queña y que puede ser de peligro al personal, debido a la poca profundidad a la que está enterrada. No obstante, este inconveniente puede remediarse, en parte, perforando las placas para aumentar la longitud de las aristas vivas. Si el terreno presenta características variantes con respecto a la resistencia de tierra, se recomienda para la toma de tierra el sistema de dispersores. A continuación se presentan algunas recomendaciones para una toma de tierra en forma de placa.

- a) Las placas se enterrarán perfectamente en forma vertical a una profundidad suficiente para encontrar un terreno bastante húmedo.
- b) Cuando existan capas de roca, grava, etc.- La placa se instalará horizontalmente a una profundidad menor de 2 mts.

Las figuras 1.8 y 1.9 muestran dos clases diferentes en la instalación de placas de tierra:

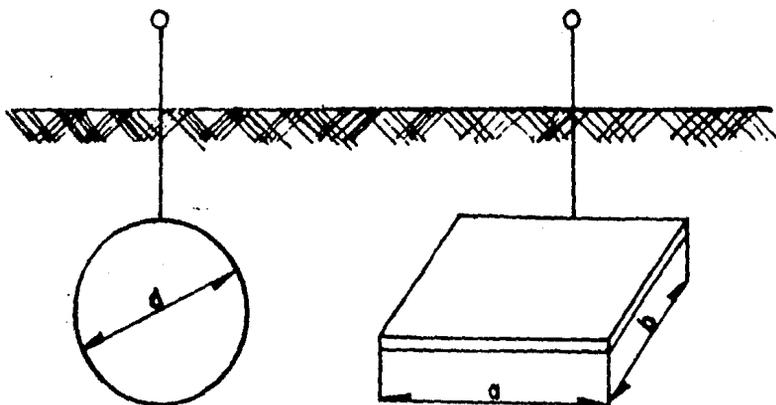


FIG.1-8 TOMAS DE TIERRA EN FORMA DE PLACA.

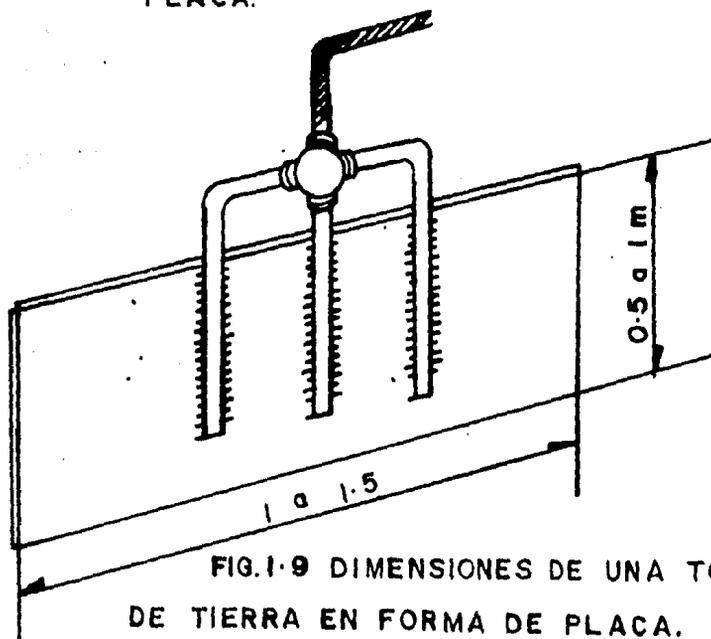


FIG.1-9 DIMENSIONES DE UNA TOMA DE TIERRA EN FORMA DE PLACA.

### TOMAS DE TIERRA EN FORMA DE PLETINA.

Esta toma de tierra consiste en una pletina o banda metálica, se instala a poca profundidad y horizontalmente como se muestra en la figura - - (I.10).

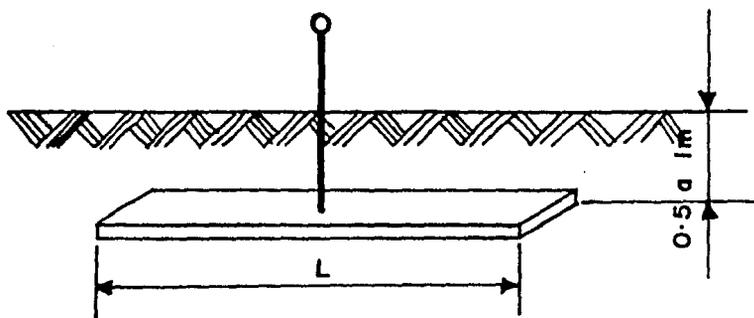


FIG. I.10 TOMA DE TIERRA EN FORMA DE PLETINA.

Se utiliza en las instalaciones a la intemperie y en donde no se pueden emplear otros sistemas a tierra. Se fijan las siguientes dimensiones - como mínimas para estas tomas de tierra.

Longitud 5 mts.

Sección  $\left\{ \begin{array}{l} \text{cobre} - 90 \text{ mm}^2 \\ \text{hierro galvanizado} - 120 \text{ mm}^2 \end{array} \right.$

Espesor  $\left\{ \begin{array}{l} \text{cobre} - 3 \text{ mm} \\ \text{hierro galvanizado} - 4 \text{ mm.} \end{array} \right.$

En las siguientes figuras (I.11, I.12, I.13, I.14) se muestran otros sistemas de toma a tierra.

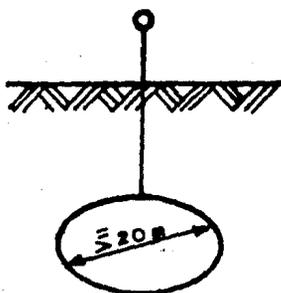


FIG.1-11 TOMA DE TIERRA  
EN FORMA DE BUCLE.

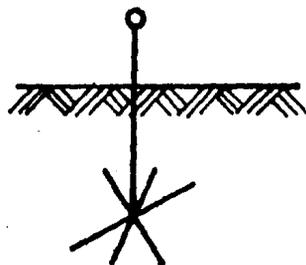


FIG.1-12 TOMA DE TIERRA  
EN FORMA DE ESTRELLA.

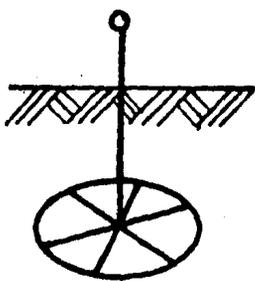


FIG.1-13 TOMA DE TIERRA  
DE RED ESTRELLADA EN  
BUCLE.

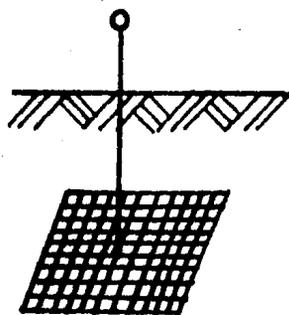


FIG.1-14 TOMA DE TIERRA  
DE RED EN MALLA.

#### I.2.4 REGISTROS.

Los registros son excavaciones acondicionadas para tener acceso a ciertos puntos del sistema de tierra.

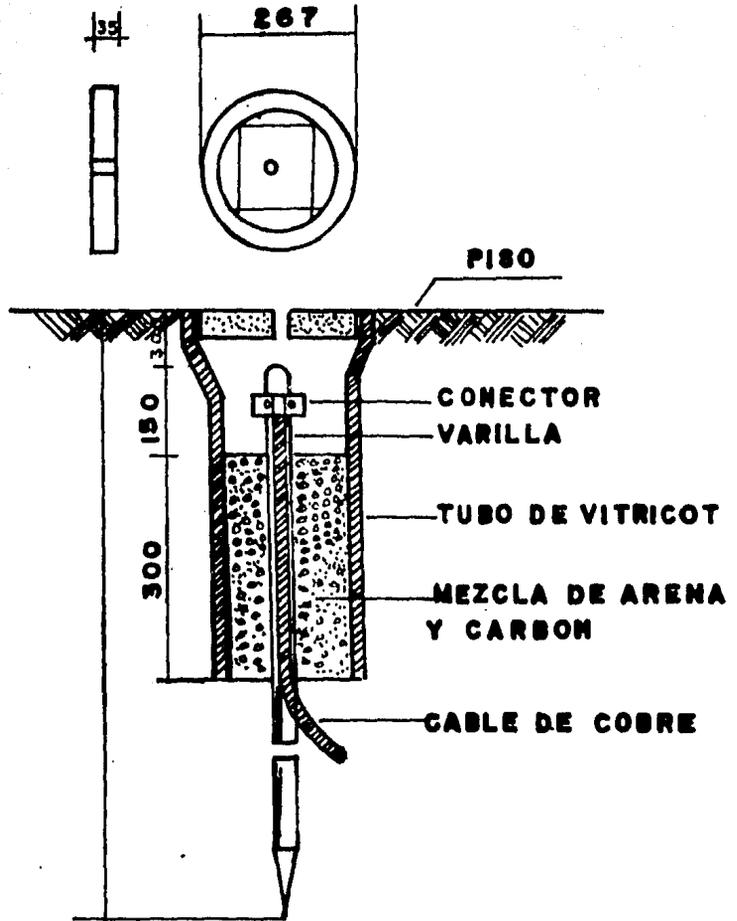
Son generalmente tubos de 30 cm de diámetro mínimo, en donde está alojado un dispersor unido al conductor. Estos registros permiten hacer mediciones de continuidad y resistencia al sistema de tierras.

En las siguientes figuras (I.15, I.16, I.17, I.18, I.19, I.20) se muestran los registros típicos de un sistema de tierras.

Cuando la conductividad del terreno es muy baja, se pueden hacer mezclas de tierras y llenar el registro con ellas, y así ayudar a una más rápida y eficiente dispersión de la corriente en la tierra.

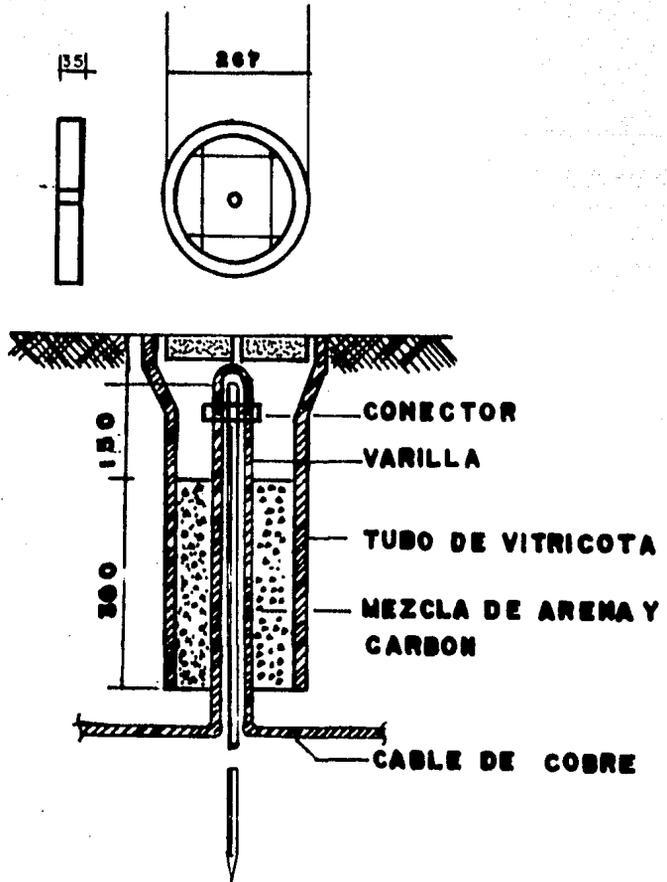
#### I.3 NUMERO Y DISPOSICION DE LAS TOMAS DE TIERRA.

En las instalaciones de edificios o estructuras a la intemperie de las instalaciones eléctricas, se emplean sistemas de conexión a tierra, constituidas por varias to



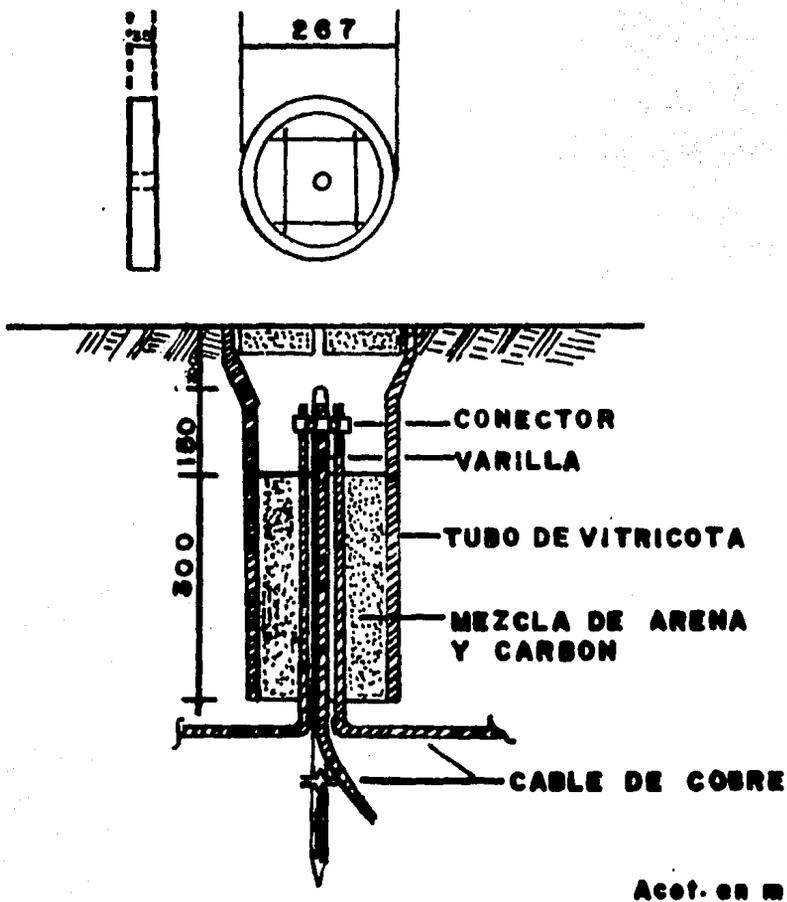
DETALLE DE REGISTRO

FIG. 118.



DETALLE DE REGISTRO

FIG. 1-16



**DETALLE DE REGISTRO**

**FIG. I-17**

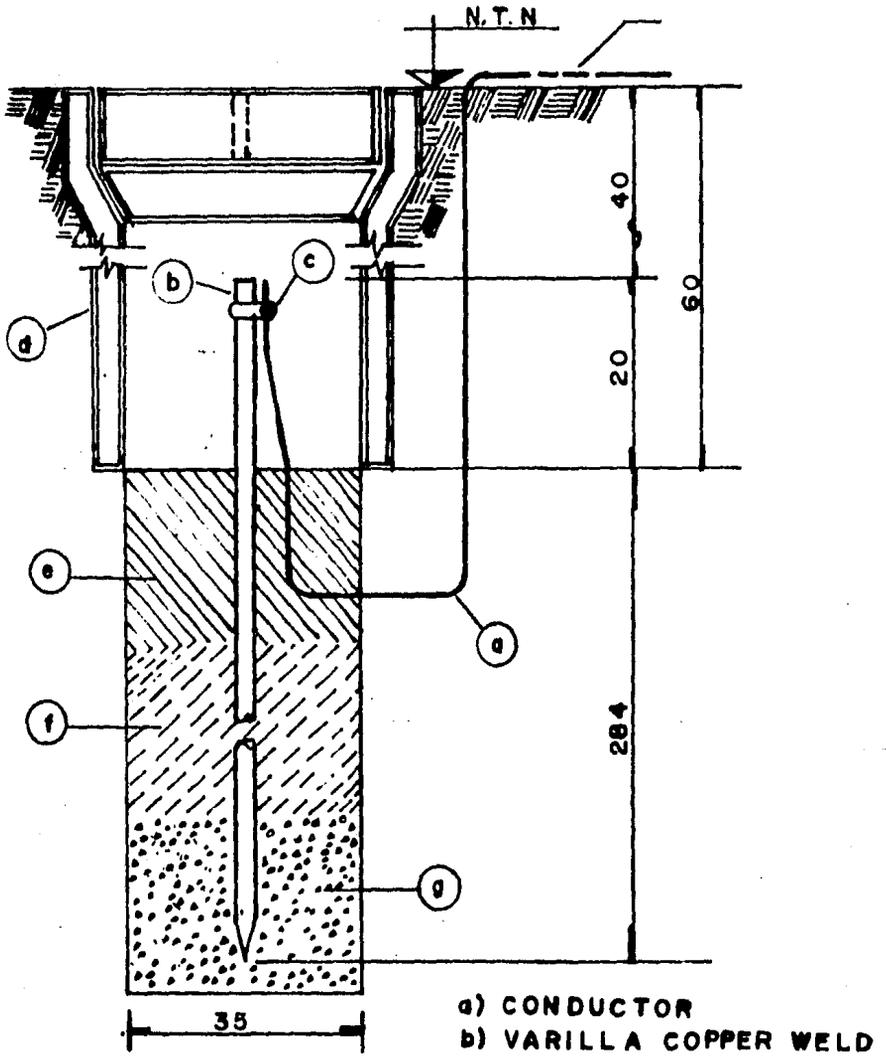


FIG. 1-BREGISTRO DE TIERRAS

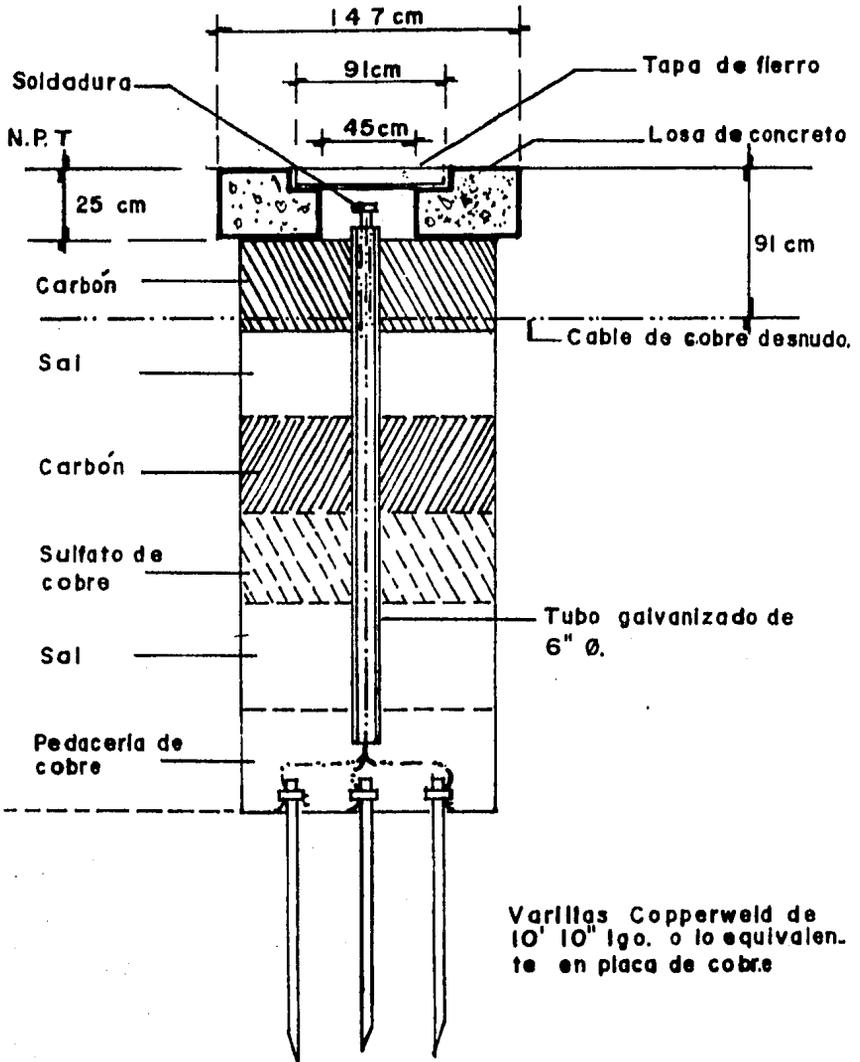


FIG. 1-19 DETALLE POZO DE TIERRAS.

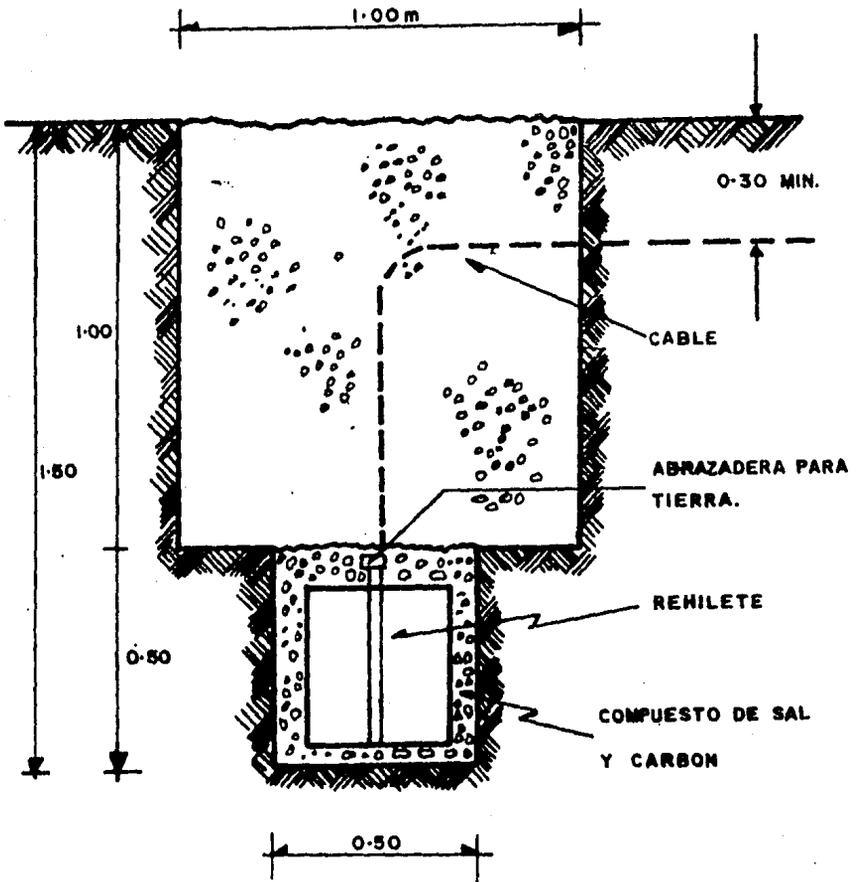


FIG. 20 DETALLE DE FOSA PARA  
REHILETE.

mas unidas entre sí, formando malla a la que se conectan la totalidad de los equipos; no obstante, se debe tener en cuenta que según el reglamento vigente y para evitar posibles accidentes ocasionados por el paso de tensiones elevadas de unas a otras partes de la instalación que a continuación se detallan:

- a) Grupo de las partes de instalación no sometidas a tensión o sometidas a tensiones reducidas.

Comprende las partes de la instalación que en servicio normal no deben estar bajo tensión y aquellas que, aún estando normalmente sometidas a tensión, es, tan reducida que el contacto con ellas no constituye peligro para las personas o cosas. Entre las primeras se pueden citar: Las armaduras metálicas, las carcazas de máquinas eléctricas, las cubas de transformadores de medida, las instalaciones de muy baja tensión, etc.

- b) Grupo de los neutros de lado de baja tensión.

Comprende los neutros de los transformadores y los de la distribución del lado de baja tensión.

- c) Grupo de los dispositivos de protección contra so  
bre tensiones de lado de alta tensión.

En este grupo se incluyen los pararrayos, limitado--  
res de tensión, bobinas, condensadores o descargadores de  
protección, líneas de transmisión aérea, etc.

- d) Grupo de neutros del lado de alta tensión.

Comprende los neutros de los transformadores del\_  
lado de alta tensión, si los hubiere.

- e) Grupo de los dispositivos de protección análogo -  
a los del grupo (c) pero del lado de baja tensión.

Cada uno de estos grupos tienen sus propias conexio-  
nes a tierra con tomas conectadas entre sí e independien-  
tes de las conexiones a tierra de los demás grupos. La se  
paración que debe existir entre las tomas a tierra a cada  
uno de los circuitos independientes de conexión a tierra\_  
será de 3 mts.

Los limitadores de tensión de las líneas de corrien-  
tes bajas (teléfonos, telégrafos, etc.). Tienen sus pro--  
pias conexiones a tierra independientemente de las ante--

riores.

Para las cercas metálicas, se clavarán varios de los montantes de éstas directamente a tierra, considerando que la distancia entre ellos no debe ser mayor de 4 mts.

Las puertas metálicas que están al alcance del personal o al público, irán unidas mediante conductores de cobre con una sección mínima de  $35 \text{ mm}^2$  a un dispensor enterrado junto a la puerta, que puede ser de 60 a 100 cm de longitud y enterrado a una profundidad de 10 a 20 cm, de la superficie.

En lo que se refiere al número de tomas de tierra necesarias, nos la dará el valor de la resistencia medida sobre el terreno, este análisis nos indicará si es suficiente una o se precisan más tomas para cada circuito de tierra.

Las siguientes figuras (I.21) (I.22) (I.23) muestran algunas de las aplicaciones antes mencionadas.

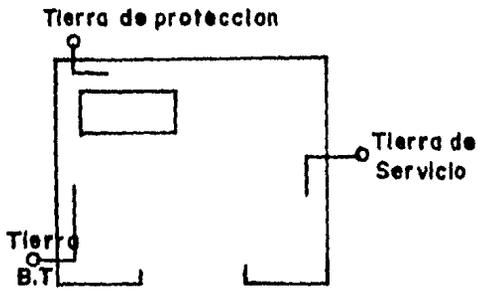


Fig.1-21 Disposición de las tomas de tierra en una estación Transformadora con terreno disponible alrededor.

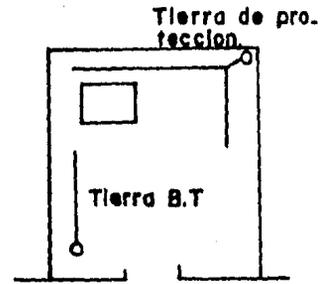


Fig.1-22 Disposición de las tomas de tierra en una estación transformadora terciaria en lugar completamente edificado y sin equipos que exijan tierra de servicio.

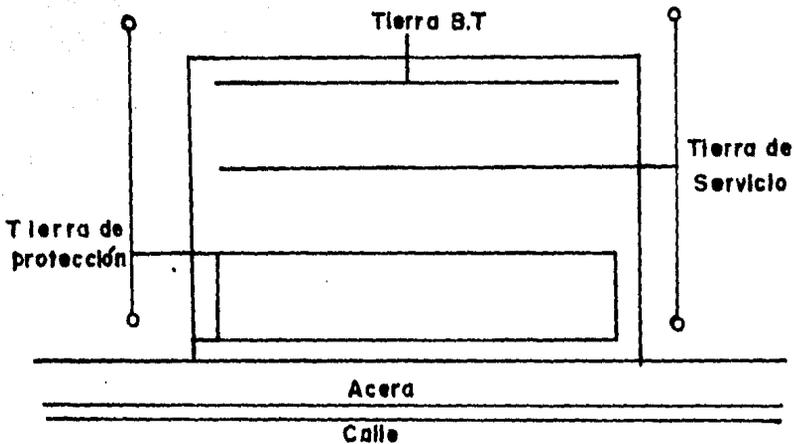


Fig.1-23 Disposición de las tomas de tierra en una estación transformadora primaria o secundaria con fachada a la calle.

## CAPITULO II

### PRELIMINARES EN EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

#### II.1 GENERALIDADES.

Antes de iniciar nuestro estudio consideramos necesario tener conocimiento de los efectos que produce una corriente eléctrica en el ser humano y tomando en cuenta éstas consideraciones, diseñar el sistema de protección más adecuado que permita eliminar dentro de lo posible los -- riesgos que representa la energía eléctrica tanto para la persona como para el equipo eléctrico en cuestión.

Como se sabe una corriente eléctrica que circula en el cuerpo humano puede producir un efecto más o menos grave e inclusive la muerte, según sea la intensidad y duración, su naturaleza y las condiciones en que se encuentre la persona afectada. A continuación mencionamos los factores que determinan los daños ocasionados por una corriente eléctrica que circula a través del cuerpo humano:

- 1) Intensidad de corriente que circule por el cuerpo.
- 2) Trayectoria que sigue la corriente a través del -

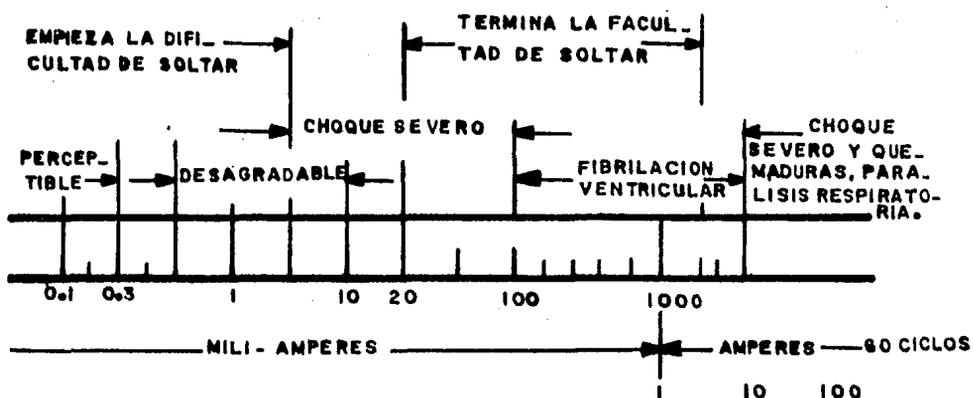
- cuerpo.
- 3) Tiempo que permanezca la víctima formando parte del circuito.
  - 4) Tipo de energía eléctrica en cuestión (C, A, C. - D).
  - 5) Condiciones fisiológicas de la persona.
  - 6) Tensión del circuito con el cual se halle en contacto.
  - 7) Cualidades aislantes del lugar en que se encuentre en ese momento.
  - 8) Area de contacto con la parte que se encuentre bajo tensión.

## II.2 EFECTOS DE LA CORRIENTE ELECTRICA EN EL CUERPO HUMANO.

### II.2.1 SEGUN SU MAGNITUD.

Se indica en la gráfica la reacción fisiológica de un hombre con una corriente aplicada externamente de uno a otro extremo de sus brazos, pasando por el pecho, en contacto externo por la piel, durante un segundo. (Los va

tores para las mujeres son 30% menores).



De la gráfica anterior observamos que un mili-ampere es la magnitud de corriente mínima que soporta el cuerpo humano sin sufrir consecuencias. Corrientes de 9 a 25 mili-amperes resultan dolorosas y se pierde el control muscular haciendo difícil ó imposible liberarse del objeto a sido - por la mano.

El valor de la corriente que produce efectos mortales, ha sido determinado entre 50 y 100 mili-amperes.

### II.2.2 SEGUN LA DURACION.

La relación corriente-tiempo en el cuerpo humano es determinante. Analizando las pruebas hechas a un grupo de personas en la Universidad de Columbia, U.S.A., se concluyó que el 95.5% de las personas pudieron resistir sin sufrir fibrilación ventricular, corrientes determinadas por la ecuación.

$$I_k^2 t = 0.027 \quad (\text{II.1})$$

de donde  $I_k = \sqrt{\frac{0.027}{t}}$

$$I_k = \frac{0.165}{\sqrt{t}} \quad (\text{II.2})$$

$I_k$  = Corriente a través del cuerpo humano en amperes.

$t$  = Tiempo de duración del shock en segundos.

0.027 = Constante de energía obtenida empíricamente en experimentos que estaban en el rango de 0.03 a 3 seg.

De la ecuación (II.2) se observan los siguientes valores.

165 mili-amperes para 1 segundo y 520 mili-amperes - para 0.1 segundo; o sea 6 ciclos de la frecuencia comercial de 60 hz.

Como la ecuación fue obtenida con datos basados en - experimentos de 3 segundos de duración máxima; esta ecuación no es valiosa para duraciones de fallas mayores.

Como se puede ver el límite de las corrientes peligrosas aumenta si la duración disminuye.

### II.2.3 SEGUN LA FRECUENCIA.

En esta Tesis, consideramos datos para diseño principalmente tomados de las frecuencias comerciales de 50 y - 60 hz. Aunque mencionaremos que el cuerpo humano no soporta corrientes mayores a los 25 hz.

### II.3 RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO.

La resistencia del cuerpo humano varía dentro de límites muy amplios. Esta dependerá de la extensión y la naturaleza de la superficie de contacto; de la naturaleza - de la piel (lisa o callosa, grado de humedad de la misma

etc). Y así como también de las condiciones del calzado y el suelo.

En pruebas hechas con electricidad estática y con personas con las manos mojadas y los pies sumergidos en agua - con sal (para similar condiciones desfavorables): Los valores obtenidos usando 60 hz, para hombres fueron 9 mili-amperes con los voltajes correspondientes de 21 volts mano-mano y 10.2 volts mano-pie, por lo tanto la resistencia en C. A. mano-mano es de  $21/0.009 = 2333.3$  ohms, y la resistencia mano-pie  $10.2/0.009 = 1133.33$  ohms.

De acuerdo a estas deducciones tomaremos un valor de - 1000 ohms para la resistencia del cuerpo, el cual nos dará un amplio margen de seguridad bajo cualquier circunstancia ordinaria.

#### II.4 TENSIONES PELIGROSAS DEBIDO A LA INTENSIDAD DE LA CORRIENTE A TIERRA, OCASIONADAS POR UNA FALLA EN EL SISTEMA ELECTRICO.

Siempre que halla corriente a tierra a través de electrodos, se presentan tensiones que pueden ser peligrosas para las personas tales como:

- 1) TENSION DE CONTACTO .
- 2) TENSION DE PASO
- 3) TENSION DE TRANSFERENCIA

1) TENSION DE CONTACTO.

Se define como la tensión a la cual se puede ver sometido el cuerpo humano por contacto con partes que normalmente no están en tensión (carcazas de máquinas eléctricas, estructuras metálicas, etc), ó con partes que normalmente se encuentran bajo tensión; como pueden ser los conductores del sistema eléctrico.

2) TENSION DE PASO.

Se define como la tensión que durante el funcionamiento de una red de tierras puede resultar entre el pie de una persona apoyada en el suelo a la distancia de un metro (un paso) o entre un pie y el otro en forma convencional.

3) TENSION DE TRANSFERENCIA.

Esta tensión deberá ser considerada como un caso especial de contacto. Sucede cuando un hombre hace contac-

to con un cable telefónico que va hasta una estación lejana, su valor será cero si la persona afectada se halla a una gran distancia del electrodo y máximo cuando la persona afectada se halle parado sobre el electrodo.

La fig. (II.1) muestra un circuito equivalente para la tensión de contacto con una mano y la corriente fluye hacia ambos pies.

La fig. (II.2) muestra un circuito equivalente para una tensión de paso.

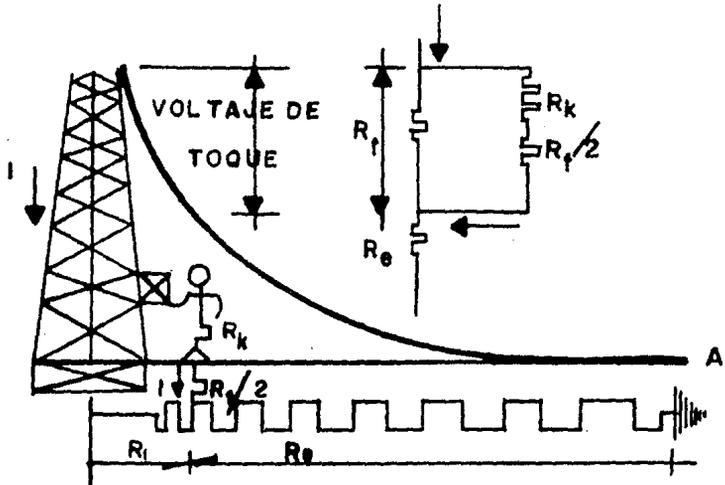
La fig. (II.3) muestra un ejemplo para una tensión de transferencia.

De los circuitos mostrados en las figuras (II.1, II.2, II.3) tenemos que  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_0$  = Resistencias de los electrodos de tierra.

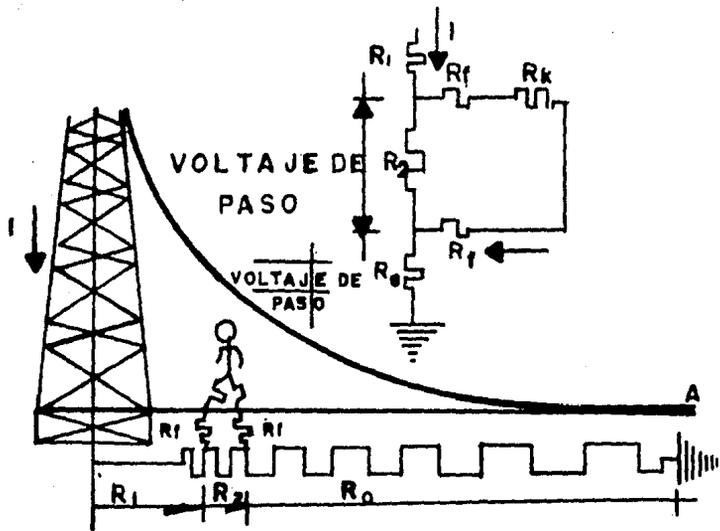
$R$  = Resistencia de la tierra inmediatamente de cada zapato.

$R_k$  = Resistencia del cuerpo humano.

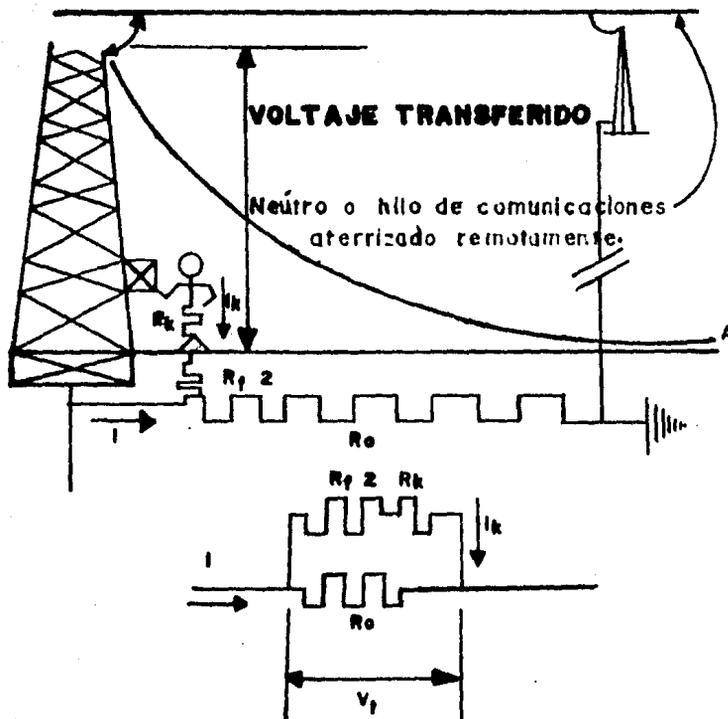
Cada pie puede considerarse como un electrodo circular superficial de aproximadamente de 5 cm de radio, y la



**FIG. II.1 POTENCIAL DE TOQUE CERCA DE UNA ESTRUCTURA ATERRIZADA**



**FIG. II.2 POTENCIAL DE PASO CERCA DE UNA ESTRUCTURA ATERRIZADA**



**EJEMPLO DE VOLTAJE TRANSFERIDO**

**FIG. 11.3**

resistencia de la tierra puede ser calculada en términos de la resistividad " $\rho_s$ " (en ohms - metro) del suelo cerca de la superficie. Por lo tanto la resistencia de los dos pies en serie (paso) es aproximadamente  $6 \rho$  ohms, y la resistencia de los dos pies en paralelo (Contacto) es aproximadamente de  $1.5 \rho$  ohms.

De lo anteriormente expuesto, y sustituyendo la ecuación (II-2) en:

$$R_f = 3 \rho_s$$

$$E_c = R I$$

$$E_c = (R_k + \frac{R_f}{2}) I_k$$

$$E_c = (1000 + 1.5) \frac{0.165}{\sqrt{t}}$$

$$E_c = \frac{165 + 0.25}{\sqrt{t}} \rho_s \text{ ----- (II-3)}$$

Similarmente.

$$E_p = (R_k + 2R_f) (I_k)$$

$$E_p = (1000 + 6 \rho_s) \frac{0.165}{\sqrt{t}}$$

$$E_p = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \text{ ----- (II-4)}$$

Donde:

$E_c$  = Tensión de contacto

$E_p$  = Tensión de paso

$I_k$  = corriente en el cuerpo humano

$R_f$  = Resistencia del terreno en función de la resistividad

$\rho_s$  = Resistividad del suelo.

## CAPITULO III

### PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE -- TIERRAS.

#### III.1 GENERALIDADES.

Sabemos que la resistencia y la resistividad son términos que definen dos propiedades físicas de todos los -- cuerpos que existen en la naturaleza, sean o no conductores. Eléctricamente hablando, no es posible aislar un término del otro, ya que ambos son implícitos y complementarios. La resistividad es el índice ohmico característico que tienen todos y cada uno de los cuerpos, por unidad de longitud y área; la resistencia es la oposición directa -- que ofrecen los cuerpos al paso de la corriente eléctrica\_ a través de ellos.

Conviene afirmar que, las dos propiedades al ser físicas, son afectadas proporcionalmente por la temperatura a la que se vean sometidos los cuerpos en cuestión, en este caso, el terreno y su localización geográfica, por -- ejemplo; un terreno a la altura del nivel del mar donde --

la temperatura es alta, no tendrá la misma resistividad - que uno, localizado a 2240 mts. sobre el nivel del mar.

La resistividad del terreno es el factor básico que afecta la resistencia del sistema de tierras y por lo tan to, varía el tipo de suelo de que se trate.

Debido a la gran resistividad de la tierra, todas -- las corrientes que fluyen por ella, producen una caída de tensión considerable y por lo tanto se hace necesario rom per con el concepto popular de que el potencial de la tie rra, es siempre cero. Por el contrario, pueden desarro-- llarse en su seno fuertes intensidades de campo eléctrico o gradientes de potencial que afectan a extensas regiones del terreno. Esto se acentúa en vista de que la tierra no es homogénea y sufre variaciones estacionales con la lluvia, el hielo y otras causas, que dificultan los cálculos precisos.

En este capítulo se darán los elementos y aspectos - que deben considerarse para el diseño de un sistema de -- tierras que proporcionen una protección adecuada y segu-- ra para el personal y equipo eléctrico en cuestión.

### III.2 MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

Una manera práctica de obtener la resistividad de un terreno es mediante el uso de tablas, que nos proporcionen valores aproximados de la resistividad de los diversos tipos de suelos donde se vaya a realizar una instalación de tierras, pero lo ideal, es hacer una medición física en el terreno y en varios puntos del mismo, marcando las diferencias importantes en localización superficial y en profundidad.

Dentro de los métodos más empleados para medir la resistividad del terreno, el método de los cuatro eléctrodos es uno de los más efectivos en la medición de la resistividad de la tierra; el cual consiste en enterrar - - eléctrodos como se muestra en la fig. (III.1) alimentados y separados a una distancia "D" uno de otro respectiva--

mente.

De la fig. III.1, los electrodos  $C_1$  y  $C_2$  son llamados electrodos de corriente debido a que por ellos se hace circular una corriente "I" a tierra. Los electrodos  $P_1$  y  $P_2$  comunmente son llamados de potencial.

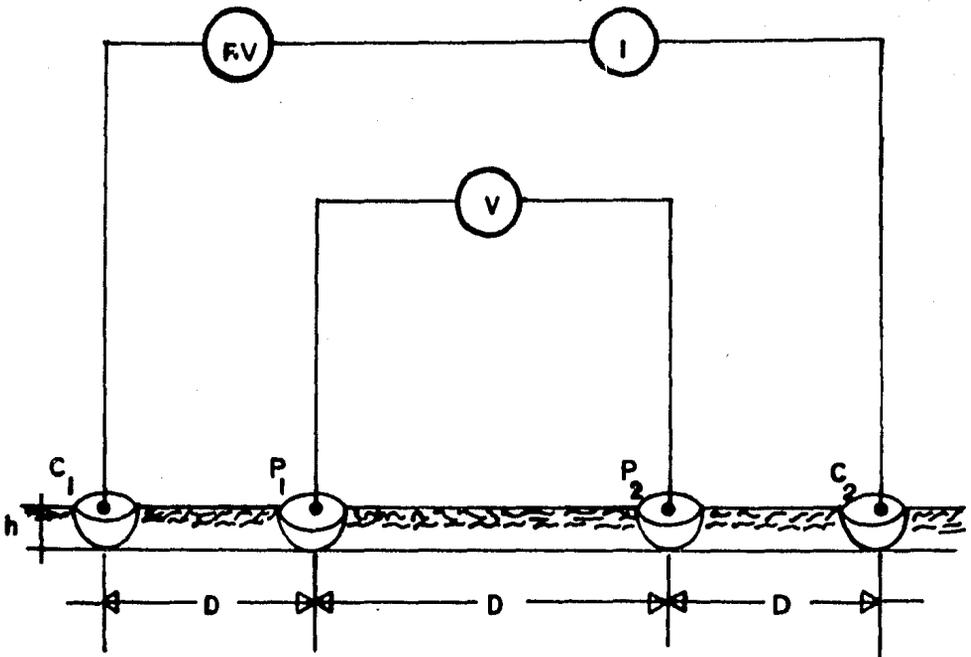


FIG. III.1 Método de los cuatro electrodos para medir la resistividad de la tierra.

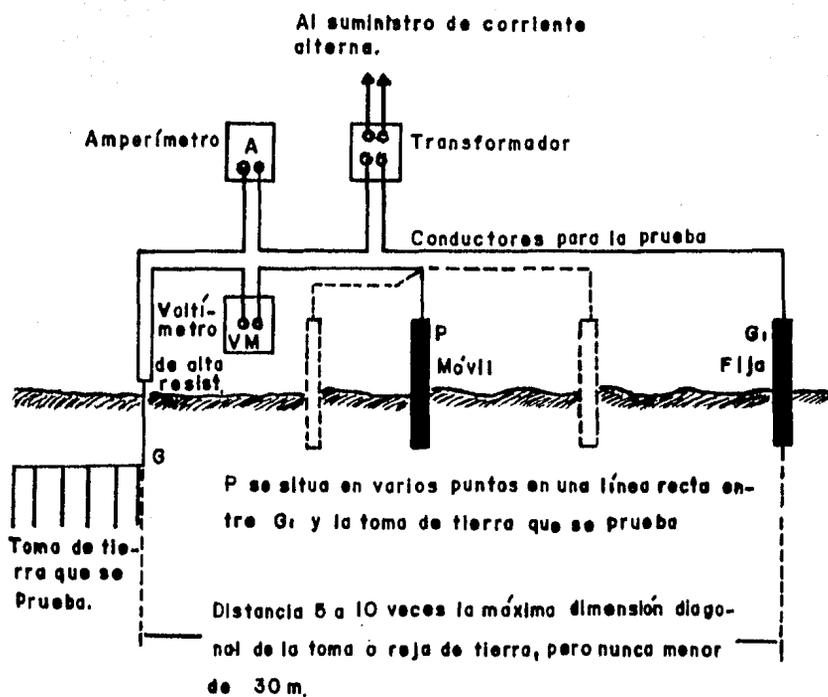


FIG. III-2 DISPOSICION PARA REALIZAR LA MEDICION DE LA RESISTENCIA DE UNA TOMA DE TIERRA, POR EL METODO DE LA CAIDA DE TENSION.

De modo que para obtener la resistividad del terreno en consideración, se mide el voltaje entre los electrodos  $P_1$  y  $P_2$  y es debido por la corriente que circula a través de los electrodos  $C_1$  y  $C_2$  obteniéndose la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4 \bar{\rho} D R}{1 + \frac{4 \bar{\rho} D R}{\sqrt{D^2 + 4h^2}} - \frac{2D}{\sqrt{4D^2 + 4h^2}}} = \frac{4 \bar{\rho} D R}{n} \quad \text{III.1}$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad del terreno en ohms - metro

$R$  = Resistencia medida en ohms

$D$  = Distancia entre electrodos, en metros

$h$  = Profundidad de penetración de los electrodos

$n$  = Factor aproximado que tiene un valor entre 1 y 2  
(Depende de la relación  $h/D$ ; si  $h = D$ ,  $n = 1.187$ ;-  
si  $h = 2D$ ,  $n = 1.030$ ; si  $h = 4D$ ,  $n = 1.003$ ).

Dicha expresión debe aproximarse a:

$$\begin{aligned} \rho &= 4 \bar{\rho} D R & \text{si } b \gg D \\ \rho &= 2 \bar{\rho} D R & \text{si } b \ll D \end{aligned} \quad \text{III.2}$$

Al realizar mediciones conjuntas en una misma área pueden emplearse para determinar la homogeneidad del terreno; en caso del suelo homogéneo se tendrá:

$$3 \rho_1 = \rho_2 + \rho_3$$

$$R_1 = R_2 + R_3$$

Para esta práctica, se han considerado electrodos de forma semi-esférica, pero también, se pueden usar varillas cortas obteniéndose el mismo resultado.

Se recomienda que al medir la resistividad y la resistencia de un terreno debe evitarse el empleo de instrumentos de corriente continua, ya que la conducción de la corriente en la tierra, verifica un proceso análogo al que ocurre en un líquido. Al circular corriente en un solo sentido, se acumula gas sobre uno de los electrodos, - debido al fenómeno de polarización, produciendo, en consecuencia, un aumento aparente de la resistencia de aquel - electrodo. Al emplear corriente alterna para estas medidas se elimina por completo dicho efecto. Existen aparatos que contienen en si mismos todos los dispositivos necesarios, incluida la fuente de tensión alterna, para la medición de la resistencia y resistividad de una toma de tierra.

### III.3 FACTORES QUE DETERMINAN LA VARIACION DE LA RESISTIVIDAD DE UN TERRENO.

#### III.3.1 NATURALEZA DEL TERRENO.

La resistividad del terreno varía considerablemente según su naturaleza. Especialmente en regiones en que -- unas capas de terreno se han sobrepuesto a otras, presentándose el fenómeno de estratificación. Se puede encontrar casi cualquier tipo de combinación de estratos, tales como capas superficiales de baja resistividad que pueden estar sobre gravas de alta resistividad. Arcillas de bajo valor pueden estar debajo de areniscas de alto valor de resistividad.

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

Naturalmente, cuando menor es la resistividad, mejor resulta el terreno para el sistema de tierras. Por esta razón, muchas veces, hay que desplazar las tomas de tie--

rra hasta encontrar terreno húmedo. Si resulta difícil encontrar terrenos adecuados en las proximidades de la limitación, habrá que efectuar un tratamiento químico de corrección del terreno, y de ser posible, se dispondrá de una canalización que permita regar las tomas de tierra en las estaciones calurosas.

Normalmente, hecho el estudio de las características del terreno y la composición del suelo hasta una profundidad razonable, se considera el suelo todo homogéneo.

### III.3.2 EFECTO DE LA HUMEDAD.

Como se observa en la gráfica (III.3) la resistivi--dad de muchos terrenos se puede ver notablemente influida por su contenido de humedad. Lo cual indica que a mayor humedad del terreno habrá una menor resistividad en el -- mismo. La resistividad experimenta un ligero aumento al disminuir la humedad en un 15%. Por debajo de este valor, la resistividad aumenta rápidamente a medida que el por--centaje de humedad disminuye:

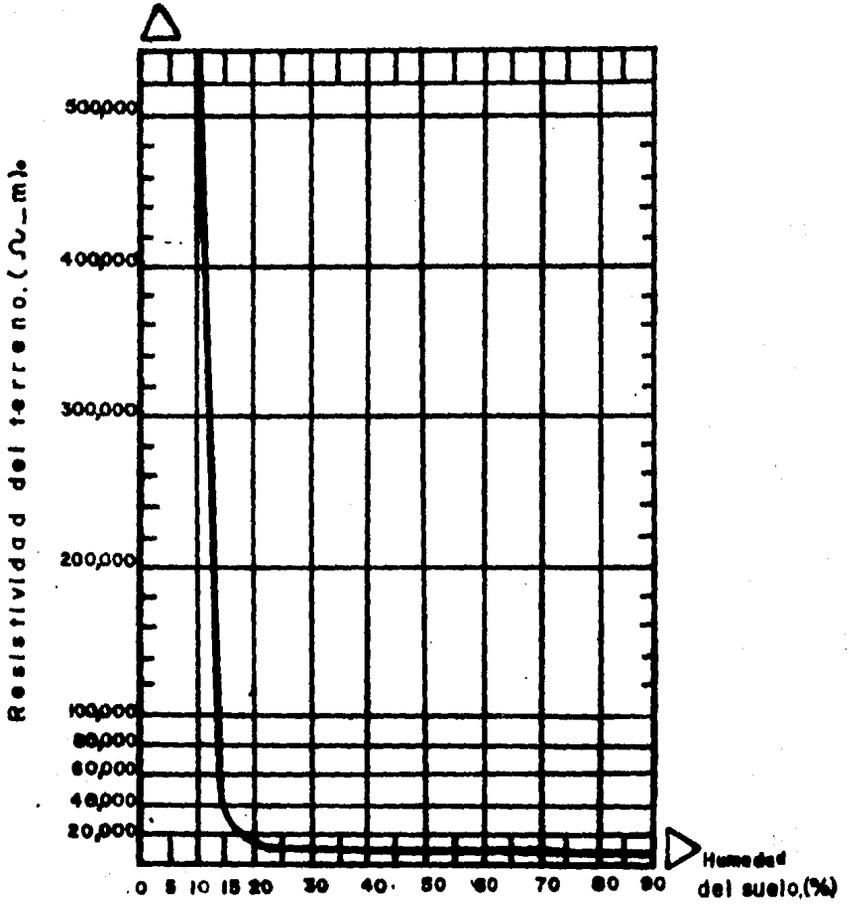


FIG III- 3 Variacion de la resistividad de un suelo con su contenido de Humedad. Arcilla Roja.

### III.3.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA.

Se puede observar en la gráfica (III.4) que la resistividad aumenta lentamente a medida que la temperatura -- descende hasta 0°C; por debajo de este punto, la resistividad crece rápidamente al descender aún más la temperatura. Es por esta razón que muchas veces será conveniente profundizar las tomas de tierra hasta encontrar capas de terreno situadas bajo zona susceptibles de congelación en las estaciones frías.

### III.3.4 TRATAMIENTO DEL SUELO.

La resistividad del suelo de una toma de tierra se puede reducir del 15 al 90 por ciento, dependiendo de la clase y textura del suelo; se puede realizar por medio de tratamientos de productos químicos. Para este propósito se suministra una buena cantidad de productos químicos apropiados, tales como: cloruro de sodio, sulfato de magnesio, sulfato de cobre y cloruro de calcio.

Dentro de estos tratamientos, el más utilizado, es el tratamiento de sal común, la cual actúa sobre el agua haciéndola mejor conductora, y además, a causa de ser una

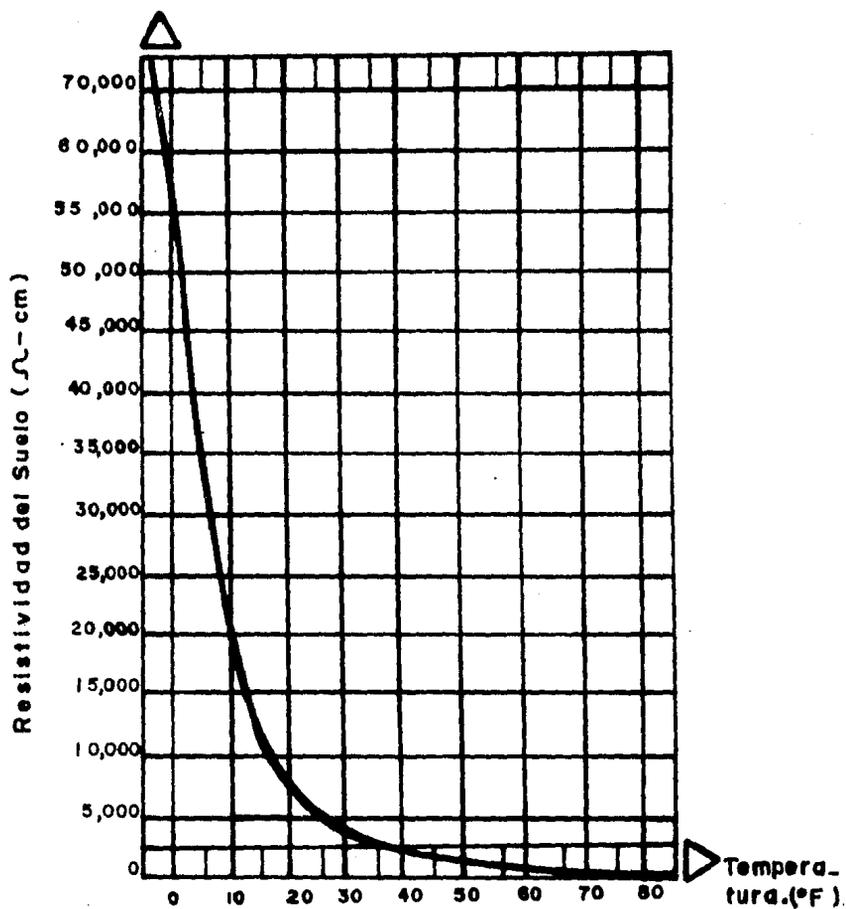


FIG. III-4 Variación con la temperatura de la resistividad de un terreno. Arcilla Roja, 18% de Humedad.

sustancia higroscópica, la sal retiene la humedad del terreno.

Generalmente el tratamiento químico se aplica en la trinchera donde se alojan los electrodos, de tal manera - que exista un buen contacto; tierra-electrodo.

El tratamiento deberá renovarse periódicamente dependiendo de la naturaleza, el tratamiento químico y de las características del terreno.

#### III.4 VALORES PRACTICOS DE LA RESISTIVIDAD.

Con el propósito de dar una idea de los valores de resistividad del terreno se dan los siguientes valores -- aproximados en las tablas; (1), (2), (3) y (4).

#### III.5 DETERMINACION DE LA MAXIMA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA.

Generalmente los estudios que se realizan de circuito corto se refieren a fallas ocasionadas de línea a tierra o fallas trifásicas, esto se refiere a que la primera tiene mayor probabilidad de ocurrencia y la segunda es la

TABLA ( 1 )  
RESISTIVIDAD PROMEDIO DE LA TIERRA

T E R R E N O	RESISTIVIDAD $\Omega$ - CM		
	PROMEDIO	MINIMO	MAXIMO
RELLENOS (CENIZAS, ESCORIAS, DESECHOS SALINOS)	2370	590	7 000
ARCILLAS, ESQUISTOS, SUELOS ARCILLOSOS, MARGAS.	4060	340	16 300
MISMOS, CON CANTIDADES - VARIABLES DE ARENA Y GRAVA.	15800	1020	135 000
GRAVAS, ARENAS, PIEDRAS CON PEQUEÑO CONTENIDO EN ARCILLA O MARGA.	94000	59000	458 000

TABLA ( 2 ) EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA.

T E R R E N O	RESISTIVIDAD $\Omega$ - CM
HUMEDO O SUELO ORGANICO	10 - 50
DE CULTIVO ARCILLOSO	100
TIERRA ARENOSA HUMEDA	200
TIERRA ARENOSA SECA	1000
TIERRA CON GUIJARROS Y CEMENTO	1000
SUELO ROCOSO	3000
ROCA COMPACTA	10000

TABLA ( 3 )

EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA

TEMPERATURA	RESISTIVIDAD
C°	$\Omega$ - CM
20	7 200
10	9 900
0 (agua)	13 800
0 (hielo)	30 000
-5	79 000
-15	330 000

TABLA (4)

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

CONTENIDO DE HUMEDAD EN % DEL PESO	RESISTIVIDAD EN $\Omega$ -CM SUELO SU PERFICIAL	ARENA MOLDEABLE
0	$1000 \times 10^6$	$1000 \times 10^6$
2.5	250 000	150 000
5	165 000	43 000
10	53 000	18 500
15	1 000	10 500
20	12 000	6 300
30	6 400	4 200

que puede someter a los equipos, máquinas y aparatos al esfuerzo severo desde el punto de vista térmico y dinámico.

Sin embargo, por los fines de este trabajo, se analizará únicamente la falla de línea a tierra debido a la razón antes mencionada.

El método empleado para hacer un estudio de circuito corto en particular depende de varios factores, tales como:

- Tamaño del sistema bajo estudio.
- Precisión de los datos buscados.
- Aplicación de los datos obtenidos.

Los métodos más usuales para hacer un estudio de --- circuito corto son:

- 1) Método de los componentes simétricos.
- 2) Método del bus infinito.
- 3) Método de las potencias o de los MVA.

De estos tres métodos se debe considerar como inadecuado el método del bus infinito, ya que solo analiza la falla trifásica (Diagrama de secuencia positiva). Enton-

ces, se puede disponer de los métodos de componentes simétricas y de los MVA. Se recomienda el primero para sistemas industriales de capacidad considerable donde la precisión de los datos buscados es un factor muy importante, y el de los MVA para sistemas de capacidad mediana y pequeña.

Debemos hacer notar que los sistemas porcentual, ohmico o por unidad no son métodos de cálculo, sino formas de representar las impedancias de los elementos de un sistema.

El sistema ohmico generalmente no se usa debido a la dificultad de convertir ohms de una tensión a otra sin error y porque todos los pequeños números que hacen difícil un cálculo rápido y preciso. Debido a esto, son más usuales los sistemas porcentual y por unidad. Nosotros para nuestro ejemplo de diseño de un sistema de conexión a tierra utilizaremos el sistema por unidad debido a las ventajas que se tienen sobre el sistema porcentual:

Un sistema por unidad es un medio de expresar al número para facilitar su comparación con otros. Un valor --

por unidad es una relación:

$$\text{Por unidad} = \frac{\text{un número}}{\text{número base}}$$

Las ventajas que presenta el sistema por unidad sobre el sistema porcentual son las siguientes:

1) Se considera que los elementos de un sistema pueden variar en tamaño, tienen caídas de tensión y existen pérdidas de potencial. Todas estas variaciones se pueden representar fácilmente bajo el sistema por unidad.

2) Al usar el factor  $\sqrt{3}$  en el cálculo de sistemas trifásicos, y empleando valores en por unidad se reduce considerablemente el cálculo.

3) Generalmente en todos los sistemas eléctricos se tienen diferentes niveles de tensión y de potencia; y además, diferentes impedancias y reactancias. Para tratar de uniformizar todos estos valores, se puede emplear el sistema por unidad reduciendo, de esta manera, el trabajo.

4) Cuando se analizan sistemas de potencia interconectados el análisis de la corriente de circuito corto se

dificulta manualmente. Es necesario, introducir herramientas auxiliares como la computadora. El método por unidad facilita la introducción de datos al programa.

Como no es el propósito de esta tesis profundizar en el análisis de los diferentes métodos que se aplican para la obtención de la máxima corriente de falla a tierra; -- mencionamos a continuación uno de los métodos convencionales (método de los componentes simétricos) del cual el ingeniero proyectista podrá hechar mano, para determinar corriente de falla a tierra:

$$I_f = \frac{3 E}{3R + 3R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + (X_1 + X_2 + X_0)} \text{ Amperes (III.3)}$$

En la mayoría de los casos, los valores de la resistencia, resultan insignificantes, por lo que la ecuación anterior se puede reducir como sigue:

$$I_f = \frac{3 E}{X_1 + X_2 + X_0} \text{ Amperes (III.4)}$$

Donde:

$I_f$  = Valor de corriente simétrica de falla a tierra al instante del inicio de la falla (amperes).

$E$  = Voltaje fase neutro (volts).

$R$  = Resistencia estimada a tierra del sistema local de tierras ( $\Omega$ ).

$R_f$  = Resistencia mínima estimada de la falla misma - ( $\Omega$ ).

$R_1$  = Resistencia de secuencia positiva ( $\Omega$  -fase).

$R_2$  = Resistencia de secuencia negativa ( $\Omega$  -fase).

$R_0$  = Resistencia de secuencia cero ( $\Omega$  -fase).

$X_1$  = Reactancia de secuencia positiva ( $\Omega$  -fase).

$X_2$  = Reactancia de secuencia negativa ( $\Omega$  -fase).

$X_0$  = Reactancia de secuencia cero ( $\Omega$  -fase).

Se recomienda agregar el sistema eléctrico en cuestión nuevas cargas y capacidades ya que si no se toma una providencia el sistema puede dejar de ser seguro, y además, cualquier modificación posterior puede resultar muy costosa; es por esta razón que se aconseja aplicar un aumento de carga para el sistema que se esta diseñando.

### III.5.1 FACTOR DE DECREMENTO. COMPENSACION POR EFECTO DE CORRIENTE DIRECTA.

En general, los cortos circuitos coinciden casualmente con la onda de tensión. Por otra parte, el choque de contacto puede existir en el momento en que la falla se inicia. Por lo tanto, en las más severas condiciones se debe asumir un 100% de compensación por onda asimétrica de corriente de falla a tierra, por la duración del choque. Ya que los datos experimentales en el umbral de la fibrilación están basados en ondas senoidales simétricas de amplitud constante, es necesario para determinar un valor eficaz (RMS) de una onda de corriente senoidal simple "I", que es equivalente a la más compleja onda de corriente de falla asimétrica. Este valor "I" puede ser determinado como sigue:

$$I = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i_f^2 dt_1} = D_e I'' \text{-----(III.5)}$$

$$D_e = \frac{1}{I''} \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i_f^2 dt_1} \text{-----(III.6)}$$

DONDE:

I = Valor compuesto eficaz de la corriente de falla a tierra, en amperes asimétricos, para aplicación en cálculos.

t = Tiempo de duración de la falla (y, por lo tanto, del choque en segundos)

t<sub>1</sub> = Tiempo transcurrido a partir de la iniciación de la falla, en segundos.

i<sub>f</sub> = Valor eficaz de la corriente de falla a tierra, al tiempo de "t"

segundos después de iniciación de la falla.

$D_e$  = Factor de la multiplicación, en lo posterior llamada factor de decremento, para considerar el -- desfasamiento por efecto de la corriente directa y la atenuación de corriente alterna y las componentes tránsitorias por corriente directa de la corriente de falla.

El valor de la integral anterior depende del valor de atenuación por ambas componentes de C. A y C. D, y la solución completa es verdaderamente compleja.

La solución al problema anterior fue dado a conocer por las normas American Standard C 37.5, las cuales establecen un método simplificado para determinar el valor eficaz (RMS) de corriente, para tiempos después de iniciada la falla, usando multiplicadores. Por ejemplo el multiplicador de American Standard, para el final de la primera media onda (primer medio ciclo) es 1.6 y así sucesivamente, 1.4, 1.2, 1.1, 1.0, para tiempos 1,2,3 y 4 ciclos respectivamente.

Igualmente si aplicamos una solución similar para la

ecuación (III.6), tendríamos los factores de decremento dados en la siguiente tabla:

TABLA (No. 5)

Duración de choque y de la falla. (Seg.)	ciclos (60HZ.C.A.)	Factor de decremento
0.008	1/2	1.65
0.1	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 ó más	30 ó más	1.00

Para valores intermedios de duración de la falla, -- los factores de decremento se pueden obtener por interpolación.

Se deberá tener presente que la corriente de falla - en el secundario de un transformador puede ser mayor que la corriente de falla en el primario. En tal caso se deberá adoptar la de mayor valor para efectos de cálculo.

### III.5.2 EFECTOS DE FUTUROS CAMBIOS.

Es común agregar a cualquier sistema nuevas cargas y capacidades, y si no se toman las providencias necesarias pertinentes para el diseño: Un sistema puede dejar de ser

seguro, y además cualquier modificación posterior puede resultar muy cara; por lo tanto, se recomienda estudiar esta posibilidad y prever un aumento de cargas para un sistema que se esté diseñando, así mismo tomar en consideración este aumento al inicio de la operación del sistema, puesto que la impedancia puede reducirse.

### III.5.3 METODOS RECOMENDADOS PARA LIMITAR EL VALOR DE LA CORRIENTE DE FALLA.

- 1) Instalación de transformadores en paralelo; el arreglo es más costoso, aunque se obtiene mayor flexibilidad en el sistema.
- 2) Aumento de la tensión de distribución.
- 3) Selección de transformadores con alta impedancia.
- 4) Instalación de reactores en los tableros de distribución, pero no en los transformadores. La desventaja de este método es el alto costo de este tipo de equipo.

### III.6 RESISTENCIA DE TIERRA.

La resistencia ideal de las tomas de tierra es cero. Siendo 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. Pero de ante\_ mano sabemos que es imposible hacer una toma de tierra ce\_ ro, ni aún disponiendo de grandes recursos económicos y - de trabajo.

Aunque es difícil saber cual es la resistencia ade\_ cuada de una toma de tierra se recomienda siempre un va\_ lor pequeño.

Debido a la resistencia de tierra, la corriente que\_ circula por ella da lugar a un aumento de tensión en el - equipo conectado a la toma, en relación con puntos distan\_ tes, y a gradientes de potencial eléctrico en sentido ho\_ rizontal sobre la superficie de la tierra, especialmente\_ en las cercanías del sistema de tierras. Ambas circunstan\_ cias representan un peligro de choque eléctrico para el - personal y de daño en el aislamiento del equipo. Estos - peligros son menores si se reduce la resistencia de las -

tomas, lo cual, es imposible de eliminar por completo.

En la gran mayoría de los casos, es suficiente con encontrar la corriente de falla a tierra mediante la ecuación (III.4) con los valores de las reactancias, desechando la resistencia del sistema, la resistencia del terreno y la resistencia de falla. El error así provocado es pequeño y siempre dentro de los márgenes de seguridad.

Cuando la resistencia es mayor, en relación con la reactancia, entonces debe tomarse en cuenta y utilizar la ecuación (III.3).

Para efectos prácticos, la resistencia del terreno requerida para la red de tierras de una subestación, una vez que la resistividad ha sido determinada, depende del terreno y del área que va a ser ocupada por la red, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_t = \frac{\rho}{4r} \quad \text{---} \quad \text{(III.7)}$$

Donde:

$R_t$  = Resistencia del terreno en ohms.

$\rho$  = Resistividad promedio del terreno en ohms-metro

$r$  = Radio equivalente en metros, de un círculo que cubre la misma área que la ocupada por la red.

Dado que el área del círculo es:

$$A = \pi r^2 \text{ ----- (III.8)}$$

Despejando  $r$  de (III.8)

$$r = \frac{A}{\pi} \text{ ----- (III.9)}$$

$$r = 0.564 \sqrt{A} \text{ ----- (III.10)}$$

Sustituyendo (III.10) en (III.7) la resistencia de tierra se puede expresar de la forma siguiente:

$$R_t = \frac{\rho}{4 (0.564 \sqrt{A})} \text{ ----- (III.11)}$$

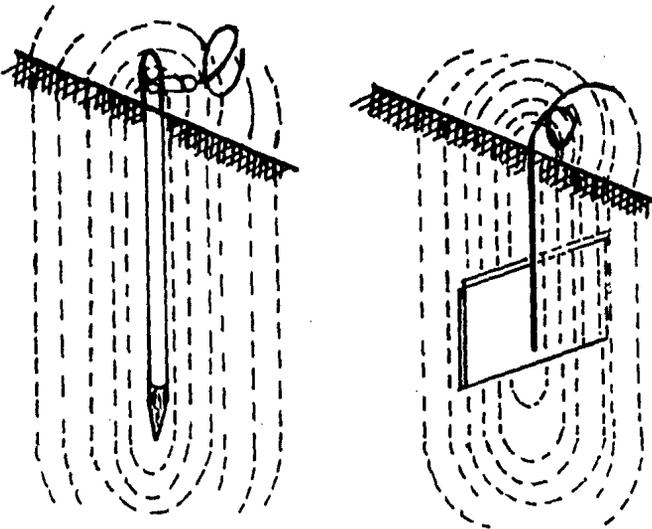
### III.7 GRADIENTE DE POTENCIAL.

Cuando un dispensor de tierra conduce una corriente eléctrica se establece en torno al mismo una zona de potencial no nula, llamada zona de influencia. La forma de esta zona de influencia dependerá de la forma del electrodo, y su extensión corresponderá a la corriente que condu

ce el dispersor y a la resistividad del terreno.

Suponiendo que unieramos entre sí todos los puntos que durante el funcionamiento del dispersor se encuentran al mismo potencial obtendríamos superficies equipotenciales, como muestra la fig. (III.3).

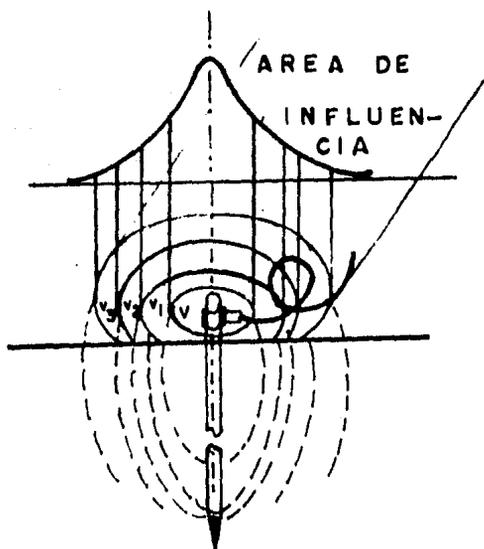
La zona de influencia del dispersor quedará definida por los puntos en los que ya no resulta prácticamente medible una diferencia de potencial con el terreno circundante.



**FIGURA III.3**

El área de la superficie del terreno comprendida dentro de la zona de influencia, fig. (III.3) asume una importancia práctica enorme ya que durante el funcionamiento del dispersor dentro del área de influencia se pueden manifestar, como veremos a continuación, peligrosos para la seguridad de las personas.

Como ya dijimos, el potencial eléctrico se distribuye en el terreno que circunda un dispersor de tierra siguiendo un orden que depende de la naturaleza del terreno y de la forma del electrodo, todo el terreno que circunda al electrodo será pues, asiento de un campo eléctrico cuya in-



**FIGURA III-4**

tensidad quedará medida en cada punto del gradiente de potencial. Se define con este término a la relación entre una variación de tensión y la correspondiente variación de distancia, para variaciones tendiendo a cero.

Evidentemente el gradiente de potencial de un determinado tipo de electrodo y en correspondencia a una determinada corriente dispersa hacia tierra será tanto mayor cuanto más baja sea la conductividad del terreno que rodea al electrodo. Por el contrario en un terreno determinado y para un electrodo en particular, el gradiente de potencial será tan

to más elevado cuanto mayor sea la corriente conducida a tierra. Por lo tanto, y tomando en consideración lo antes mencionado la corriente "I" dispersa por medio del conductor no es uniforme para toda la malla; ésta aumenta llegando a valores de 2 ó 3 veces superiores, apartándose del centro contra la periferia y aumentando entonces las tensiones de paso y de contacto. Tal hecho deberá tenerse en cuenta con la relación a las medidas que se deben adoptar para eliminación de gradientes de potencial peligrosos en la periferia de la red.

El gradiente en la superficie y en la periferia de la malla, está determinado por la siguiente ecuación:

$$G_p = \frac{4 I_f P}{D^2} \quad \text{Volts/M} \quad \text{----- (III.12)}$$

DONDE:

D = Diagonal de la superficie ocupada por la malla, expresada en metros.

$G_p$  = Gradiente de potencial

$I_f$  = Corriente de falla a tierra

$P$  = Resistividad del terreno.

Para disminuir el riesgo derivado de eventuales gradientes peligrosos, se recomiendan algunas soluciones tales como:

- 1) Aumentar la resistencia superficial del terreno - agregando piedra de roca sobre la superficie de la malla antes del piso colado.
- 2) Aumentar el área de contacto del cobre de la malla con el suelo, siempre que el terreno lo permita.
- 3) Limitar la corriente de corto circuito a tierra - mediante elementos limitadores de corriente como es el caso de los reactores ó resistencias diseñadas para este fin.

## CAPITULO IV

ANALISIS PRELIMINAR PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

### IV.1 GENERALIDADES.

Las subestaciones deben contar con un adecuado sistema de tierras, al cual se deben conectar todos los elementos de la instalación que requiera dicha conexión, siendo de suma importancia obtener un valor de resistencia de tierra tan bajo como sea posible a fin de asegurar tensiones de paso y de contacto dentro de los límites máximos permisibles por las disposiciones de seguridad.

Estas condiciones de seguridad se pueden obtener con la colocación de una malla de conductores (Red de tierras).

En este capítulo estudiaremos el sistema de tierras más común utilizado en las subestaciones de las compañías suministradoras de energía eléctrica y en las industrias que consumen dicha energía.

## IV.2 RED DE TIERRAS.

La red o malla de tierras esta básicamente formada por conductores que se encuentran horizontalmente enterrados en la tierra a una profundidad que usualmente varía entre 0.5 mts. y 1 mt. Esta práctica es la más común y que ofrece muchas ventajas; tales como las que mencionamos a continuación:

- 1) Proporciona un circuito de muy baja impedencia para la circulación de las corrientes de tierra, ya sean debido a una falla a tierra del sistema eléctrico o a la operación de un apartarrayos.
- 2) Evita que, durante la circulación de las corrientes de tierras, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de una Subestación (ya sea sobre el piso o con respecto a partes metálicas puestas a tierra), que puedan ser peligrosas para el personal.
- 3) En una Subestación, un solo conductor no es suficiente para proporcionar la conductividad neces-

ria, y si a esto hay que agregarle la conexión de estructuras, motores, maquinaria, etc, una red resulta además de ideal, elemental. Si está bien en terrada y con varillas suficientes, es por sí misma un excelente sistema de tierras.

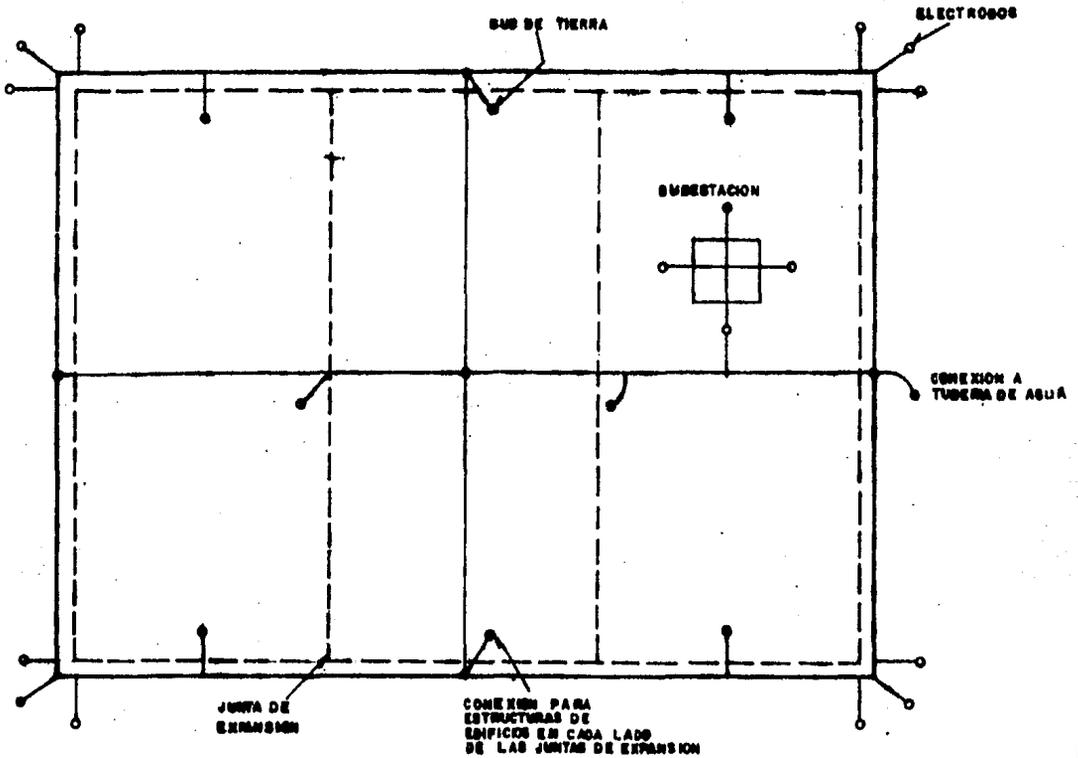
Se recomienda que un cable continuo forme el perímetro exterior de la malla, con una separación de 3 a 5 mts. de la pared exterior y tomando en cuenta las concentraciones de carga, la malla quedará constituida por cables colocados paralela y perpendicularmente con un espaciamiento razonable. En lo que sea posible, los cables que forman la malla deben colocarse a lo largo de hileras de estructuras o equipo, para facilitar la conexión a los mismos.

Es importante también 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, clavados verticalmente. Donde sea posible, se recomienda construir registros en los mismos puntos.

Cabe hacer la aclaración, que el exceso de cruces de

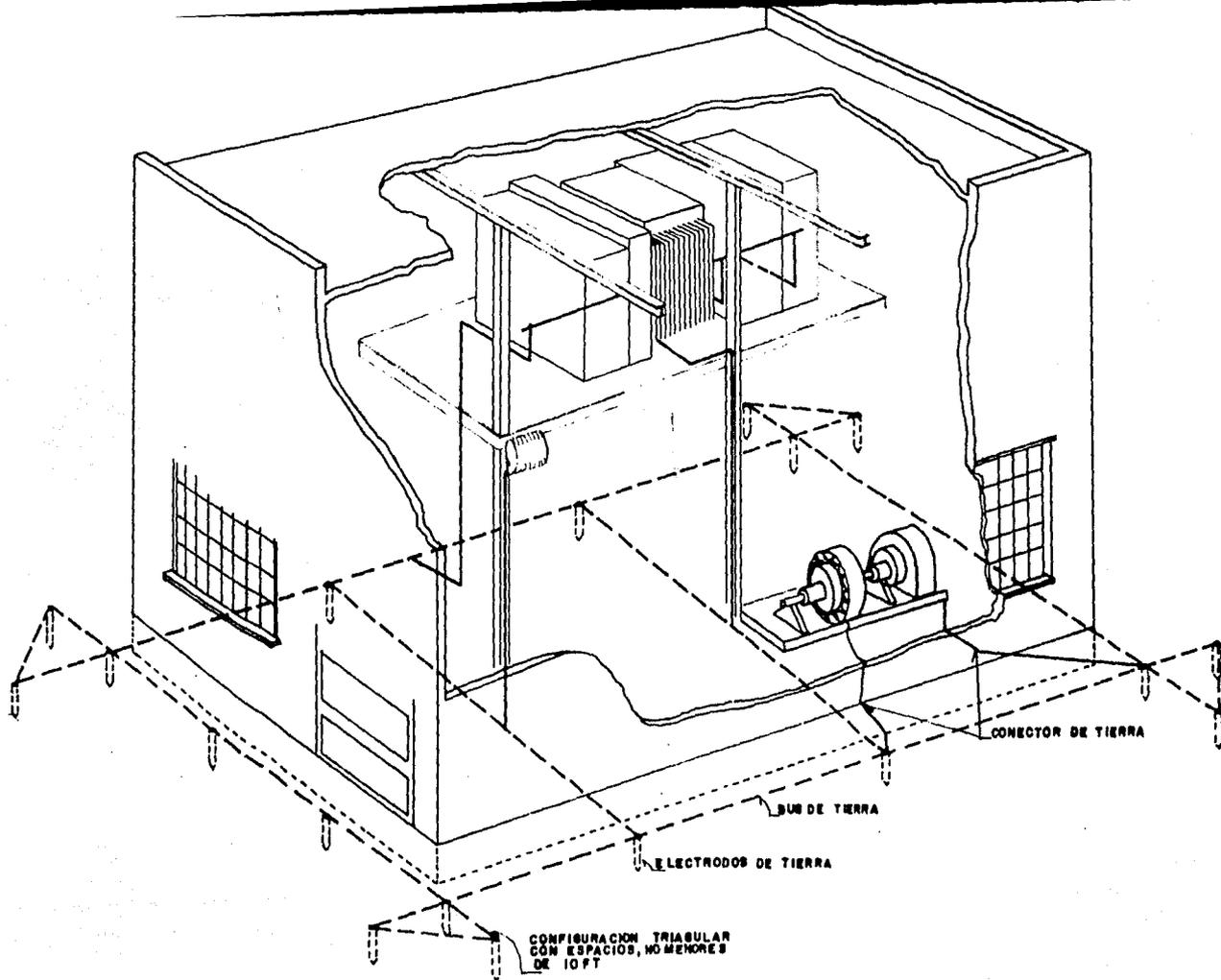
cables y conexiones, reduce la eficiencia del sistema, puesto que en cada conexión se agregan resistencias de contacto.

Una red típica se muestran en las siguientes figs. (IV.1), (IV.2), - (IV.3).

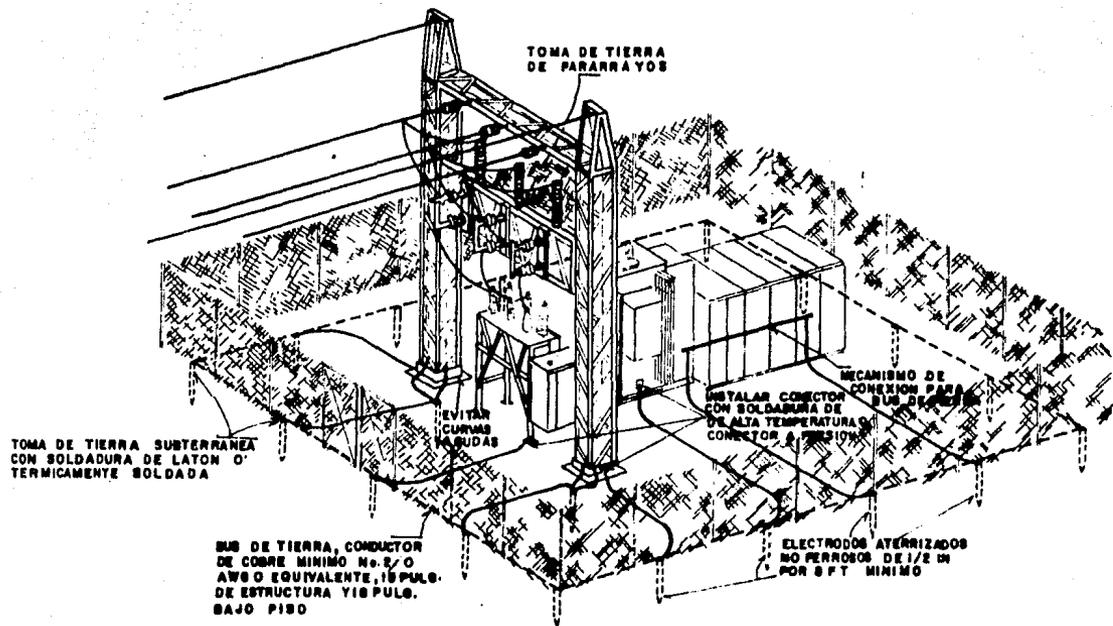


BUS DE TIERRA TÍPICO

FIGURA IV-1



SISTEMA DE TIERRA (TÍPICO) PARA EDIFICIOS Y EQUIPO ELÉCTRICO  
**FIGURA IV·2**



SISTEMA DE TIERRA PARA SUBESTACIONES  
TIPO INTEMPERIE

FIGURA IV-3

### IV.3 CONDUCTORES DE LA RED DE TIERRAS.

Si el sistema de dispersión consiste en una malla o red de tierra, que es el caso que nos interesa por ser el más idóneo y el que nos lleva a referir durante este trabajo: Esta debe ser diseñada bajo las siguientes condiciones:

- 1) Para resistir fusión o deterioro de juntas eléctricas, bajo las condiciones más severas de: combinación de magnitudes de corrientes de falla y duración de falla, a las cuales puede estar sujeta.
- 2) Alto grado de rigidez mecánica, especialmente en lugares expuestos a daños físicos.
- 3) Tener suficiente conductividad de modo que no contribuya a formar diferencias de potencial locales peligrosas.

Para cumplir los requerimientos antes mencionados, haremos uso de la ecuación desarrollada por Omderdonk, la cual nos dá a conocer el calibre mínimo del conductor de

cobre y sus uniones resistentes a fusión:

$$I = S \sqrt{\frac{\text{Log} \left( \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{33 t}} \quad \text{--- (IV.1)}$$

Donde:

I = Corriente en amperes.

S = Sección transversal del conductor de cobre en --  
circular mil.

t = Tiempo en segundos de duración de la falla.

T<sub>m</sub> = Máxima temperatura permisible en °C.

T<sub>a</sub> = Temperatura ambiente en °C.

Para la aplicación de esta ecuación, haremos las siguientes consideraciones;

--- Temperatura ambiente 40 °C.

--- Temperatura permisible en uniones mecánicas --  
450 °C.

--- Temperatura permisible en uniones soldables --  
250 °C.

--- Punto de fusión del cobre 1083 °C.

...

La tabla (6) muestra algunos valores de la ecuación de los conductores requeridos y que fueron obtenidos de la ecuación (IV.1).

Se dice que se tiene un C.M. (circular mil) cuando el área transversal tiene un diámetro de una milésima de pulgada. (0.001 INCH).

**TABLA (No. 6 )**

<b>CALIBRE MINIMO DEL CONDUCTOR PARA EVITAR FUSION</b>			
<b>TIEMPO DE DURACION DE LA FALLA</b>	<b>CIRCULAR MILLS</b>		
	<b>POR AMPERE</b>		
	<b>CABLE SOLO</b>	<b>CON UNIONES MECANICAS</b>	<b>CON UNIONES SOLDABLES</b>
<b>30 SEGS.</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>65</b>
<b>4 SEGS.</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>24</b>
<b>1 SEGS.</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>12</b>
<b>0.5 SEGS.</b>	<b>5</b>	<b>6.5</b>	<b>8.5</b>

La relación entre el circular mil y el área en  $\text{mm}^2$  para un conductor se obtiene como sigue:

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

$$\frac{1}{1000} \text{ in} = 0.0254 \text{ mm.}$$

Siendo el circular mil un área:

$$1 \text{ C.M.} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.0254)^2}{4} = 5.06450 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$$

De donde:

$$1 \text{ MM}^2 = \frac{10^4}{5.064506} = 1974 \text{ C.M.}$$

en forma aproximada:

$$1 \text{ MM}^2 = 2000 \text{ C.M.}$$

Para conductores con un área mayor del designado como 4/0, se hace una designación que está en función de su área, para lo cual se emplea la unidad denominada el Circular Mil, siendo así como un conductor de 250 M. C.M. Corresponderá a aquel cuya sección es de 250 000 C.M. y así sucesivamente.

En la tabla (7) se indican las dimensiones de los conductores eléctricos desnudos.

TABLA (No. 7 )

CALIBRE A.W.G M.C.M	SECCION		DIAMETRO	
	C.M	MM <sup>2</sup>	PULGS.	MM
20	1022	0.5176	0.03196	0.812
18	1624	0.8232	0.04030	1.024
16	2583	1.3090	0.05082	1.291
14	4107	2.0810	0.06408	1.628
12	6530	3.3090	0.08081	2.053
10	10380	5.2610	0.1019	2.588
8	16510	8.3670	0.1285	3.264
6	26250	13.3030	0.1620	4.115
4	41740	21.1480	0.2043	5.189
2	66370	33.6320	0.2576	6.543
1	83690	42.4080	0.2893	7.348
0	105500	53.4770	0.3249	8.252
00	133100	67.4190	0.3648	9.268
000	167800	85.0320	0.4098	10.403
0000	211800	107.2250	0.4600	11.684

## CONTINUA TABLA (No. 7 )

CALIBRE		SECCION		DIAMETRO	
A. W. G		C. M	MM <sup>2</sup>	PULGS.	MM
M. C. M					
250			1 26.644	0.575	14.605
300			1 51.999	0.630	16.002
350			1 77.354	0.681	17.297
400			2 02.709	0.728	18.491
500			2 53.354	0.814	20.675
600			3 03.999	0.893	22.682
700			3 54.708	0.964	24.685
750			3 79.837	0.998	25.349
800			4 05.180	1.031	26.187
900			4 55.805	1.093	27.762
1 000			5 06.450	1.152	29.260
1 250			6 33.063	1.289	32.741
1 500			7 59.677	1.412	35.865
1 750			8 86.286	1.526	38.760
2 000			1 012.901	1.631	41.467

Otra ecuación de la cual se puede hacer uso para calcular al conductor de tierra y que nos ofrece un buen margen de seguridad cuando se desconocen las condiciones anteriores. Es aquella en la que en el cálculo intervienen únicamente la corriente de falla a tierra y la densidad de la corriente del material usado, es decir:

$$S = \frac{I}{\delta} \text{ ----- (IV.2)}$$

Donde:

S = Sección transversal del conductor en  $\text{MM}^2$ .

I = Corriente de falla a tierra en AMP.

$\delta$  = Densidad de corriente en  $\text{AMP}/\text{MM}^2$ .

Empleandose las siguientes expresiones:

$$S = \frac{I}{160} \text{ (Con un mínimo de } 16 \text{ MM}^2\text{) para conductores de cobre.}$$

$$S = \frac{I}{100} \text{ (Con un mínimo de } 35 \text{ MM}^2\text{) para conductores de aluminio.}$$

$$S = \frac{I}{60} \text{ (Con un mínimo de } 50 \text{ MM}^2\text{) para conductores de acero.}$$

Para la conexión a tierra de los apartarrayos la sec

cción de los conductores no debe ser inferior a los siguientes valores:

$$S = 24 + 0.4 E \text{ (MM}^2\text{)} \text{ para conductores de cobre.}$$

$$S = 40 + 0.6 E \text{ (MM}^2\text{)} \text{ para conductores de aluminio.}$$

DONDE:

E = Tensión nominal del apartarrayos en KV.

S = Sección transversal del conductor en MM<sup>2</sup>.

#### IV.3.1 RIGIDEZ MECANICA.

Las normas de instalación recomiendan generalmente el uso de cables de calibre 1/0 A.W.G. para juntas mecánicas y 2/0 A.W.G. para juntas soldables. Para procedimientos prácticos se ha adoptado el uso de cable 4/0 A.W.G. como mínimo, en instalaciones industriales.

Lógicamente el propio cálculo nos indicará el calibre necesario, aunque en ciertos casos es necesario adoptar calibres menores, en brazos derivados de la red principal, procurando que las condiciones de trabajo no los dañen.

#### IV.3.2 MATERIAL DEL CONDUCTOR.

La mayor parte de los conductores empleados en los sistemas de tierra estan hechos de cobre que es el material con mayor conductividad y con un costo suficientemente bajo como para que resulte económico; teniendo como características la alta conductividad, gran resistencia mecánica y se corroe muy poco en contacto con la tierra.

Existen tres tipos de conductores según su temple:

1) Conductores de cobre suave o recocado.

Por su misma suavidad, tienen baja resistencia mecánica, alta elongación, su conductividad eléctrica es del 100%.

Usos.- Con o sin aislamiento protector, se utilizan en instalaciones tipo interior, dentro de ductos, tubos conduit, engrapados sobre muros.

2) Conductores de cobre semiduro.

Tienen mayor resistencia mecánica que los conductores de cobre suave, menor elongación y su conductividad eléctrica es de aproximadamente 96.66%,

...

USOS.- Sin aislamiento protector, para líneas de - -  
transmisión con distancias interpostales, pa-  
ra redes de distribución y para sistemas de -  
tierras.

### 3) CONDUCTORES DE COBRE DURO.

USOS.- Se utilizan normalmente en líneas de transmi-  
sión aéreas.

## IV.4 LONGITUD DEL CONDUCTOR REQUERIDO PARA EL CONTROL DE GRADIENTE DE POTENCIAL.

Para conocer la longitud total del conductor de la -  
malla que nos permita conservar los valores de seguridad\_  
en un sistema de conexión a tierra; utilizaremos para es-  
te cálculo los voltajes de contacto, en lugar de los de -  
paso o transferencia por las siguientes razones:

- 1) Los voltajes de paso en instalaciones industria--  
les, son menores que los de contacto. Las resis-  
tencias de tierra estan en serie y no en paralelo;  
por lo tanto limitan mejor la corriente al cuerpo.

- 2) Los voltajes inducidos o transferidos son más difíciles de limitar y requiere de aislamientos u otro tratamiento para lograrlo.

Por lo general se escogen las tensiones de contacto de estructuras conectadas a tierra al centro del rectángulo de la malla, en lugar de las tensiones de contacto a una distancia horizontal de un metro del cable de la malla, ya que existen grandes posibilidades de que el objeto tocado a distancias superiores a un metro, esté conectado directa o indirectamente a la malla.

Definimos la tensión de malla como la diferencia de potencial, expresada en volts, del conductor de la malla y la superficie del terreno al centro del rectángulo de la malla, por lo general es un valor superior a las tensiones de toque a un metro de distancia del conductor de la red.

Para valores comunes de conductor, electrodos, profundidad y espaciamiento; Laurent estableció en forma aproximada que los valores de las tensiones de paso, contacto y malla serian del orden:

$$E \text{ paso} = 0.1 \text{ a } 0.15 \rho i \text{ ----- (IV.3)}$$

$$E \text{ Contacto} = 0.6 \text{ a } 0.8 \rho i \text{ ----- (IV.4)}$$

$$E \text{ Malla} = \rho I \text{ ----- (IV.5)}$$

De donde:

$i$  = Es la corriente en amperes por cada metro del conductor enterrado ( $i = I/L$ ) que fluye a tierra.

Las fórmulas anteriores son aproximadas y para tomar en cuenta la profundidad de enterramiento, la irregularidad en el flujo de la corriente en partes diferentes de la red, el diámetro de los conductores y su espaciamiento puede usarse la siguiente ecuación:

$$E \text{ Malla} = K_m K_i \rho \frac{I}{L} \text{ --- (IV.6)}$$

De donde:

$K_m$  = Coeficiente que toma en cuenta el efecto del número de conductores paralelos "n", El espaciamiento "d", el diámetro "D", y la profundidad de enterramiento "h" de los conductores que for

...

man la red,

Este valor en término de los factores mencionados, es como sigue:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{\rho^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{7}{8}\right) \dots \text{etc.} \right]$$

(IV.7)

El número de factores en el segundo término, es dos veces menos que el número de conductores en paralelo en la red básica, excluyendo las conexiones de cruces.

$K_i$  = Factor de corrección por irregularidades, para tomar en cuenta el flujo de corriente no uniforme de partes diversas de la red. (Ver tabla 8)

El valor de " $K_i$ " puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$K_i = 0.65 + 0.172n \text{ ----- (IV.8)}$$

$n$  = Número de conductores en paralelo en la malla, excluyendo las conexiones de cruces.

$\rho$  = Es la resistividad promedio del terreno en ohmsmetro.

$I$  = Es la corriente máxima (RMS) en amperes, que fluye entre la red de tierras y la tierra, ajustada por los factores de decremento y de ampliación futura.

$L$  = Longitud total del conductor enterrado en metros.

#### IV.4.1 FACTOR DE UNIFORMIDAD " $K_i$ ".

Con respecto al factor de uniformidad " $K_i$ " se puede decir lo siguiente: En algunos casos para los cálculos, la información se toma bajo las condiciones ideales tales como la uniformidad del suelo, redes simétricas compuestas por mallas cuadradas o rectangulares de tamaño uniforme, pero aún para estas redes ideales, la corriente que fluye por la red variará, encontrándose que es más alto que el flujo en los lados que en el centro y aún más en las esquinas, con lo que los gradientes de potencial varían directamente.

En las instalaciones prácticas, es difícil conformar estas idealizaciones, por lo que es necesario considerar factores que tomen en cuenta estas irregularidades y ana-

lizar su modo de operar. En la tabla 8 se ilustran los -- efectos de las disposiciones de las mallas dentro de la - Subestación, en estas tablas se representan los resulta-- dos de las pruebas realizadas por Koch, al analizar va- - rias configuraciones de redes.

Otro factor que podría afectar la exactitud de los - resultados, es la no uniformidad de la resistividad del - suelo. Si la resistividad de la superficie es menor que - las capas profundas, esto permitirá que sea más conductor que las capas de abajo, de tal manera que la corriente de falla podría canalizarse por la superficie, lo opuesto po dría lograrse si las capas profundas son más conductoras, especialmente cuando la red hace contacto efectivo con és tas.

Si la resistividad usada en los cálculos es cercana\_ al valor medio afectivo del área, las variaciones locales de los potenciales podrían en parte ser compensados ya -- que las corrientes tienden a fluir por las áreas de más - baja resistividad y por esto mismo se logra también una - tensión de paso más baja. Por otro lado, los cambios - -

bruscos en la resistividad del suelo podrían traer consigo resultados de inesperada elevación en la resistividad del suelo.

Una vez que se han calculado las tensiones de paso, de contacto, de malla y utilizando la longitud aproximada del diseño preliminar de la red, se comparan los valores de tensiones con los valores tolerables del cuerpo húmedo y en esta forma se sabe si el diseño queda dentro de los límites de seguridad requeridos. En caso de no hacer así, se procede a calcular la longitud total del conductor necesario para entrar en los límites de seguridad.

Ahora si igualamos el valor de la tensión de malla de la ecuación (IV.6) con el valor tolerable de la tensión de contacto de la ecuación (II.3), se obtiene:

$$\frac{K_m K_i P I}{L} = \frac{165 + 0.25 P_s}{t} \quad \text{----- (IV.9)}$$

De estas ecuaciones podemos deducir la longitud del conductor a enterrar, que formará la red capaz de mantener las tensiones de malla dentro de los límites de seguridad como sigue:

1.83
------

MALLA A

1.74	1.74
1.74	1.74

MALLA B

1.73	1.33	1.33	1.73
1.33	1.16	1.16	1.33
1.33	1.16	1.16	1.33
1.73	1.33	1.33	1.73

MALLA C

1.9	1.6	1.4	1.2	1.2	1.4	1.6	1.9
1.6	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.6
1.4	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.4
1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2
1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2
1.4	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.4
1.6	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.6
1.9	1.6	1.4	1.2	1.2	1.4	1.6	1.9

MALLA D

1.0	0.9	0.8	0.8	1.82
0.8	0.7	0.7	0.7	
0.8	0.7	0.6	0.7	
0.8	0.7	0.7	0.7	
2.13				2.23

MALLA E

1.0	0.8	0.8	0.8	1.82
0.8	0.7	0.6	0.7	
0.8	0.6	0.6	0.6	
0.8	0.7	0.6	0.7	
2.13				2.23

MALLA F

LAS CIFRAS EN LOS DIAGRAMAS SON LOS PRODUCTOS DE LOS COEFICIENTES  $K_m \times K_i$  DETERMINADOS DE DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS POR KOCH.

MALLA	A	B	C	D	E	F
VALOR MAXIMO DE $K_m \times K_i$	1.83	1.74	1.73	1.90	2.23	2.23
COEFICIENTE $K_m$ CALCULADO POR EL METODO DESCRITO	1.82	1.50	1.18	0.85	1.50	1.50
COEF. $K_i = \frac{K_m \times K_i}{K_m}$	1.00	1.16	1.47	2.21	1.49	1.49

NOTESE QUE LOS VALORES DE  $K_i$  PARA LAS MALLAS A, B, C, y D PUEDEN CALCULARSE MUY APROXIMADAMENTE POR  $K_i = 0.650 + 0.172n$  EN DONDE  $n$  ES EL NUMERO DE CONDUCTORES PARALELOS.

TABLA N.º 8

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{165 + 0.25 \rho_s} \text{-----} \quad (\text{IV.10})$$

La corriente de falla no penetra solamente a la tierra a través de los conductores horizontales de la red, - si no que también por las varillas verticales, por las tuberías de agua de pozo profundo, etc. De lo anterior, en los casos en que la longitud del cable encontrado en la ecuación (IV.10) resulte antieconómico, pueden considerarse las longitudes de dichos electrodos conectados firmemente a la red y entonces considerar una red de tierras más pequeña, siempre que su resistencia total considere estos nuevos elementos, de manera que asegure que no se conducirán gradientes de potencial fuera de los tolerables por el cuerpo humano.

En los casos donde los valores de la resistividad del terreno y la corriente de falla sean tan bajos, la longitud del conductor calculado por la ecuación (IV.10) resulta tan pequeña que se hace difícil efectuar las conexiones de los equipos a la red, en tales casos, se emplea más conductor que el necesario para el control de los gradientes de potencial.

#### IV.4.2 TENSIONES DE PASO EN LA PERIFERIA DE LA RED.

Dentro de la red, las tensiones de paso y de contacto son más fáciles de controlar a cualquier valor deseado, disminuyendo el espaciamiento de los conductores que forman la malla, incluso teóricamente pueden llegar a ser cero, en el caso de usar una placa metálica sólida.

La situación es diferente en el caso de zonas inmediatas a la periferia de la red, donde el problema podría existir aún con el uso de la placa sólida. Este problema llega a ser aún más serio en el caso de subestaciones pequeñas, donde la red solo cubre una área limitada.

Por lo que respecta a las tensiones de paso, las subestaciones se diseñan generalmente eliminando en lo posible los contactos en la periferia o en todo caso mantener sus valores dentro de los límites de seguridad. Por ejemplo; el trato especial que se les da a las cercas colocadas en la periferia de la red, como ya se ha mencionado.

Por lo tanto para calcular los potenciales de paso en la periferia lo haremos de la siguiente forma:

$$E \text{ paso} = K_s K_i P \frac{I}{L} \text{-----} \quad (\text{IV.11})$$

Donde:

$K_s$  = Coeficiente que toma en cuenta el efecto del número "n". El espaciamiento "D" y la profundidad de enterramiento "h" de los conductores de la red. Su valor se calcula como sigue:

$$K_s = \frac{i}{\pi} \left( \frac{I}{2h} + \frac{I}{D+h} + \frac{I}{2D} + \frac{I}{3D} + \dots \right) \text{-----} \quad (\text{IV.12})$$

El valor total de términos dentro del paréntesis, es igual al número de conductores paralelos en la red básica, excluyendo las conexiones transversales.

$K_i$  = Factor de corrección de irregularidad para permitir el flujo de corriente a tierra no uniforme en toda la red.

$I$  = Corriente total de falla, expresada en amperes.

$L$  = Longitud total del conductor enterrado, expresado en mts.

Un valor de 1.2 a 1.3 fué propuesto por Mie Mann, sin embargo, este valor podría ser insuficiente para cubrir -

las esquinas y las proyecciones agudas en las redes, por lo que se sugiere que se tomen valores más conservativos para este factor ya que la densidad de corriente y gradientes superficiales podrían tender a valores muy altos en esas zonas.

Por otra parte, si el diseño es tal que ofrezca potenciales internos dentro de los límites tolerables y además la resistividad superficial es similar tanto dentro de la malla como fuera de ella, las tensiones de paso rara vez llegan a ser un problema.

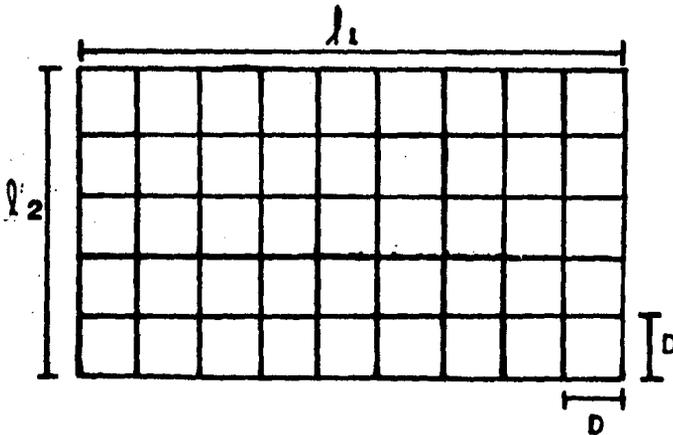
Sin embargo, esta seguridad se consigue solo con un tratamiento especial del suelo, tal como colocar roca triturada en toda la superficie del área de la red, además se recomienda colocar la roca triturada más alta de dicha área, con el fin de evitar accidentes al hacer contacto con las cercas, pues aquí se podrían presentar tensiones peligrosas especialmente en las proyecciones agudas y en las esquinas.

#### IV.5 DIMENSIONAMIENTO DE LA RED.

Las profundidades que se han establecido por normas internacionales y de nuestro país, a la que se colocará la red a partir de la superficie del suelo es de 0.5 a 1 mt; no se considera conveniente hacerlo a mayor profundidad ya que a pesar de que teóricamente, 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 interesada tiene por lados " $l_1$ " y " $l_2$ " por lo general la longitud total del conductor de tierra se disminuye como una cuadrícula enterrada a la profundidad ya establecida.

Las distancias a que se localizan los conductores que forman la cuadrícula se calcula como sigue:



La longitud total del conductor a tierra será:

$$L = l_1 \left( \frac{l_2}{D} + 1 \right) + l_2 \left( \frac{l_1}{D} + 1 \right) \quad \text{(IV.13)}$$

DE DONDE:

$$L = \frac{2 l_1 l_2}{D} + l_1 + l_2 \text{ ----- (IV.14)}$$

ENTONCES:

$$D = \frac{2 l_1 l_2}{L - l_1 - l_2} \text{ ----- (IV.15)}$$

D = Longitud de cada cuadro

$l_1$  = Longitud del lado mayor del rectángulo

$l_2$  = Longitud del lado menor del rectángulo

L = Longitud total del conductor de la malla.

#### IV.6 NUMERO DE ELECTRODOS EN UN SISTEMA DE TIERRAS.

Dimensionar eléctricamente un electrodo dispersor -- significa determinar las dimensiones en función de la resistencia a tierra que se desea obtener.

En la práctica se recurre para el dimensionado a fórmulas empíricas o gráficos que proporcionan una orientación primaria y se comprueba durante la instalación. La resistencia obtenida, aumentando eventualmente la profundidad, la extensión o el número de dispersores hasta al--

canzar la resistencia deseada.

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

El tipo de electrodo más común y al cual nos vamos a referir en este trabajo es el electrodo cilíndrico o de varilla de 2.44 a 3.05 mts. con un diámetro de 1.6 cm. -- (5/8"). Este tipo de electrodo tiene una ventaja de que se entierra a una razonable profundidad del terreno y puede alcanzar frecuentemente capas más profundas en las que se halla una conductividad mayor.

La resistencia de una varilla Copper Weld de 5/8" de diámetro por 3.05 mts. de longitud en cualquier terreno es:

$$R_v = 0.41 \Omega \cdot \rho \cdot P = \Omega - \text{Mts.} \text{ -----(IV.16)}$$

El número de varillas se determina en función del -- área para asegurar una resistencia de 25  $\Omega$  como máxima, -- marcada por el reglamento de obras e instalaciones eléctricas (ROIE). Aunque en realidad siempre se usa como va

lor práctico para instalaciones industriales es de 1 a 6 ohms.

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

$$N = \frac{\rho}{2 \pi R_t L_1} \left( \ln \left( \frac{4L_1}{b} \right) - 1 \right) \text{----- (IV.17)}$$

Donde:

$N$  = Número de electrodos a tierra

$L_1$  = Longitud del electrodo

$b$  = Radio del electrodo

$\rho$  = Resistividad del terreno

$R_t$  = Resistencia de tierra.

Para determinar la mínima longitud del conductor cuando se usan electrodos de tierra se hace el siguiente razonamiento:

La distancia mínima entre dos varillas es  $2r$  ; donde

...

$r$ , es el radio de un área protegida por una varilla, siendo el área por varilla:

$$A_v = \frac{A}{N} \quad \text{----- (IV.18)}$$

Donde:

$A_v$  = Área protegida por una varilla

$A$  = Área de la subestación

$N$  = Número de electrodos.

Entonces:

$$A_v = \pi r_1^2 \quad \text{de donde:}$$

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

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

Por lo tanto; la longitud total mínima es:

$$L = 2r_1 N^2 = 2N^2 \sqrt{\frac{A}{\pi N}} \quad \text{----- (IV.19)}$$

La distancia de separación entre electrodos será:

$$r_1 = \sqrt{\frac{A}{\pi N}} \quad \text{----- (IV.20)}$$

Es necesario considerar que con el método anterior - se obtiene solo una estimación del número de electrodos - que se requieren, después de la instalación del sistema - de tierras se debe medir el valor de la resistencia, de - manera que si es demasiado alta, se deben agregar otros - electrodos hasta obtener el valor deseado de la resisten- cia de tierra, en este caso se puede usar como guía la si- guiente expresión:

$$N_a = N_e \left( \left( \frac{R_m}{R_g} \right)^2 - 1 \right) \text{----- (IV.21)}$$

Donde:

$N_a$  = Número adicional de electrodos por agregar.

$N_e$  = Número de electrodos existentes.

$R_m$  = Resistencia de tierra medida.

$R_g$  = Resistencia de tierra deseada.

#### IV.7 RESISTENCIA DEL SISTEMA DE TIERRAS.

La Resistencia total de la malla con respecto a tie- rra se puede determinar según fórmula de Laurent y Mie- - mann, publicada "EN GUIA PARA SEGURIDAD EN LA CONEXION A\_

TIERRA DE SUBESTACIONES"; que como se puede observar con el segundo término se compensa la diferencia de resistencias que existe entre un área circular y una red real.

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \text{ ----- (IV.22)}$$

Donde:

R = Resistencia total del sistema de tierras.

r = Radio en metros de un área circular conteniendo la misma área ocupada por la red.

L = Longitud total de conductores enterrados (varillas, marcos, etc.)

$\rho$  = Resistividad eléctrica del terreno en ohms-metros.

#### IV.8 OBSERVACIONES DEL DISEÑO PRELIMINAR.

Si los cálculos realizados en el diseño preliminar, indican que pueden existir diferencias de potencial peligrosas, deben considerarse las siguientes soluciones y aplicarlas donde sea apropiado.

- 1) Reduciendo la resistencia total de la red, reduci

remos el máximo incremento de potencial en la misma, y por lo tanto los potenciales transferidos.- La forma más efectiva para reducir la resistencia de la red es incrementar el área ocupada por la red. Si el espacio es reducido, entonces se soluciona aumentando el número de varillas.

- 2) Mejorando el control de gradientes, esto se logra mediante rejillas más cerradas, aumentando el número de conductores en paralelo. Con esto los potenciales peligrosos dentro de la subestación pueden quedar eliminados totalmente, el problema entonces es para eliminar potenciales en la periferia de la subestación.

Para eliminar los potenciales perimetrales, se recomienda agregar otro cable perimetral por la parte de afuera de la red, que vaya paralelamente a la red preliminar, con esto se soluciona definitivamente.

- 3) Aumentar la resistencia de la superficie para incrementar las resistencias que están en serie con

el cuerpo humano, lo cual se logra aumentando la\_ capa que cubre a una red con roca, grava seca, o\_ algún otro material que opere como aislante.

- 4) Diversifiquemos la trayectoria de la corriente de falla. Conectando la red a partes metálicas aterrizadas en alguna forma, ya sea directamente o - por medio de hilos de guarda que a su vez se aterrizan en otra parte, tal es el caso de líneas de transmisión.
- 5) Limitando la corriente de corto circuito fluyendo a tierra a valores menores ya sea mediante resistencias o reactancias.
- 6) Bloquear el acceso de áreas limitando donde sea - prácticamente imposible eliminar las diferencias\_ de potencial peligrosas.

Usando una o más de estas posibilidades, el diseño se puede considerar completo y listo para llevarse a cabo.

## CAPITULO V

### CONEXION A TIERRA DE EQUIPO.

#### V.1 GENERALIDADES.

Los principales objetivos que se persiguen con la conexión a tierra de los equipos, se concretan a la obten--ción de seguridad para el personal de operación, asegurandose de que en las estructuras de acero, bastidores de maquinaria, carcazas de equipo eléctromecánico y cualquier otra clase de cuerpos metálicos que encierran circuitos eléctricos o están en su inmediata cercanía, se mantenga el mismo potencial de tensión que en tierra.

El contacto accidental entre un cuerpo metálico no conectado a tierra y un circuito eléctrico, eleva el po--tencial de ese cuerpo al mismo que tiene el circuito con tierra. Si el cuerpo corresponde al bastidor de una maquina, a la caja de un interruptor o a cualquier elemento estructural, este se convertirá en un serio peligro al ser tocado por alguna persona.

La conexión a tierra tiende también a evitar la ele-

vación de potencial del cuerpo metálico con respecto a la tierra y, a pesar de que llegara a correr por dicho cuerpo una fuerte corriente eléctrica, no presentaría necesariamente el peligro de choques eléctricos al tocarlo.

Es por lo tanto necesario que todos estos cuerpos de metal esten conectados en forma permanente y efectiva a tierra a través de elementos de unión de baja impedancia, con suficiente capacidad conductiva de corriente.

La conexión a tierra tiene que ser suficiente tanto para la corriente normal como para la que se pueda producir por el efecto de fallas.

La resistencia de los elementos de interconexión entre los cuerpos de metal y tierra tiene que mantenerse -- dentro de valores muy bajos, para sostener la efectividad de la unión a tierra. El objetivo es lograr que la diferencia de potencial permanezca tan reducida como sea posible para obtener el máximo de corriente hacia tierra en el momento dado. Así mismo, una gran impedancia en las uniones y conexiones o insuficiente sección transversal en -- los circuitos del sistema de tierras puede originar ar-

queos o calentamientos de suficiente magnitud para iniciar la ignición de materiales combustibles o gases explosivos cerca del punto de arqueo.

## V.2 EQUIPOS QUE DEBEN SER CONECTADOS A TIERRA.

En una planta industrial característicamente representativa se incluye la conexión a tierra del siguiente equipo: estructuras, subestaciones de tipo intemperie, cuartos grandes para la instalación de generadores y motores, ductos para alambres o cables conductores, motores diversos y equipo portátil.

### V.2.1 CONEXION A TIERRA DE ESTRUCTURAS.

Todos los miembros estructurales de metal tienen que conectarse con una barra o cable colector unido a tierra que pueda servir también para la conexión a tierra de motores y generadores de gran tamaño.

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 mts. las derivaciones de unión tienen que ser -

de cable de cobre de un calibre no menor que el No. 2/0 - AWG. Todas las conexiones ocultas deberán ejecutarse por medio de soldadura de latón, o por otro proceso de consistencia equivalente, no se permiten conexiones a soldadura de estaño.

Las estructuras y cajas metálicas de los mecanismos de control, pararrayos, interruptores, transformadores, rejillas y elementos similares, se conectan individualmente a la barra o cable general de tierra en forma análoga a la estructura del edificio. Los bastidores de las cuchillas interruptoras o desconectoras que se atornillan directamente sobre elementos estructurales de acero, no requieren conexión adicional a tierra, excepto en el caso de que la tubería de operación de los interruptores de maniobras múltiples sean conectadas a tierra por medio de un cable de cobre extraflexible del No. 1/0 AWG., o equivalente, que se una a la parte más cercana de la estructura de soporte ya conectada a tierra.

## V.2.2 CONEXION A TIERRA DE LAS SUBESTACIONES TIPO INTemperie.

Para las instalaciones 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 subestaciones grandes. Las estructuras de las subestaciones se unirán a tierra según lo dicho anteriormente. En general es muy recomendable la unión a tierra de cada una de las columnas de soporte de la estructura de acero. En las estructuras de madera se interconectan todos los herrajes metálicos o se unen en una forma conveniente por medio de una o varias bajadas de cable de cobre de calibre no menor del No. 1/0 AWG., o equivalente.

Una cerca metálica colocada alrededor de una subestación de 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 1 ohms, la cerca puede conectarse a este ca--

ble a intervalos de 7.63 mts mediante cable de calibre mínimo del No. 1/0 AWG. Si la cerca esta alejada de la instalación o si la resistencia del cable colector es mayor de 1 ohms, la cerca no deberá conectarse a este cable.

En este caso se instalará una serie de varillas o -- electrodos de 3/4 pulg. de diámetro por 10 pies de longitud a lo largo de la cerca con un espaciamento máximo de 7.63 mts. El extremo superior de cada una de estas varillas estará enterrado a unos 30 cm de la superficie del suelo, y se conectarán con la cerca usando cable de cobre del No. 1/0 AWG. como mínimo.

### V.2.3 CONEXION A TIERRA DE LOCALES EN DONDE HAY GENERADORES O MOTORES ELECTRICOS.

Los locales en donde se instalan generadores o motores, deben contar con un cable colector de conexión a tierra tendido de acuerdo con las reglas para la instalación de barras o cables en interiores, y los miembros de acero estructural, tubería general del agua, del edificio, se deberán conectar a este cable colector.

Las conexiones a tierra de generadores, motores, - - transformadores y mecanismos de control tienen que ejecutarse con cable del No. 1/0 AWG. como calibre mínimo; pero deben tener por lo menos una capacidad de conducción - del 25% de la máxima corriente de régimen en servicio con tinuo de cualquier elemento de carga a los que se ha co-nectado la línea de tierra. La unión de las conexiones a las cajas de los aparatos que se comunican con tierra de-berá ser soldada con latón o también se podrán usar conectores especiales de presión, sin soldadura.

#### V.2.4 CONEXION A TIERRA DE LOS DUCTOS PARA ALAMBRES - CONDUCTORES.

Todo el material expuesto a cruzamientos tiene que - ser conectado a tierra, se comprenden en este renglón to-do el equipo que sirve para proteger y conducir las lí- -neas eléctricas y se incluyen los gabinetes de conexiones y tableros, cajas de conexiones, cajas de derivación, ca-  
jas de aparatos de control ductos de las líneas de servi-  
cio, tubería conduit, acoplamientos, accesorios para tu-

bos y ductos, cable armado, forro de plomo para cable y -  
enrejados.

Además tienen que considerarse también los dispositivos de control, transformadores, armazones para tablero, -  
motores, generadores, y equipo eléctrico portátil.

En general se deben conectar a tierra toda clase de cajas, gavetas, accesorios u otros elementos metálicos --  
que no conducen corriente y cualquier equipo fijo, si tiene  
algún contacto metálico con cable armado o ductos metálicos  
que contienen conductores eléctricos.

En las instalaciones a base de tubo conduit, cable -  
armado o ductos metálicos, la conexión a tierra debe eje-  
cutarse lo más cerca posible del lugar en donde los con--  
ductores reciben el suministro de corriente en el sistema  
de ductos o tuberías.

Todas las conexiones de tierra deben estar bien apretadas y tener superficies perfectamente limpias, y todos los  
materiales aislantes de recubrimiento de protección, -  
como esmalte, óxido, etc, deben ser removidos de los pun-  
tos en donde se conecta a tierra. Normalmente se utiliza

un conector de presión aprobado, para ejecutar las conexiones sin soldadura. Debe evitarse el empleo de conexiones a base de soldadura de estaño.

#### V.2.5 CONEXION A TIERRA DE MOTORES DIVERSOS.

Todos los armazones de los motores deben conectarse a tierra mediante un conductor equipado con un material de cobre unida mediante soldadura de latón o por un conector de presión confiable, sin soldadura, 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 tubo conduit metálico o al elemento de unión a tierra más próximo.

#### V.2.6 CONEXION A TIERRA DE EQUIPO PORTATIL.

El equipo portatil que opera con voltajes arriba de 600 volts, se entrega con cable para su conexión fija en ambos extremos de la línea. Todo este equipo incluyendo la carcasa o estructura, necesita estar conectado a tierra a través de un conductor, o conductores, a tierra in--

cluido el cable de suministro de energía, cuya capacidad de amperes debe ser equivalente a la del conductor más grande de la línea.

El equipo portátil que trabaja con voltajes de 600 volts o menos se conectará a tierra mediante un alambre o alambres especiales con una capacidad conductiva de corriente igual a la del mayor de los conductores del aparato.

Los conductores neutros del sistema, no obstante que en la fuente misma de suministro de energía están conectados a tierra, no deben usarse por ningún concepto como unión a tierra en equipos o aparatos.

La conexión a tierra del equipo portátil puede significar peligro en vez de un medio de seguridad, si no se le instala y mantiene en forma correcta. Las herramientas eléctricas portátiles deben revisarse para tener la seguridad de que están conectadas correctamente al hilo de tierra antes de entregárselas al operador, y los cables para el equipo portátil, así como las extensiones que se usan en el mismo, junto con sus elementos de conexión tie

nen que ser periódicamente revisados.

## CAPITULO VI

### PRINCIPALES METODOS DE CONEXION A TIERRA.

#### VI.1 GENERALIDADES.

En la mayoría de las instalaciones, la unión a tierra se efectúa conectando el hilo neutro del sistema, en uno o varios puntos a tierra, siendo el método más común de aterrizamiento el de neutro sólidamente conectado a tierra. Pero recientemente se ha comprobado que los sistemas de conexión a tierra através de una alta resistencia, obtienen las mismas ventajas de los sistemas de neutros sólidamente aterrizados, con algunas adicionales, cuando se trata de proteger equipo y personal contra efectos de arco.

Por lo tanto, para cada sistema comercial o industrial es necesario elegir el tipo de sistema de tierras más adecuado.

En la práctica se han notado en forma generalizada cuatro métodos básicos.

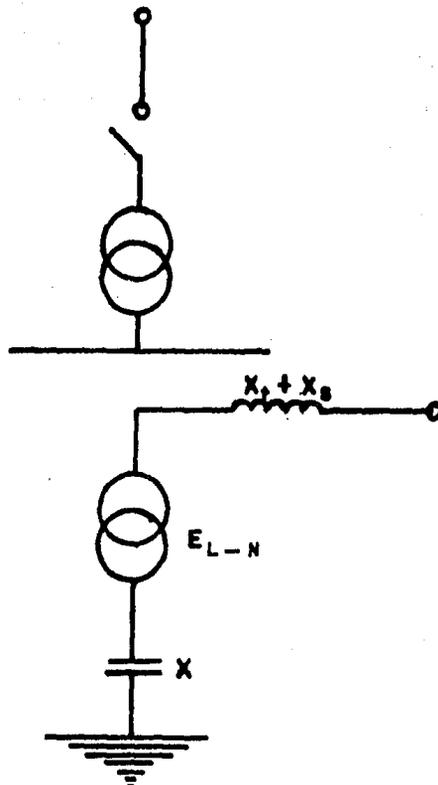
- 1) Sistemas no aterrizados

- 2) Sistemas de neutro sólidamente aterrizado
- 3) Sistemas de puesta a tierra através de resistencia
- 4) Sistemas de puesta a tierra através de una reactancia

## VI.2 SISTEMAS NO ATERRIZADOS

Sin conexión a tierra significa que no se ha hecho ninguna conexión intencional a tierra, excepto por medio de dispositivos indicadores, medidores de potencial o instrumentos de protección de sobre voltaje.

Tal como se entiende esta definición para un sistema de distribución de energía eléctrica, quiere decir que no existe conexión intencional alguna entre el hilo neutro ni algunas de las fases a tierra. En todo sistema práctico siempre existe un acoplamiento capacitivo entre los conductores y tierra, de manera que el así llamado sistema sin puesta a tierra es en realidad un sistema puesto a tierra capacitivamente.



**Sistema de puesta a tierra no aterrizado**

**FIGURA VI-1**

En empresas en donde tiene importancia, la continuidad del servicio eléctrico, el sistema sin conexión a tierra ofrece una solución, aunque - tiene que tomarse en cuenta sus limitaciones. Este sistema es apropiado\_ para circuitos del siguiente tipo:

Una fase ----- Dos hilos

Tres fases ----- Tres hilos

Para la instalación de este sistema no se requiere ningún equipo, pero es aconsejable adoptar al sistema de relevadores, resistencia y/o luces indicadoras para detectar fallas a tierra.

En un sistema sin puesta a tierra, la corriente de falla de fase a tierra es despreciable y no causa interrupciones de la carga. Usualmente es menor de un ampere y raramente llega a exceder de 5 amperes.

En sistemas de 208, 220 volts, la probabilidad de arco sostenido de línea a línea es pequeña pero pudiera ocurrir.

En sistemas de 480, 600 volts, la probabilidad es alta, del orden de uno por ciento.

Las pruebas han demostrado que los sistemas no conectados a tierra están sujetos a sobre voltajes transitorios que pueden ser causados por conmutaciones normales, por el contacto de una fase con tierra o por el repetido reencendido de un arco de falla de línea a tierra. Estos sobre voltajes pueden tener magnitudes de hasta seis veces el voltaje normal de línea a tierra. El aislamiento de línea a tierra de todos los equipos conectados al sistema están sujetos a dichos sobre voltajes, los cuales lo pueden debilitar en tal forma que a la larga fallara.

En los sistemas que carecen de conexión a tierra se usa algún dispositivo que indique la presencia de una fuga a tierra en algunos de los conductores a las fases. Estos dispositivos o aparatos operan en función del voltaje entre las fases y tierra en el sistema. Una tierra en alguna de las fases origina la caída de tensión entre fase afectada y la tierra, a cero voltaje, mientras que la tensión entre las otras fases y la tierra se eleva al voltaje entre fases, que equivale a un aumento del 58%. En este caso, tres focos o tres voltímetros conectados entre los conductores de las fases y la tierra indicarán la presencia de un contacto a tierra, ya sea por el cambio de brillantez en los focos, o por alteración de la posición de las manecillas de los voltímetros.

#### VENTAJAS:

- a) La probabilidad de un arco sostenido en una falla de línea a tierra es extremadamente baja, cerca de cero.
- b) El valor de la corriente eficaz para una falla sostenida de línea a tierra es muy bajo, y para -

- el caso de falla de línea a tierra en una fase es muy probable que el arco sea auto extinguido.
- c) En un sistema de barras, es muy improbable que -- una falla en una fase se extienda al resto de las barras.
  - d) La discriminación no es fácil para los niveles -- usuales de arqueo entre líneas, pero con bajos ni veles de corriente de arqueo entre fases o de doble falla de fase a tierra, los instrumentos pueden actuar con un retraso considerable o disparar.
  - e) El peligro de que salte un arco al personal que -- se encuentra cerca de una línea con falla a tie-- rra, básicamente no existe; pero si se trata de -- dos líneas con falla a tierra, entonces si.
  - f) El costo inicial es casi igual al de los sistemas con neutro conectado a tierra.
  - g) Posibilidad de alimentar circuitos a una o dos fa ses, mientras se localiza la fase dañada.

## DESVENTAJAS:

- a) El control de sobretensiones, ya sean transitorias o fijas de fase a tierra, prácticamente es nulo, por lo cual, es el sistema que menos seguridad brinda.
- b) El peligro de choque de fase a tierra que resulta de la trayectoria de la falla hacia otro sistema de mayor tensión, pueden llegar a tomar el valor de potencial de fase a tierra del sistema de tensión mayor.
- c) Con este sistema, la remoción de la falla de línea a tierra resulta tardada antes de que se extienda a una falla de línea a línea. Cualquier sobretensión puede dañar o cambiar las condiciones de los aislamientos produciendo destrozos posteriores a los equipos.
- d) Cuando se tienen fallas no sostenidas, resulta muy difícil la localización de la línea con falla, para lograrlo hay que provocar otra falla, siendo esto inapropiado y peligroso. Otra forma de ha--

cer la localización es mediante instrumentos que generalmente, no se encuentran en el campo.

- e) Parte o todo el sistema debe ser sacado de servicio para localizar las fallas, con lo cual hay -- pérdidas de producción.
- f) Son probables las tierras flotantes o por arco.
- g) El costo de mantenimiento de este sistema es rela- - tivamente alto, debido a que se reduce la vida de los aislamientos, además de los gastos que aca- - rrea la localización de fallas.
- h) La protección que se puede brindar a los motores\_ es mínima por que una falla en un motor no puede\_ ser fácilmente detectada y removida antes de que\_ se dañen los devanados.
- i) Se requiere del uso de conductores con mayor ais- lamiento.

#### AREAS TIPICAS DE APLICACION.

El sistema no aterrizado se utiliza principalmente - en industrias de proceso, tales como: Fabricación de pa--

pel, química y de la industrialización del petróleo, así como en otros servicios de manufactura donde la estabilidad requiera que tenga paros o desviaciones cuando ocurre una falla a tierra. Se propone entonces un estudio de -- prevención de paros no programados a base de mantenimiento e inspección, a fin de evitar grandes pérdidas financieras, daños a los equipos y peligros al personal.

La principal característica, favorable del sistema -- de tierras no aterrizado, es la capacidad de evitar interrupción en la continuidad del servicio cuando ocurre una falla de fase a tierra.

La vulnerabilidad del sistema no aterrizado, está en los aislamientos y en la presencia de puntos peligrosos -- que ofrecen condiciones de sobrevoltajes, ya sean transitorios o permanentes. Esto ha hecho que se reduzca el -- uso de estos sistemas.

### VI.3 SISTEMAS DE NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRIZADO.

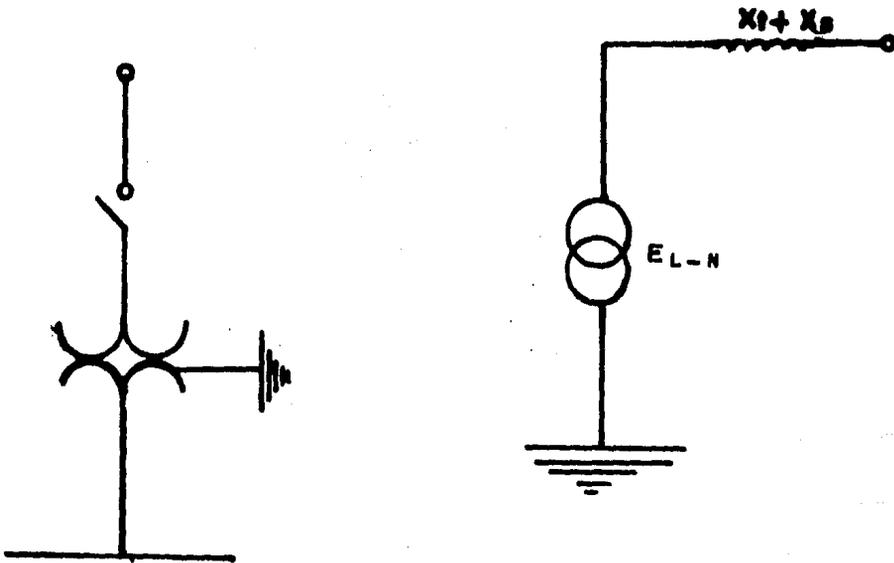
Como su nombre lo indica, este es un método de conexión directa a tierra del punto neutro del generador o --

transformador en cualquier sistema, sin intervención alguna de dispositivos de impedancia entre neutro y la conexión a tierra. La impedancia -- existente entre el sistema y la tierra, es solo la propia del transformador o generador con respecto al resto del sistema.

Si la reactancia del generador o del transformador es muy grande, -- los objetivos buscados al conectar principalmente la liberación de las -- sobretensiones transitorias, no serán obtenidas.

La conexión a tierra debe ser lo suficientemente efectiva como para producir una corriente de falla entre las líneas y la tierra equivalente por lo menos al 25% de la corriente de falla trifásica, para prevenir el surgimiento de altas sobretensiones transitorias.

La siguiente fig. (VI-2) muestra el diagrama esquemático del sistema no aterrizado.



Sistema de neutro sólidamente aterrizado

.FIGURA VI. 2

Este sistema es apropiado para circuitos del siguiente tipo:

Una fase ----- Dos hilos

Una fase ----- Dos hilos (1 hilo aterrizado)

Tres fases ----- Tres hilos

Tres fases ----- Cuatro hilos

El equipo que se requiere para este tipo de sistema es el siguiente:

Un electrodo a tierra.

Cable para unir el electrodo y la terminal del neutro.

La corriente de falla de línea a tierra, en porcentaje del valor R.M.S. de la corriente de falla trifásica, en la terminal de falla al punto de suministro varía y puede ser del 100% ó mayor.

El arqueado sostenido probable de línea a línea, en porcentaje del valor de falla trifásica es función del voltaje del sistema.

Voltaje del sistema (Volts)	corriente de falla (%)	voltaje del arco (volts)
208 -----	2	----- 275
480 -----	74	----- 275
600 -----	85	----- 275

Como se puede observar la probabilidad de arqueo de línea en sistemas de 208 volts es muy remota pero pudiera ocurrir.

En los sistemas de 408 volts la probabilidad es del orden de 1.0%.

El valor de la corriente R.M.S. de una falla por arqueo de una fase a tierra en porciento de la corriente trifásica de falla:

Para sistemas:

208 Volts -----	0%
480 Volts -----	40%
600 Volts -----	50%

VENTAJAS:

a) El sistema de neutro solidamente aterrizado, brin

...

da un efectivo control de sobrevoltajes, transito rios o permanentes de neutro a tierra, dándole va lores dentro de niveles de seguridad, estos sobre voltajes pueden ser impuestos o autogenerados por el sistema de fuerza, por rupturas de aislamien- - tos, circuitos inductivos capacitivos, resonan- - tes, fallas restringidas a tierra, etc.

- b) Este sistema permite utilizar dispositivos de dis paro automático de bajo costo y con seguridad de de respuesta en la primera falla.

Cuando ocurren fallas francas a tierra o arqueo - de alto grado, los instrumentos de sobrecorriente operan sobre la fase afectada,

Para arcos de menor grado, se pueden adaptar re levadores muy sencibles para asegurar la desconexión del circuito que falle antes de que ocurra - el incendio del circuito. En muchas industrias y condiciones de servicio, esta rápida protección - de equipo es necesaria y deseable para proteger - las instalaciones y el personal.

- c) Facilidad de discriminación entre un arqueo de fa  
lla de línea a línea y de fase a tierra, y una co  
rriente normal de carga.

Los niveles comunes de arqueo disparan por los --  
instrumentos de fase del sistema, para esto es ne  
cesario usar instrumentación del tipo de secuen--  
cia cero para obtener una rápida discriminación -  
entre niveles bajos de corriente.

El uso de relevadores mínimiza la posibilidad de\_  
daños en una falla por arqueo.

- d) En el sistema de neutro sólidamente conectado a -  
tierra, el peligro de choque de fase a tierra que  
resulta de la trayectoria de la falla hacia otro\_  
sistema de mayor tensión, queda limitado por la -  
tensión de línea a neutro del sistema de baja ten  
sión.
- e) El peligro de un choque del neutro a tierra durante  
una falla de línea a tierra es nulo, especial-  
mente para un eléctrodo de tierra de baja impedan  
cia.

- f) Seguridad, cuando aparecen fallas a tierra directamente sobre circuitos de control, solo aparecen un 58% de la tensión entre líneas en las terminales de las bobinas de los contactores y, por lo tanto, un motor no puede ser arrancado en estas condiciones.
- g) Este sistema ofrece gran facilidad para localizar la falla, puesto que generalmente se autoaisla la falla por medio de los instrumentos de sobretensión.
- h) El costo de mantenimiento es mínimo, puesto que los aislamientos no sufren sobretensiones que acorten su vida, y las fallas son fácilmente localizadas.
- i) La protección que se ofrece a los motores, es que una falla a tierra en los devanados es fácilmente detectable y separada antes de que dañe a la máquina. Esta detección es a través de los relevadores de tierra y sobretensión.

## DESVENTAJAS

- a) Existe la probabilidad de un arco sostenido como se indicó, en sistemas de 208 volts la probabilidad es casi cero, pero en sistemas de 480 - 600 - volts, la probabilidad es del orden de uno.
- b) Es muy alta la probabilidad, del orden de uno de que el arqueo de una fase a tierra se extienda de fase a fase o a trifásico, particularmente en sistemas de 480 y 600 volts.
- c) Es también peligroso cuando la falla a tierra está en los circuitos de control y estos usan voltaje a fase a fase porque entonces un motor, que esté trabajando, puede no parar cuando se oprima el botón de paro, o caso contrario, cuando se trata de arrancarse está haciendo pasar corriente de -- falla através del circuito del botón, poniendo en peligro al operador.
- d) Un arqueo de bajo nivel puede dañar seriamente al equipo, entonces la remoción del equipo dañado -- causa retrasos en la restitución de servicio; por

lo tanto, se recomienda poner suficiente instrumentación para eliminar este problema.

#### AREAS TIPICAS DE APLICACION.

Este sistema es sin duda el que más uso comercial e industrial tiene para servicios generales de carga industrial, servicios públicos y equipos de seguridad como alumbrados, elevadores, bombas contra incendios, ventilación, etc.

En particular este sistema es el más efectivo en servicio trifásico, cuatro hilos para circuitos de fuerza de baja tensión.

La principal característica del sistema de neutro sólidamente aterrizado, es su eficiencia para controlar las sobretensiones y su inmediata separación de los circuitos con falla por medio del disparo por instrumentos de sobretensión, los cuales son relativamente económicos. También pueden adaptarse sensores para la protección contra arcos pequeños destructivos.

Estas características justifican el uso tan amplio -- que tiene este sistema en las instalaciones de fuerza, -- tanto industriales como comerciales. Esto se suma al --- gran ahorro que representa prevenir 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 cerca- ña de un arqueo o en las aproximidades de algún instru-- mento en el instante de una falla, lo cual implica que so lo se debe trabajar en los circuitos cuando se encuentren totalmente desenergizados, como medida de seguridad.

Este sistema permite usar conductores con aislamien- to del 100%, es decir, no es necesario que los conducto-- res esten sobreaislados, lo que representa una gran econo- mía.

#### VI.4 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA ATRAVES DE RESISTEN- CIA.

Se dice que un sistema está conectado a tierra con - resistencia, esto indica que está conectado a tierra atra

vés de una impedancia, cuyo elemento principal es la resistencia.

En este método de conexión el punto neutro se conecta a tierra através de resistencias en uno o más puntos - con el fin de limitar la magnitud de la corriente de falla a un valor relativamente bajo, y sin embargo, de tal manera intensa que sea suficiente para detectar y eliminar fugas a tierra. El tamaño de la resistencia se elige en forma tal que la fuga a tierra se mantenga entre 5 y - 20% de la corriente de falla trifásica, pero es también esencial que la corriente de falla a tierra conserve la intensidad suficiente para el accionamiento de relevadores.

Las razones para la limitación de corriente en la conexión a tierra por medio de resistencias se basa en las consideraciones siguientes:

- 1) Reducir los efectos que ocasiona el quemado o fusión del equipo eléctrico dañado como, por ejemplo, dispositivos de distribución, cables y máquinas rotatorias.

- 2) Reducir los esfuerzos mecánicos en los circuitos\_ y aparatos que conducen corrientes de falla.
- 3) Reducir los peligros de choques eléctricos al per\_ sonal, ocasionados por corrientes bagabundas o - dispersas, procedentes de fallas a tierra, en su\_ recorrido de retorno.
- 4) Reducir la caída momentanea de voltaje en las lí- neas que puede ser ocasionada por la súbita pre-- sencia o eliminación de fugas a tierra.

La conexión a tierra por resistencia puede ser de -- dos clases:

- a) Baja resistencia
- b) Alta resistencia

La clasificación anterior se refiere a la magnitud - de la corriente de falla a tierra que se permita fluir. - Estos dos tipos de conexión a tierra estan diseñados para limitar las sobretensiones transitorias a un nivel segu-- ro, (dentro del 250% del normal); Sin embargo, el método\_ de alta resistencia usualmente no requiere disipación in-

mediata de una corriente de falla, ya que dicha corriente está limitada a un nivel muy bajo (del orden de 5 amperes). Este valor debe ser por lo menos igual a la corriente de carga total del sistema con capacitancia a tierra.

El esquema de protección asociado con una conexión a tierra de alta resistencia en los sistemas donde la corriente de falla de línea a tierra excede de 10 amperes, debe ser evitado. El método de baja resistencia tiene la ventaja de ser capaz de intermediar y seleccionar la disipación del circuito conectado a tierra, pero requiere que la corriente mínima de falla a tierra sea lo suficientemente grande, usualmente 400 amperes o más para que actúe adecuadamente el relevador de falla a tierra empleado. La conexión de alta resistencia es un método que puede ser aplicado a sistemas no conectados a tierra de tensión media para obtener la protección contra sobretensiones transitorias sin alteración del costo por la adición de relevadores de tierra a cada circuito.

El sistema de puesta a tierra através de una baja re

...

sistencia es apropiado para circuitos de:

Una fase - Dos hilos

Tres fases - Tres hilos

Siendo el equipo requerido para este tipo de aterrizamiento:

Para sistema estrella--- Un resistor de neutro.

Para sistema delta ----- Un resistor de neutro y -- transformadores a tierra.

Un electrodo a tierra.

Cable para unir el electrodo y la terminal del neutro.

El costo de este sistema comparado con el sistema de neutro solidamente aterrizado, es alto, por el resistor que lleva y porque hay que incluir un sistema de protección a base de relevadores para asegurar que la falla sea localizada y aislada.

La probabilidad de arqueo sostenido de línea a línea en sistemas de 208 volts es baja, pero puede suceder. En sistemas de 408 y 600 volts la probabilidad es alta, del orden de 1.0.

## VENTAJAS:

- a) Este sistema controla eficientemente los sobrevoltajes generados en un sistema de fuerza, por circuitos resonantes inductivos-capacitivos, cargas estáticas y fallas a tierra restringidas. Pero no puede controlar ciertos sobrevoltajes de estado constante causados por contactos con sistemas de voltaje, falla de autotransformadores o de soldadoras.
- b) El sistema está diseñado para disparo automático a través de instrumentos de sobretensión, y en la primera falla los instrumentos se deberán calibrar de acuerdo con la corriente que se tenga con la resistencia.

Con este sistema se pueden tener rápidas respuestas al disparo, y por lo tanto, brinda protección al equipo antes que este sea dañado. Además, se puede restablecer fácilmente el servicio, lo que da confiabilidad al sistema.

- c) Con instrumentación de secuencia cero se puede lograr una rápida discriminación entre corriente de falla a tierra pequeñas y corrientes normales de carga, y con relevadores a tierra, se puede minimizar la probabilidad de incendio por arqueo.
- d) Cuando se tienen fallas directamente en los circuitos de control, el voltaje que se tiene entre las terminales de las bobinas de los conductores, es menor que el voltaje de línea o neutro y, por lo tanto, no se puede arrancar a un motor.
- e) En este sistema, el peligro de choque de neutro a tierra, durante una falla de fase a tierra, es prácticamente cero ya que el neutro no está operando con las fases.

#### DESVENTAJAS:

- a) La probabilidad de que un arqueo se extienda de una fase a tierra hasta un arqueo entre las tres fases, es muy alta, del orden de 1.0, particularmente en sistemas de 480 y 600 volts.

- b) El peligro de choque de fase a tierra, resultado de que la trayectoria de la falla haga contacto con un sistema de voltaje mayor, puede ser muy alto, tanto como el voltaje normal, línea a neutro del sistema primario.
- c) Requiere de circuitos de protección para detectar la procedencia de fallas a tierra, que puedan causar daño al equipo sino se aísla a tiempo.
- d) El costo de mantenimiento es alto, un poco más -- que el del sistema sólidamente aterrizado, porque la vida de los aislamientos se ve reducida debido a que ciertos tipos de sobre voltajes no son controlados efectivamente por este sistema.

El sistema de tierras con una resistencia baja se -- usa frecuentemente en situaciones especiales, como son; - en circuitos de fuerza, en minas, donde se requiere una - protección extraordinaria contra choques, sobre equipos - portátiles.

El motivo por el cual no se usa frecuentemente este sistema es porque no es adaptable a circuitos trifásicos

de cuatro hilos y porque no es muy sensible a la detección de fallas y por lo tanto, requiere de mayor instrumentación para lograrlo.

El sistema de puesta a tierra a través de una alta resistencia es aquel al cual se ha insertado una resistencia de alto valor, en la conexión de neutro a tierra, para limitar la corriente total de la carga del sistema, resultando una corriente total, de falla a tierra, aproximadamente  $\sqrt{2}$  veces la corriente de carga. Este sistema tiene como objetivo evitar el disparo automático del circuito con falla en la primer falla a tierra.

Este sistema es apropiado para circuitos:

Una fase - Dos hilos

Tres fases - Tres hilos

Y en el equipo que se requiere para el aterrizamiento es el siguiente:

Para sistema delta:

Un resistor de neutro y transformadores a tierra

Un electrodo a tierra

Cable para unir el electrodo y la terminal del neutro.

Se recomienda un indicador de fallas mediante alarmas o luces.

El costo de este sistema es alto en comparación al sistema de neutro sólidamente aterrizado porque se requiere un resistor, un indicador de falla y costo adicional para aumento de aislamiento en los conductores.

La probabilidad de arco sostenido de línea a línea en sistemas de 208 volts, es pequeña pero puede suceder,

En sistemas de 480 - 600 volts, la probabilidad es alta del orden de 1.0.

#### VENTAJAS:

- a) Este sistema controla eficientemente los sobrevoltajes generales en un sistema de fuerza, por circuitos resonantes inductivo-capacitivos, cargas estáticas y fallas a tierra restringidas. Pero no puede controlar sobrevoltajes de estado constante, causados por contactos con sistemas de ma-

yor voltaje, fallas de autotransformadores o de soldadoras.

- b) El valor de corriente R.M.S. de arqueo sostenido de fase a tierra es muy pequeño. La corriente de falla en un neutro aterrizado por una alta resistencia puede considerarse que produce un arco auto extinguido.
- c) La probabilidad de arqueo de línea a tierra de una fase se extiende entre fases, es muy poca, solo podría ser causada por la proximidad de las barras.
- d) El disparo del sistema, cuando ocurre la primera falla a tierra, no es automático, se puede arreglar que tampoco sea cuando se presenta la segunda falla, inclusive en las distintas fases. El circuito con falla continua en operación, para ciertos procesos industriales y condiciones de servicio, este procedimiento es considerado necesario y ventajoso.

- e) Cuando la falla está en los circuitos de control, el voltaje que se tiene en las terminales de las bobinas de los contactores es menor que el voltaje de la línea a neutro y por lo tanto un motor no se pondría en marcha.
- f) El peligro de choque de neutro a tierra durante una falla de línea a tierra se podría decir que es cero, ya que el neutro no está trabajando con las fases.

#### DESVENTAJAS:

- a) Existe el peligro de que cuando la trayectoria de la falla está haciendo contacto con sistemas de voltaje mayor, el voltaje de fase a tierra puede tener valores iguales al voltaje de línea a neutro del sistema primario.
- b) La discriminación de corrientes no es fácil, porque hay corrientes de línea a tierra que no se distinguen de las corrientes de carga, aunque son factibles de auto-extinguirse.

Las fallas de línea a línea provocan el disparo del sistema a través de los sistemas de protección, pero a veces el valor de la corriente es -- tan bajo, para ser detectado, que causa quemaduras y daños en el equipo.

- c) La difícil localización de falla en los circuitos, y por lo tanto, la demora en retirarla, mantiene el voltaje peligroso sobre los aislamientos. Si el sistema continúa en operación los daños sobre el equipo serían inminentes, generalmente ocurre en las bobinas de los motores, que terminan por causar el retiro total del motor o al menos reembobinado.
- d) A causa del punto anterior, se requiere de equipo especial para detectar el punto preciso de la falla, para ello se necesitan invertir horas-hombre, equipos y tiempo (paro).
- e) El costo de mantenimiento es mayor que el del sistema de neutro sólidamente aterrizado, debido a que hay que tener cuidado con los aislamientos --

que sufrieron sobre tensiones durante las fallas.

El sistema de puesta a tierra a través de una alta resistencia, ha sido aplicado en industrias de proceso y otras situaciones donde se desea el control de sobrevoltajes transitorios; pero se trata de evitar una interrupción inmediata del servicio cuando sucede una falla. En estas circunstancias, se debe tener por objetivo prevenir los paros desordenados de procesos que pueden resultar en severas pérdidas financieras o peligro al personal y equipo, un beneficio adicional es la eliminación del peligro de arqueos o flamazos por fallas accidentales a tierra.

La desventaja principal de este sistema es la de controlar los voltajes transitorios, ofrece menos peligro de flamazos o arqueos entre fases.

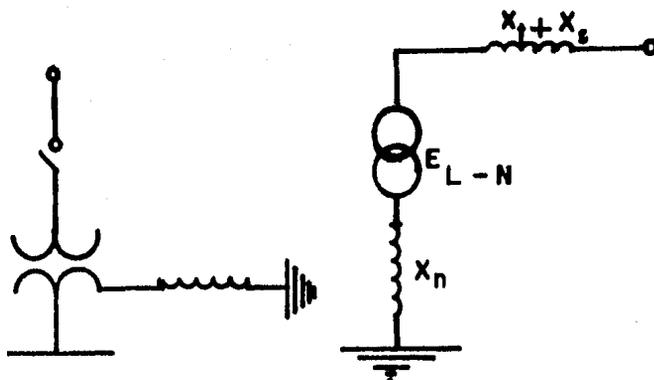
La dificultad para localizar las fallas pueden provocar que ocurra una segunda falla y se tenga dos circuitos de diferentes fases con falla simultáneamente.

Si la falla no se mueve en su oportunidad, puede causar daños a los aislamientos, por lo tanto, es necesario controlar la alta resistencia contra fallas a tierra y re



del valor de una falla trifásica.

La siguiente fig. (VI.4) muestra un sistema de puesta a tierra a través de una reactancia.



Sistema de puesta a tierra a través de una reactancia

#### FIGURA VI. 4

En este sistema es apropiado para circuitos de:

Una fase ----- Dos hilos

Tres fases ----- Tres hilos

Tres fases ----- Cuatro hilos

El equipo que se requiere para este sistema de aterrizamiento es un reactor.

El costo de este sistema con respecto al de neutro sólidamente aterrizado es alto, debido a que el reactor es caro.

La probabilidad de arqueo sostenido de línea a línea en sistemas de 208 volts es baja, pero puede suceder.

En sistemas de 480 - 600 volts, la probabilidad es alta, del orden de 1.0.

#### VENTAJAS:

- a) Este sistema controla efectivamente los sobrevoltajes generados en el sistema de fuerza por circuitos resonantes inductivo-capacitivos, cargas estáticas y fallas restringidas a tierra, pero no controla sobrevoltajes ocasionados por contacto físico con ciertos sistemas de mayor voltaje.
- b) El sistema está diseñado para proporcionar disparo automático por medio de instrumentos a la primera falla a tierra. Se pueden adaptar instrumentos de sobrecorriente, dependiendo de los rezagos de corriente limitada por el reactor.
- c) Mediante el uso de relevadores de secuencia cero se puede lograr una fácil discriminación de corriente de falla y corrientes normales de carga. Estos relevadores minimizan la probabilidad de --

que el equipo sea dañado y se quemé.

- d) El peligro cuando la falla existe directamente en los circuitos es casi nulo porque en las terminales de las bobinas del contactor aparece un voltaje menor que el de línea a neutro, y, por lo tanto, el motor no arranca.
- e) Es relativamente fácil la localización de fallas con este sistema mediante instrumentos de sobrecorriente, la falla generalmente va acompañada de ruido, humo y chisporroteo que ayudan a la localización del punto de falla.
- f) El costo de mantenimiento es ligeramente mayor -- que el de neutro sólidamente aterrizado, porque los aislamientos pueden estar sujetos a esfuerzos por voltajes mayores a sus nominales bajo ciertas condiciones de falla

#### DESVENTAJAS:

- a) La probabilidad de arco sostenido de línea a tierra en sistemas de 208 volts es baja.

En sistemas de 480 - 600 volts, es alta del orden de 1.0.

- b) La probabilidad de que el arqueo de una fase a tierra se extienda a una falla trifásica es alta, del orden de 1.0, particularmente en sistemas de 480 - 600 volts.
- c) Peligro de choque, cuando la trayectoria de la falla hace contacto con un sistema de mayor voltaje. Este puede ser tan alto como el voltaje normal de línea a neutro, del sistema mayor aproximadamente.
- d) Peligro cuando la falla a tierra esta directamente en los circuitos de control y este último esta conectado entre voltajes de línea a línea. Cuando se oprime el botón de arranque con falla a tierra en el circuito de control, puede hacer pasar corriente de falla a tierra a través de los conductos del botón, causando un peligro momentáneo al personal mientras actuan las protecciones. Un motor podría no parar cuando se oprima el botón -

de paro a los instrumentos de protección pueden - quedar puenteados por una tierra accidental.

e) El retraso para remover fallas de línea a tierra\_ pueden causar repetidos paros de equipo, causando daños al equipo y retrasos en la restauración del servicio.

f) Cuando ocurren fallas de fase a tierra, se tienen generalmente fuertes flamaos.

Este tipo de sistemas se aplica básicamente donde se tengan limitaciones de capacidad mecánica y/o eléctrica,- y donde se requiere reducir la corriente a tierra. En -- particular se usa en generadores de 600 volts ó menos.

Para evitar sobrevoltajes transitorios, el sistema - de neutro aterrizado por reactancia no debe reducir la co rriente abajo del 25% del valor de la corriente trifásica de falla. Esta es generalmente mayor que la mínima co rriente deseada en un sistema aterrizado por resistencia, y, por lo tanto, este sistema no debe considerarse como - una alternativa de sistemas con resistencia.

Este sistema puede usarse como trifásico de cuatro hilos, si la corriente se limita a un valor mucho menor al 100% de la corriente trifásica de falla.

## CAPITULO VII

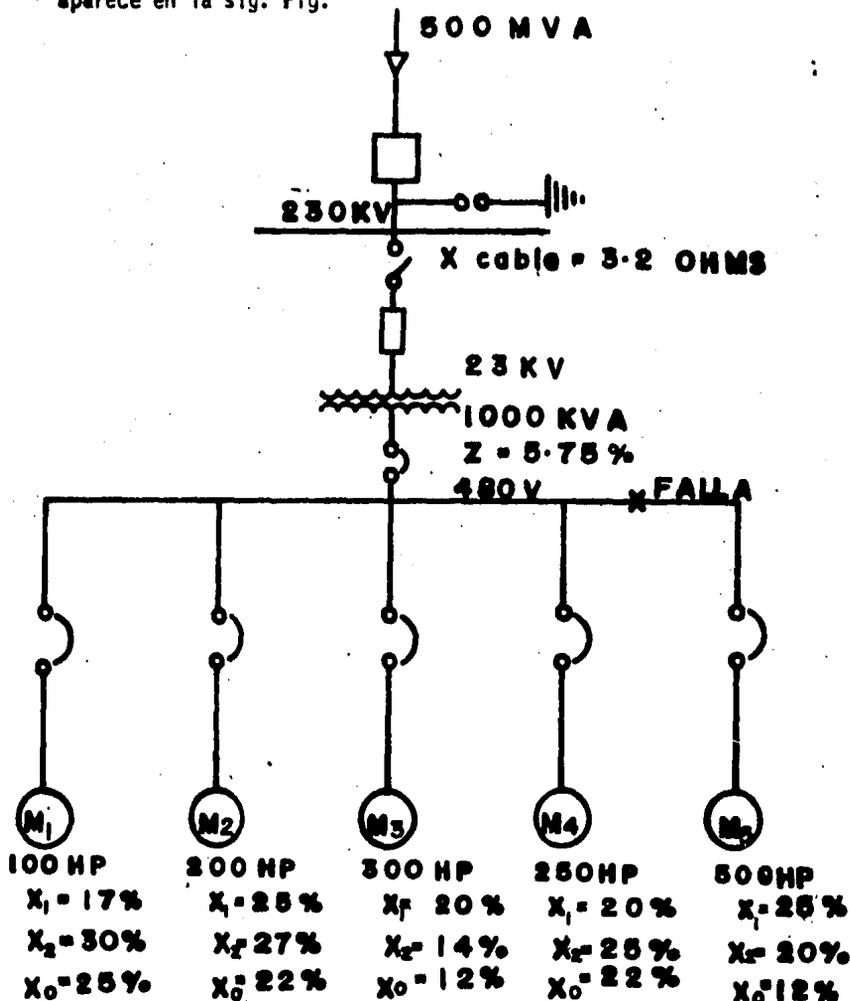
### MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

Por la importancia que tiene desde el punto de vista de la seguridad, las prescripciones reglamentarias señalan que la instalación de una toma de tierra debe comprobarse en el momento de su montaje y revisarse cada 6 años, en la época en que el terreno este más seco. Para ello se medirá por procedimientos adecuados, la resistencia de paso a tierra, reparando inmediatamente los defectos que se encuentren. En los lugares en que el terreno no sea favorable para la buena conservación de las tomas de tierra, éstas, así como los conductores de enlace desde ellas hasta la pieza de empalme a la instalación que protegen, se pondrán al descubierto para su exámen, una vez cada 9 años por lo menos. Las tomas de tierra de características especiales se revisarán obligatoriamente cada tres años.

## CAPITULO VIII

## DISEÑO PRACTICO DE UN SISTEMA DE CONEXION A TIERRA.

Con el objeto de mostrar un ejemplo de diseño de un sistema de tierras, tomaremos como base una planta industrial cuyo diagrama unifilar aparece en la sig. Fig.



$X_1$  = REACTANCIA DE SECUENCIA POSITIVA

$X_2$  = REACTANCIA DE SECUENCIA NEGATIVA

$X_0$  = REACTANCIA DE SECUENCIA CERO

FIGURA VIII-1

Considerando que todos los motores tienen un factor de potencia del 85% y tomando como valores base:

1000 KVA y a las bases de tensión indicadas en cada barra, las impedancias en por unidad son:

Reactancia de la red:

$$X'' = X_1 = X_2 = X_0 = \frac{\text{MVA base}}{\text{MVA c.c.}} = \frac{1}{500} = 0.002 \text{ P.U.}$$

Reactancia del cable:

$$X'' = X_1 = X_2 = X_0 = \frac{X(\Omega) \text{ KVA base}^2}{\text{KV}^2 \times 1000} = \frac{(3.2) (1000)}{(23)^2 (1000)} = 0.006 \text{ P.U.}$$

Reactancia del transformador:

$$X'' = X_1 = X_2 = X_0 = X' \left( \frac{\text{KVA base}_2}{\text{KVA base}_1} \right) \left( \frac{\text{KV base}_1}{\text{KV base}_2} \right)^2 = 0.0575$$

$$\left( \frac{1000}{1000} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 0.0575 \text{ P.U.}$$

Donde:

$X(\Omega)$  = Reactancia real en OHMS

$X'$  = Reactancia a su propia base expresada en P.U.

...

$X''$  = Reactancia a la base deseada expresada en P.  
U.

KVA base 2 = Base de potencia a la cual se desean referir  
las cantidades.

KVA base 1 = Base de potencia a la cual estan expresadas  
las reactancias  $X^1$ .

KV base 1 = Base de tensión a la cual estan expresadas -  
las reactancias  $X^1$ .

KV base 2 = base de tensión a la cual se desean referir  
las reactancias  $X^1$  para obtener los valores  
 $X''$ .

Motores.

$$KVA = \frac{0.746 \times HP}{F.P.}$$

Motor (1) = 100 HP

$$KVA = \frac{0.746 (100)}{0.85} = 87.76$$

$$X_1 = (0.17) \left( \frac{1000}{87.76} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 1.937 \text{ P.U.}$$

$$X_2 = (0.30) \left( \frac{1000}{87.76} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 3.418 \text{ P.U.}$$

$$X_0 = (0.25) \left( \frac{1000}{87.76} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 2.849 \text{ P.U.}$$

Motor (2) = 200 H P

$$\text{KVA} = \frac{0.746 (200)}{0.85} = 175.53$$

$$X_1 = (0.25) \left( \frac{1000}{175.52} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 1.424 \text{ P.U.}$$

$$X_2 = (0.27) \left( \frac{1000}{175.53} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 1.538 \text{ P.U.}$$

$$X_0 = (0.22) \left( \frac{1000}{175.53} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 1.253 \text{ P.U.}$$

Motor (3) = 300 HP

$$\text{KVA} = \frac{(0.746) (300)}{0.85} = 263.29$$

$$X_1 = (0.2) \left( \frac{480}{480} \right)^2 \left( \frac{1000}{263.29} \right) = 0.759 \text{ P.U.}$$

$$X_2 = (0.14) \left( \frac{480}{480} \right)^2 \left( \frac{1000}{263.29} \right) = 0.532 \text{ P.U.}$$

$$X_0 = (0.12) \left( \frac{480}{480} \right)^2 \left( \frac{1000}{263.29} \right) = 0.456 \text{ P.U.}$$

Motor (4) = 250 HP

$$\text{KVA} = \frac{(0.746) (250)}{0.85} = 219.41$$

$$X_1 = (0.20) \left( \frac{480}{480} \right)^2 \left( \frac{1000}{219.41} \right) = 0.912 \text{ P.U.}$$

$$X_2 = (0.25) \left( \frac{480}{480} \right)^2 \left( \frac{1000}{219.41} \right) = 1.139 \text{ P.U.}$$

$$X_0 = (0.22) \left( \frac{480}{480} \right)^2 \left( \frac{1000}{219.41} \right) = 1.002 \text{ P.U.}$$

Motor (5) = 500 HP

$$\text{KVA} = \frac{(0.746) (500)}{0.85} = 438.82$$

$$X_1 = (0.25) \left( \frac{480}{480} \right)^2 \left( \frac{1000}{438.82} \right) = 0.569 \text{ P.U.}$$

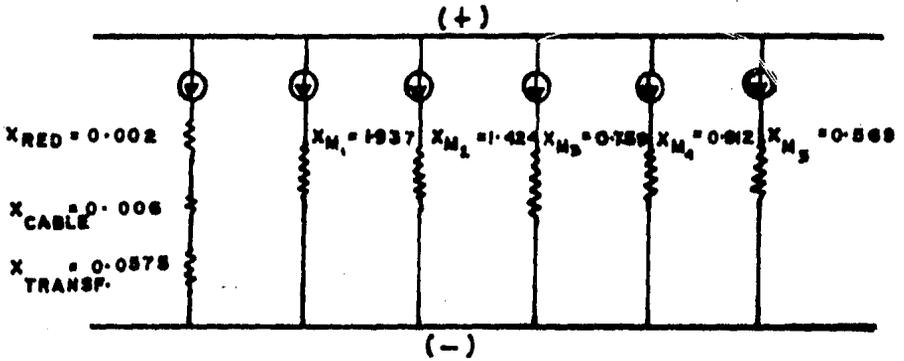
$$X_2 = (0.2) \left( \frac{480}{480} \right)^2 \left( \frac{1000}{438.82} \right) = 0.456 \text{ P.U.}$$

$$X_0 = (0.12) \left( \frac{480}{480} \right)^2 \left( \frac{1000}{438.82} \right) = 0.273 \text{ P.U.}$$

A continuación se muestran los diagramas de secuencia respectivos para este sistema.

...

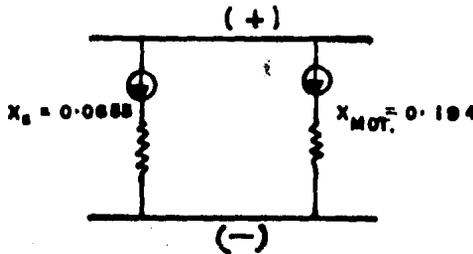
## Secuencia positiva



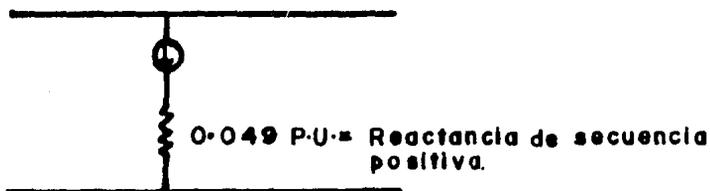
$$X_s = X_{red} + X_{cable} + X_{trans.} = 0.002 + 0.006 + 0.0575 = 0.0655 \text{ P.U.}$$

$$X_{motores} = \frac{X_{M1} X_{M2} X_{M3} X_{M4} X_{M5}}{X_{M1} + X_{M2} + X_{M3} + X_{M4} + X_{M5}} =$$

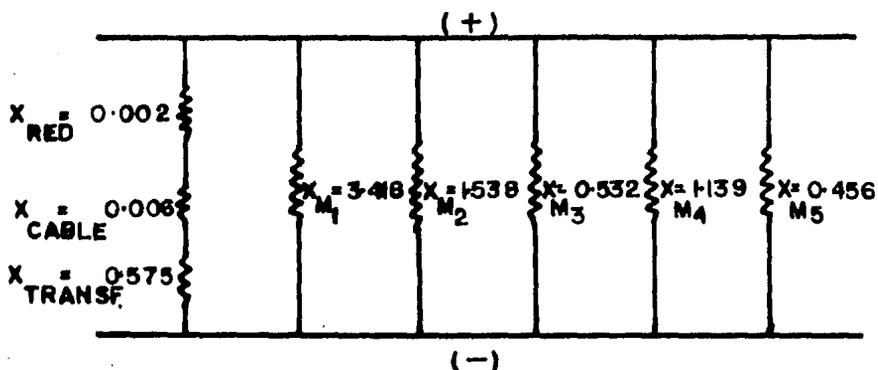
$$\frac{(1.937)(1.424)(0.759)(0.912)(0.569)}{1.937 + 1.424 + 0.759 + 0.912 + 0.569} = 0.194$$



$$X_{paralelo} = \frac{X_s X_{motores}}{X_s + X_{motores}} = \frac{(0.0655)(0.194)}{0.0655 + 0.194} = 0.049 \text{ P.U.}$$



### Secuencia negativa

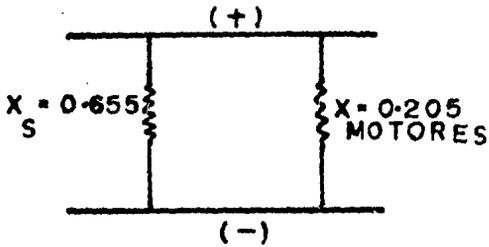


La red de secuencia negativa es igual a la red de secuencia positiva, pero sin fuentes de tensión.

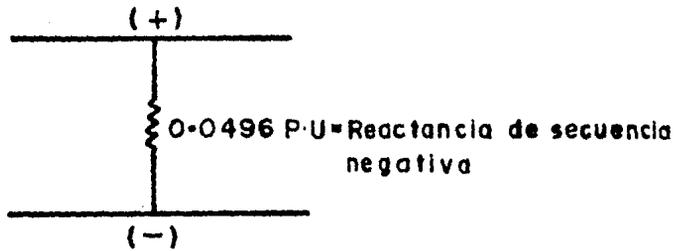
$$X_s = X_{red} + X_{cable} + X_{trans} = 0.002 + 0.006 + 0.0575 = 0.205 \text{ P.U.}$$

$$X_{motores} = \frac{X_{M1} X_{M2} X_{M3} X_{M4} X_{M5}}{X_{M1} + X_{M2} + X_{M3} + X_{M4} + X_{M5}} =$$

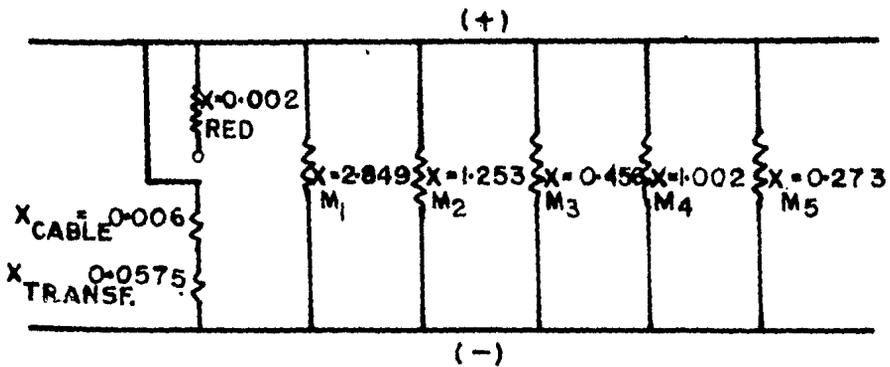
$$= \frac{(3.418)(1.538)(0.532)(1.139)(0.456)}{3.418 + 1.538 + 0.532 + 1.139 + 0.456} = 0.205 \text{ P.U.}$$



$$X_{\text{paralelo}} = \frac{X_s X_{\text{motores}}}{X_s + X_{\text{motores}}} = \frac{(0.655)(0.205)}{0.655 + 0.205} = 0.0496 \text{ P.U.}$$



Secuencia cero

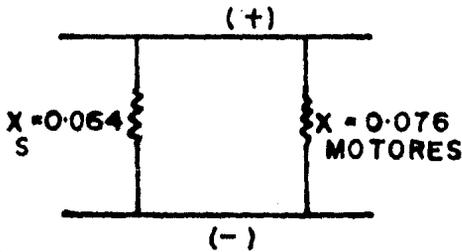


Para la red de secuencia cero solo intervienen los elementos que están conectados a tierra y que forman parte del circuito.

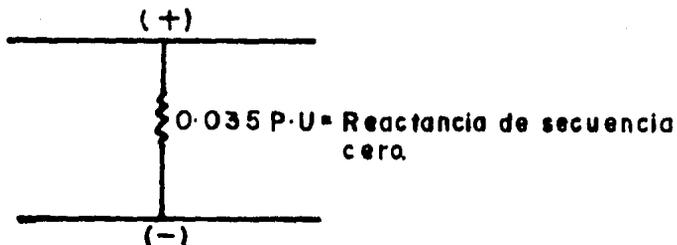
$$X_s = X_{\text{cable}} + X_{\text{transf.}} = 0.006 + 0.0575 = 0.064 \text{ P.U.}$$

$$X_{\text{motores}} = \frac{X_{M1} X_{M2} X_{M3} X_{M4} X_{M5}}{X_{M1} + X_{M2} + X_{M3} + X_{M4} + X_{M5}} =$$

$$= \frac{(2.849)(1.253)(0.456)(1.002)(0.273)}{2.849 + 1.253 + 0.456 + 1.002 + 1.273} = 0.076 \text{ P.U.}$$



$$X_{\text{paralelo}} = \frac{X_s X_{\text{motores}}}{X_s + X_{\text{motores}}} = \frac{(0.064)(0.076)}{0.064 + 0.076} = 0.035 \text{ P.U.}$$



La corriente de circuito corto se obtiene usando la ecuación (III.4):

$$I_F = \frac{3 E}{X_1 + X_2 + X_3} = \frac{3}{0.049 + 0.0496 + 0.035} = 22.46 \text{ P.U.}$$

La corriente en amperes es:

$$I_F = I_{P.U.} \times I_{base}$$

Donde:

$$I_{base} = \frac{\text{KVA base}}{\sqrt{3} \times \text{KV}} = \frac{1000}{\sqrt{3} (0.48)} = 1202.81 \text{ AMP. SIMETRICOS}$$

Entonces:

$$I_F = (22.46)(1202.81) = 27015.11 \text{ AMP. SIMETRICOS}$$

#### DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA DE TIERRA.

El diseño de conexión del sistema a tierra se efectuará considerando los siguientes datos:

Corriente de falla a tierra	27015.11 AMPS.
Duración de la falla	0.5 SEGS.
Area cubierta por la subestación	60x90 METROS.
Temperatura ambiente	30°C

Resistividad promedio del suelo	200 OHMS - METROS
Resistividad superficial (recubrimiento del concreto)	7000 OHMS- METROS
Profundidad de la red	0.5 METROS.
Tipo de conector	MECANICO
Tensión de operación	23/048 KV.

1) Ajuste de la corriente de falla por los factores del crecimiento del sistema y de decremento.

El tiempo de duración de la falla de acuerdo a los sistemas de protección lo consideraremos de 0.5 seg. y con la ayuda de la tabla (No.5) el factor del decremento es;

$$D = 1.00$$

El factor de crecimiento es  $C = 1.00$  ya que no se tienen programadas futuras ampliaciones.

Por lo tanto:

$$I = (D)(C)(I_f)$$

$$I = 27015.11 \times 1 \times 1 = 27015.11 \text{ AMPS.}$$

2) Sección mínima del conductor de la red.

Para determinar la sección del conductor requerido - utilizaremos la ec. (IV.1)

$$I = S \sqrt{\frac{\text{Log} \left( \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{33 t}}$$

$$S = \frac{I}{\sqrt{\frac{\text{Log} \left( \frac{T_m + 234}{234 + T_a} \right)}{33 t}}}$$

S = Area del conductor de la red en (cm)

I = Corriente máxima de falla asimétrica = 27015.11  
AMPS.

t = Tiempo de duración de la falla = 0.5 seg.

Ta = Temperatura ambiente = 30°C

Tm = Temperatura máxima permisible del trabajo del conductor mecánico = 450°C.

De donde:

$$S = \frac{27015.11}{\sqrt{\frac{\text{Log} \left( \frac{450 + 234}{234 + 30} \right)}{33 (0.5)}}} = \frac{27015.11}{0.1583} = 170657.68 \text{ cm.}$$

El conductor adecuado para cubrir esta área, es el conductor de cobre AWG de calibre No. 4/0, el cual, tiene un área de  $A = 107.23 \text{ mm}^2$  y un diámetro de  $D = 11.7 \text{ mm}$ . - según se muestra en la tabla (7) y cumple con lo requerido en la tabla (6).

### 3) Longitud mínima requerida para la red.

Con base a las normas técnicas, se propone un diseño preliminar en forma de malla, con una separación entre conductores de 3 a 6 metros por recomendación de la misma norma en la sección 603. Por lo tanto, y tomando como base esta recomendación tomaremos una separación entre conductores de:

$$D = 6 \text{ metros.}$$

A continuación calcularemos el número de conductores verticales y horizontales.

Número de conductores verticales;

$$n_1 = \frac{\text{Dimensión horizontal de la red}}{\text{Separación entre los conductores}} + 1$$

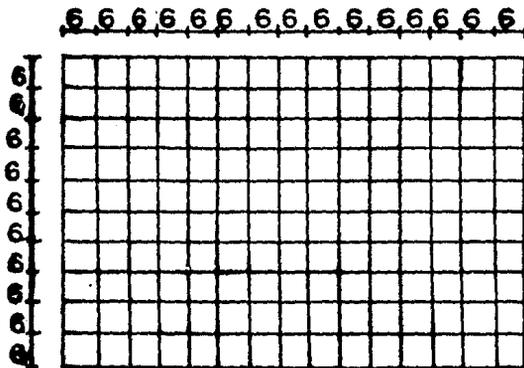
$$n_1 = \frac{90}{6} + 1 = 16$$

Número de conductores horizontales

$$n_2 = \frac{\text{Dimensión vertical de la red}}{\text{Separación entre conductores}} + 1$$

$$n_2 = \frac{60}{6} + 1 = 11$$

Por lo tanto, nuestra red queda como se muestra en la siguiente --  
Fig. (VIII.2).



**FIGURA VIII-2**

Con todo lo anterior tenemos que la longitud total será:

$$L = n_1 l_2 + n_2 l_1 = 11(90) + 16(60) = 1950 \text{ Mts.}$$

Este valor lo comparamos con el que se obtiene de la expresión -- (IV-10). El cual, se define como la longitud mínima del conductor requerido para tener una margen de seguridad aceptable.

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{165 + 0.25 \rho s}$$

Cálculo del factor  $K_m$ :

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

$D = 6$  Mts. separación entre conductores paralelos.

$h = 0.5$  Mts. profundidad de la red.

$d = 0.0117$  Mts. diámetro del conductor.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(6)^2}{(16)(0.5)(0.0117)} = \frac{1}{\pi} \ln \left[ \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{7}{8}\right) \left(\frac{9}{10}\right) \left(\frac{11}{12}\right) \right]$$

$$K_m = 0.694$$

Cálculo del Factor  $K_i$

$$K_i = 0.65 + 0.172 n.$$

$n = 11$  Número menor de conductores paralelos en un sentido

$$K_i = 0.65 + 0.172 (11) = 2.54$$

Por lo tanto:

$$L = \frac{(0.694)(2.54)(200)(27015.11)(\sqrt{0.5})}{165 + 0.25 (7000)} = 3516.79 \text{ Mts.}$$

Debido a que la longitud estimada de 1950 Mts. es me

nor a la longitud requerida de 3516.79 Mts, el diseño anterior queda descartado.

Haciendo referencia a investigaciones hechas por el IIE publicadas en su guía para el diseño de redes de tierra, en el cual, se establece que, para el cálculo de la longitud del conductor se utilice un valor comprensible - entre 1 y 3 para el producto  $Km Ki$  ya que dentro de este rango, por lo general, oscila dicho producto.

Para una mayor eficacia de la red, se recomienda tomar un valor de 1.5 para el producto, ya que con tomar un valor de 3 se diseña una red restringida.

Por lo tanto tenemos:

$$L = \frac{1.5 P I \sqrt{t}}{165 + 0.25 s}$$

Entonces:

$$L = \frac{1.5 (200)(27015.11) \sqrt{0.5}}{165 + 0.25 (7000)} = 2992.57 \text{ Mts.}$$

Con esta nueva longitud calcularemos la separación - entre conductores, según la ecuación (IV.15):

$$D = \frac{2 \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 2 \end{vmatrix}}{L \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 2 \end{vmatrix}}$$

$$L = 2992.57$$

$$l_1 = 90$$

$$l_2 = 60$$

$$D = \frac{2(90)(60)}{2992.57-90-60}$$

$$D = 3.8 \text{ Mts.} \approx 4 \text{ Mts.}$$

Como esta longitud de separación se encuentra comprendida en el rango que recomiendan las normas técnicas, tomaremos una separación entre conductores de 4 Mts. Por lo cual, la configuración nos queda como sigue:

No. Conductores verticales

$$n_1 = \frac{\text{Dimensión horizontal de la red}}{\text{Separación de conductores}} + 1$$

$$n_1 = \frac{90}{4} + 1 = 23.5 \approx 24$$

No. de conductores horizontales

$$n_2 = \frac{\text{Dimensión vertical de la red}}{\text{Separación de conductores}} + 1$$

$$n_2 = \frac{60}{4} + 1 = 16$$

Longitud total del conductor:

Conductores verticales = 1440 Mts.

Conductores horizontales = 1440 Mts.

Total = 2880 Mts.

Como este valor de 2880 Mts.; es menor a la longitud calculada de 2992.57 Mts.; esta longitud debe ser cubierta para tener un valor de seguridad. Para cubrir esta longitud analizamos la opción de utilizar <sup>\*</sup>electrodos. La longitud a cubrir es de 112.57 Mts. utilizando varillas Coperweld de 3.05 Mts., tenemos:

$$\text{No. varillas} = \frac{112.57}{3.05} = 36.9 \approx 37 \text{ varillas.}$$

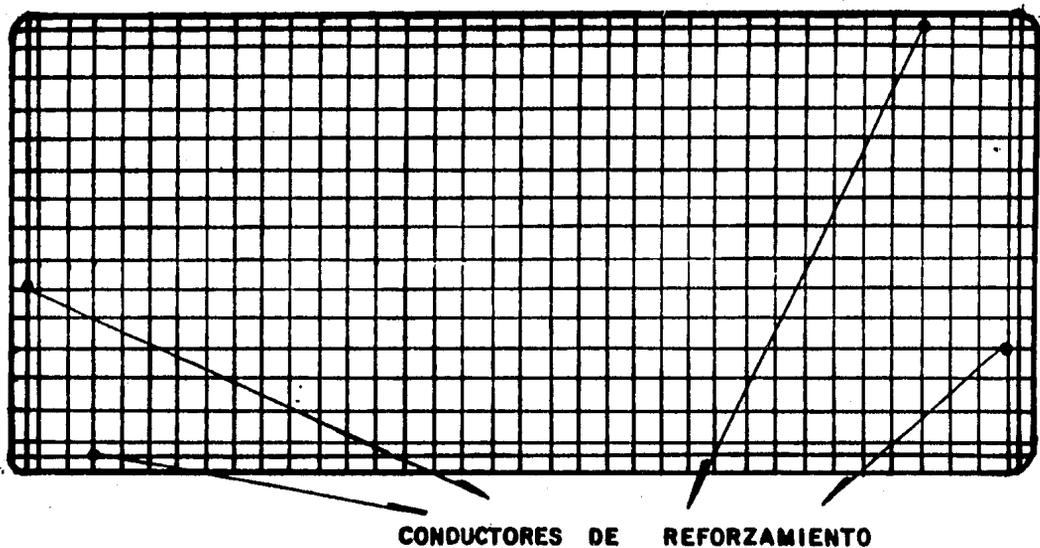
Para la instalación uniforme de estas varillas consideraremos una separación de dos veces la longitud de cada varilla:

$$\text{No. varillas} = \left( \frac{90}{6} + 1 \right) \left( \frac{60}{6} + 1 \right) = 176 \text{ varillas.}$$

Según el análisis anterior observamos que el número de varillas requeridas (37 varillas) no sobrepasa el número de varillas posibles de instalar (176 varillas) sin llegar a saturar la malla y con esto obtenemos la longitud total de conductor.

A continuación procedemos a aumentar los conductores de reforzamiento; esto se hace con la finalidad de evitar

concentraciones de corrientes y, por lo tanto, gradientes de potencial - elevados en los extremos de los cables; redondeando también las esquinas de la malla, según se muestra en la figura (VIII.3.)



### CONFIGURACION DE LA RED FIGURA VIII-3

Por lo tanto, la longitud total de la red será:

Longitud del conductor = 2880 Mts.

Conductores de reforzamiento = 300 Mts.

Total = 3180

## 4) Resistencia de la red.

La resistencia de la red la calculamos según la ecuación (IV.22).

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

R = Resistencia total del sistema de tierra.

r = Radio en metros de un área circular conteniendo la misma área ocupada por la red.

L = Longitud total de conductores enterrados (varillas, marcos, etc.).

$\rho$  = Resistividad eléctrica del terreno en OHMS-MTS.

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

$$r = \sqrt{\frac{5400}{\pi}} = 41.46 \text{ Mts.}$$

De Donde:

$$R = \frac{200}{4(41.46)} + \frac{200}{3180} = 1.27 \text{ OHMS.}$$

El valor obtenido de la resistencia total es correcto, debido a que las normas hacen referencia, de que el valor no debe sobrepasar los 10 OHMS.

5) Tensión máxima de la red.

Según la Ley de Ohm, tenemos:

$$E_{\max} = IR$$

$$E_{\max} = (27015.11)(1.27) = 34308.19 \text{ VOLTS.}$$

6) Tensión de contacto.

La tensión de contacto se calcula según la ecuación

(IV.6)

$$E_{\text{malla}} = \frac{K_m K_i I \rho}{L}$$

Donde:

$$K_m K_i = 1.5$$

$$I = 27015.11 \text{ AMPS.}$$

$$\rho = 200 \quad \text{OHMS-MTS.}$$

$$L = 3180 \quad \text{MTS.}$$

$$E_{\text{malla}} = \frac{(1.5)(27015.11)(200)}{3180} = 2548.6 \text{ VOLTS.}$$

7) Tensión de paso.

Según la ecuación (IV.II)

$$E_{\text{paso}} = \frac{K_s K_i I \rho}{L}$$

$$K_i = 0.65 + 0.172 (16) = 3.4$$

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{4+0.5} + \frac{1}{2(4)} + \frac{1}{3(4)} + \dots \right)$$

$$\left( \frac{1}{36(4)} \right)$$

$$K_s = 0.5785$$

$$E_{\text{paso}} = \frac{(0.5785)(3.4)(27015.11)(200)}{3180} = 3341.89 \text{ VOLTS.}$$

8) Tensiones tolerables.

Las tensiones tolerables están dadas por las ecuaciones:

nes:

$$E_{\text{Ct}} = \frac{165 + 0.25 P_s}{\sqrt{t}} \quad (\text{II.3})$$

$$E_{\text{Pt}} = \frac{165 + P_s}{\sqrt{t}} \quad (\text{II.4})$$

De donde:

$$E_{\text{Ct}} = \frac{165 + 0.25 (7000)}{\sqrt{0.5}} = 2708.22 \text{ VOLTS.}$$

$$E_{\text{Pt}} = \frac{165 + 7000}{\sqrt{0.5}} = 10132.84 \text{ VOLTS.}$$

Como los límites tolerables son:

$$E_{Ct} = 2708.22 \text{ V.}$$

$$E_{Pt} = 10132.84 \text{ V.}$$

Y las tensiones de contacto y de paso son menores a estos límites, como se muestra:

$$E_{\text{paso}} < E_{Pt} ; 3341.89 < 10132.84$$

$$E_{\text{contacto}} < E_{Ct} ; 25448.6 < 2708.22$$

Por todo lo anterior se concluye que la red es optima y cumple con los límites de seguridad; por lo tanto - la red queda aprobada.

## CAPITULO IX

### RECOMENDACIONES PARA UN SISTEMA DE TIERRAS.

- 1) No deben instalarse las tomas de tierra directamente dentro del agua pues, aunque disuelve las sales del terreno, resulta por sí misma mala conductora y además existe mayor peligro de corrosión.
- 2) Se recomienda tratar los terrenos con sal común, la cual actúa sobre el agua haciéndola mejor conductora.
- 3) Debe evitarse, en lo posible la instalación de tomas de tierra en terrenos corrosivos (basuras, escorias, desechos industriales, etc). En tales condiciones o en caso de terrenos salados (playa de mar), es conveniente emplear siempre varilla en lugar de cable conductor, enfundándolo en tubo de plástico en la parte enterrada desde unos 30 cm. encima del suelo hasta el empalme con la placa o estaca.

...

- 4) En las tomas de tierra en sitios pavimentados, se procurará que el conductor de tierra no quede - - aprisionado en el pavimento, dejando alrededor un espacio sin pavimentar, que se rellenará con una capa de tierra apisonada encima de la carbonilla de coke y con la otra capa de grava y arena, tal y como se representa en la fig. (IX.1 y IX.2). De esta forma se facilita la penetración del agua de lluvia hasta la toma de tierra, conservando la -- conductividad del terreno en sus inmediaciones.
- 5) Se recomienda que todo sistema de más de 150 volts, se deben conectar a tierra.
- 6) En cualquier caso en que se utilice energía eléctrica (incluyendo instalaciones domésticas), debe analizarse el riesgo que pudiera presentarse al personal en caso de falla y en base a ello decidir si el sistema requiere anterrizarse.
- 7) Se recomienda una verificación periódica de las condiciones y efectividad de los sistemas de tierra, principalmente de la resistencia de tierra,-

por lo menos una vez por año en época de sequía.

- 8) Se recomienda que si se tienen varios sistemas de tierra en una misma instalación, estos deben interconectarse.
- 9) Hacer un análisis de las ventajas y desventajas - de interconectarse sistemas de tierra a sistemas\_ contra descargas atmosféricas.
- 10) Debe marcarse claramente la importancia y necesidad del uso de los sistemas de conexión a tierra\_ en toda instalación eléctrica, de transmisión, comercial, industrial, etc.

## B I B L I O G R A F I A

1. SISTEMAS DE TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA.  
S. ROBERT EATON.
2. ELEMENTOS DE DISEÑO DE SUBESTACIONES ELECTRICAS.  
ENRIQUEZ HARPER.
3. INDUSTRIAL POWER SYSTEMS HANDBOOK  
BEEMAN
4. IEEE GUIDA FOR SAFETY IN ALTERNATING CURRENT  
SUBSTATION GROUNDING No. 80  
IEEE.
5. NORMAS TECNICAS PARA INSTALACIONES ELECTRICAS  
SECRETARIA DE PATRIMONIO Y FOMENTO INDUSTRIAL.
6. NATIONAL ELECTRICAL CODE  
NATIONAL FIRE PROTECCION ASSOCIATION
7. GROUND CONNECTIONS FOR ELECTRICAL SYSTEMS  
PETERS, O.S.
8. IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR GROUNDING OF  
INDUSTRIAL AND COMERCIAL POWER SYSTEMS  
IEEE.
9. REGLAMENTO DE OBRAS E INSTALACIONES ELECTRICAS (ROIE)  
DIRECCION DE NORMAS S.I.C.