

18



Universidad Nacional Autónoma de México



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES E. N. E. P.

ENEP ARAGON INGENIERIA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRA PARA EL LABORATORIO DEL AREA DE INGENIERIA ELECTRICA DE LA ENEP ARAGON

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N:

JOSE JESUS LOPEZ CRUZ ARTURO PATIÑO VILLANUEVA

San Juan de Aragón, Edo. de Mex 1993

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



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.

# I N D I C E

## INTRODUCCION.

|   |    |
|---|----|
| CAPITULO 1. GENERALIDADES.  | 1  |
| 1.1.- Conceptos básicos sobre un sistemas de tierra .....             | 5  |
| 1.2.- Importancias de los sistemas de tierra .....                    | 6  |
| 1.3.- Peligrosidad de la corriente eléctrica .....                    | 9  |
| 1.4.- Tensiones de paso, de contacto y de transferencia .....         | 16 |
| 1.5.- Diferencia entre el hilo neutro y el hilo de tierra .....       | 23 |
| 1.6.- Clasificación de los sistemas de tierra .....                   | 27 |
| 1.7.- Elementos constitutivos de un sistema de tierra .....           | 29 |
| <br>  |    |
| CAPITULO 2. METODOS UTILIZADOS PARA MEDIR RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD. |    |
| 2.1.- Resistividad. ....  | 35 |
| 2.2.- Medición de la resistividad eléctrica del terreno .....         | 35 |

|  |    |
|--|----|
| 2.3.- Factores que afectan la resistividad del suelo.....  | 50 |
| 2.4.- La resistencia del sistema de tierra.  | 59 |
| 2.5.- Componentes de la resistencia de un sistema de tierra.....   | 60 |
| 2.6.- Cálculo de la resistencia de dispersión a tierra.....  | 64 |
| 2.7.- Medición de la resistencia del sistema de tierras.....   | 68 |
| 2.8.- Fórmulas utilizadas para calcular la resistencia a tierra en electrodos con diferentes formas geométricas..... | 76 |

**CAPITULO 3. ELECTRODOS DE USO COMUN EN LOS SISTEMAS DE TIERRA.**

|   |    |
|---|----|
| 3.1.- Tuberías utilizadas para la conducción de agua..... | 80 |
| 3.2.- Tuberías de acero.....                              | 82 |
| 3.3.- Varillas.....                                       | 83 |
| 3.4.- Electrodos tipo <u>V</u> invertida.....             | 85 |
| 3.5.- Electrodos EP-ET.....                               | 88 |
| 3.6.- Hormigón armado.....                                | 88 |
| 3.7.- Electrodos en forma de placa.....                   | 92 |
| 3.8.- Electrodos en forma de anillo.....                  | 95 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.9.- Electrodo en forma de malla..... | 96  |
| 3.10.- Electrodo para zona rocosa..... | 101 |

**CAPITULO 4. PROCEDIMIENTOS UTILES PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE LOS SISTEMAS DE TIERRA.**

|   |     |
|---|-----|
| 4.1.- Electrodo profundo.....               | 104 |
| 4.2.- Contra-antenas. ....                  | 107 |
| 4.3.- Electrodo múltiples en paralelo.....  | 107 |
| 4.4.- Tratamientos químicos.....            | 113 |
| 4.5.- Corrosión de electrodo de tierra..... | 113 |

**CAPITULO 5. DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRA PARA EL EDIFICIO DE LABORATORIOS DEL AREA DE - INGENIERIA ELECTRICA DE LA ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARA - GON.**

|  |     |
|--|-----|
| 5.1.- Diseño preliminar de un sistema de tierra..... | 128 |
| 5.2.- Datos de diseño.....                           | 129 |
| 5.3.- Parámetros de diseño.....                      | 130 |
| 5.4.- Procedimiento de diseño.....                   | 132 |
| 5.5.- Análisis de operación de la red.....           | 139 |
| 5.6.- Ejemplo de aplicación .....                    | 143 |
| 5.7.- Corrientes de corto circuito, clasifi-         |     |

|   |     |
|---|-----|
| cación y métodos de cálculo. ....   | 148 |
| 5.8.- Lineamientos generales para la inter -<br>conexión de sistemas de tierra..... | 162 |
| 5.9.- Diseño propuesto.....   | 164 |
| <br>  |     |
| <b>CAPITULO 6.    CONEXION A TIERRA DE EQUIPOS INDUSTRIA</b>                        |     |
| <b>LES.</b>   |     |
| <br>  |     |
| 6.1.- Importancia de la conexión a tierra de<br>equipos industriales .....          | 181 |
| 6.2.- Equipos que deben ser conectados a tie<br>rra. ....                           | 184 |
| 6.3.- Protección contra la electricidad es -<br>tática .....                        | 202 |
| 6.4.- Pararrayos .....  | 214 |
| <br>  |     |
| CONCLUSIONES .....  | 232 |
| BIBLIOGRAFIA .....  | 235 |

## I N T R O D U C C I O N

Desde tiempo inmemorial, el hombre como poblador de la esfera terrestre, tuvo la necesidad de protegerse de los fenómenos naturales. Así como se protegía de ellos, aprendió de la observación y de la práctica cómo aprovecharlos y evitarlos.

La electricidad es una forma de energía que al paso de los años el hombre ha aprendido a manejar y controlar obteniendo con ello un sinúmero de beneficios, pero si no es manipulada en forma prudente y adecuada puede producir daños lamentables.

Los potenciales eléctricos que maneja y controla el hombre, siempre son muy pequeños comparados con el potencial eléctrico que nuestro planeta posee, razón por la cual se le puede aplicar cualquier magnitud de potencial sin causar mayores perturbaciones que las que se presentan en la zona de aplicación, ésta característica da como resultado que nuestro planeta se comporte como un gran sumidero atractivo de cargas eléctricas, siendo éste el principio fundamental de los sistemas de tierra. Cada sistema de tierra tiene como finalidad proteger contra descargas atmosféricas y fallas en los servicios de energía eléctrica a los equipos e

instalaciones y la protección de un valor tan importante - como lo es el ser humano.

En este trabajo se trata de dar una metodología simplificada a través de la cual se puedan determinar los parámetros básicos de un sistema de tierras, para establecer - los límites de seguridad cuando se provoquen diferencias de tensión en puntos con los que pueda hacer contacto al ser humano o algún ser vivo cuando se produzca una falla en algún sistema eléctrico, ya sea por corto circuito o por disturbios atmosféricos.

También podrá ser útil a las personas que deseen tener una guía metódica para el diseño práctico de un sistema de tierras basado en los límites que el mismo fijará, o se encontrará con los métodos de prueba que le ayuden a la comprobación de la afectividad de sistemas de tierras ya instalados.

El desarrollo de la tecnología para la utilización de los suelos como conductores de electricidad, bien sea para grandes corrientes, o como potencial de referencia exclusivamente, ha tenido en los últimos años una creciente importancia debido al incremento tan acelerado de equipamiento eléctrico y electrónico en todo tipo de industrias; ad -



quieren dicha importancia pues como ya se dijo tienen dos - aplicaciones fundamentales para la óptima utilización del - equipamiento, como protección del personal y como parte de protección al equipo mismo. Estos dos aspectos son inherentes a la aplicación de una correcta puesta a tierra.

En este trabajo se pretende mostrar los aspectos - más importantes de los sistemas de tierras, entendiéndose - éstos sistemas como el conjunto de tópicos adyacentes al problema de las tierras.

Para su desarrollo, este trabajo se dividió en seis capítulos, en el primero de los cuales, 'las generalidades', - se da una introducción al tema de los sistemas de tierras, - definiendo los conceptos básicos, la importancia de éstos - al aplicarse en todo sistema eléctrico en general, la peligrosidad que representa la corriente eléctrica al atravesar el cuerpo humano, se da una visualización de lo que es el - concepto de tierras en sistemas eléctricos, su clasificación - y los elementos que lo constituyen.

En el segundo capítulo, llamado 'Métodos utilizados para medir resistencia y resistividad', se encontrarán los métodos utilizados para medir la resistividad del terreno, - así como los factores que provocan variaciones en esta pro-

piedad del terreno. A su vez se mencionan los métodos que se emplean con mayor frecuencia en la medición de la resistencia que presenta un sistema de tierras ya instalado, también se anotan una serie de fórmulas que se pueden utilizar par calcular la resistencia que nos dan distintos tipos de electrodos usados, de acuerdo a su configuración geométrica.

Posteriormente, el capítulo tres titulado 'Electrodo de uso común en sistema de tierra', contiene una breve descripción de los electrodos más comunes utilizados para ejecutar un sistema de tierras; sus características más importantes y las ventajas que se obtienen en su aplicación.

En el siguiente capítulo, titulado 'Procedimientos útiles para reducir la resistencia de los sistemas de tierra', se dan al lector algunos procedimientos prácticos para reducir la resistencia de los sistemas de tierra ya instalados y que no cumplen con la resistencia deseada.

El capítulo cinco, titulado 'Diseño de un sistema de tierras para el edificio de laboratorios del área eléctrica en la ENEP Aragón; se da la metodología a seguir para hacer un cálculo práctico de sistemas de tierra en general,

los lineamientos generales para la interconexión de diferentes sistemas de tierra y se propone un diseño de sistema de tierra para el laboratorio.

En nuestro último capítulo llamado 'Conexión a tierra de equipos industriales', se trata la manera de conectar a tierra equipos industriales y algunos comentarios sobre electricidad estática y pararrayos.

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

## I. GENERALIDADES.

Con el objeto de estandarizar y adecuar la conexión a tierra de sistemas eléctricos, se han establecido una serie de normas y lineamientos que se deben seguir al efectuar la construcción de sistemas de tierra.

Por lo que, una vez tomada la decisión de ejecutar la conexión a tierra, deben seguirse estrictamente dichas normas para asegurar un trabajo correcto y que cumpla con los objetivos para los cuales se va a construir.

En toda planta industrial, en la cual el objetivo primordial es la seguridad de la misma y la de su personal, todo el sistema eléctrico y el equipo que con él se relaciona deben estar debidamente conectados a tierra.

La carencia de sistemas de tierra, o una mala conexión de éstos en una planta industrial puede ocasionar pérdidas considerables en el equipo y en ocasiones la muerte del ser humano por electrocución.

El tocar las terminales de un interruptor o un conductor desnudo energizado, no es el único camino por el cual se puede recibir un choque eléctrico peligroso, ya que una sección de aislamiento dañado en un conductor puede ori- --

ginar un contacto entre el conductor desnudo y la cubierta protectora del metal, y si no se toman las precauciones necesarias para evitar ésto, la cubierta de metal estaría a una tensión alta con respecto a tierra, debido a que los neutros de todos los transformadores de distribución de energía eléctrica están conectados a tierra, de tal manera que todos los tubos de agua, gas, armazones estructurales de acero y cualquier piso húmedo de concreto sirven como terminales que están conectados en forma efectiva mediante la tierra al transformador de energía de la planta, quedando latente el peligro de que tarde o temprano una persona toque simultáneamente la cubierta protectora de metal y una de estas terminales de toma de tierra y recibir un choque eléctrico peligroso o fatal. Ver figura 1.1

Si conectamos a tierra estas cubiertas metálicas, y si un conductor energizado se pone en contacto con una de ellas se produciría una condición de corto circuito, el fusible que protege al circuito se fundirá y la corriente de corto circuito será inmediatamente eliminada. Observar figura 1.2

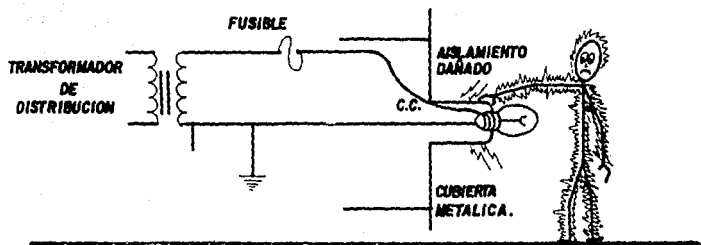


FIG. 1.1  
CONDICION INSEGURA.

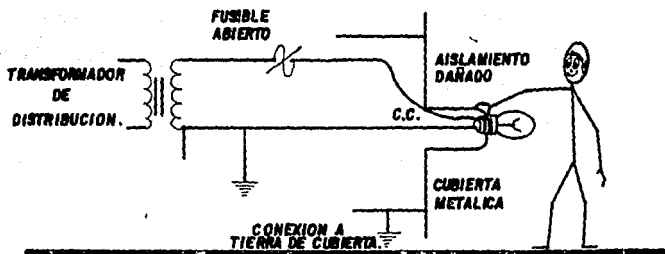


FIG. 1.2  
CONDICION SEGURA

## 1.1 CONCEPTOS BASICOS SOBRE SISTEMAS DE TIERRA.

### Sistema de tierra.

Conjunto de conductores, electrodos, accesorios, etc., interconectados eficazmente entre sí, con el propósito de - conectar a tierra las cubiertas y otras partes metálicas de los equipos eléctricos que lo requieran, manteniendo al mismo tiempo una superficie equipotencial a su alrededor.

### Electrodo de tierra.

Elemento del sistema que se encuentra en íntimo contacto con el suelo (enterrado) y sirve para descargar al terreno las corrientes eléctricas nocivas manteniendo un potencial de tierra en todos los conductores y elementos conectados a él.

### Conductor de tierra.

Conductor que se utiliza para enlazar al electrodo de tierra con las carcasas de los equipos y demás instalaciones expuestas a corrientes nocivas.

### Puesta a tierra o conexión a tierra.

Denota una conexión directa e intencional a tierra en



algún punto o puntos del sistema (tierra física), ya sea -  
en forma simple o a través de algún dispositivo limitador -  
de corriente.

#### Aislado de tierra o sin conexión a tierra.

Significa que no se ha efectuado ninguna conexión in-  
tencional a tierra.

#### Puesta a tierra efectiva.

Unión permanente a tierra a través de un conductor de  
baja impedancia y con suficiente capacidad de conducción de  
corriente, para que al ocurrir una falla a tierra no ocasiono  
diferencias de potencial que pongan en peligro a las per-  
sonas y equipos que se encuentren a su alrededor.

### 1.2 IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE TIERRA.

La conexión correcta a tierra de todo sistema eléctri-  
co, es un factor de suma importancia para la seguridad tanto  
del personal como del equipo eléctrico en sí.

El propósito que se persigue con la existencia de los  
sistemas de tierra en las instalaciones industriales es:

- a).- Protección para el personal operativo, de manera

autorizada o no.

- b).- Protección de los equipos e instalaciones contra las tensiones peligrosas.
- c).- Dar mayor confiabilidad y continuidad al servicio eléctrico.
- d).- Evitar que durante la circulación de corrientes de falla a tierra puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la instalación, proporcionando para ésto un circuito de muy baja impedancia para la circulación de estas corrientes.
- e).- Apego a normas y reglamentos públicos en vigor.

En función al contenido sobre este tema en las Normas Técnicas para Instalaciones Eléctricas (NTIE), se puede decir que en forma general, el objetivo de los sistemas de tierra es el de dispersar en el terreno (suelo o subsuelo), las corrientes eléctricas con características nocivas y reducir las a un potencial que tienda al valor cero con la cual se disminuyen o evitan los daños al personal y al equipo.

El contacto accidental de un cuerpo metálico no conec

tado a tierra y un circuito eléctrico, eleva el potencial - de ese cuerpo al mismo potencial que tiene el circuito con respecto a tierra. Si tal cuerpo corresponde al bastidor de una máquina, a la caja de un interruptor, etc., se convertirán en un serio peligro al ser tocado por una persona. Al efectuar la conexión a tierra se tiende a evitar la elevación del potencial del cuerpo metálico con respecto a tierra, y a pesar de que llegará a circular por dicho cuerpo un fuerte flujo de corriente eléctrica, no presentaría necesariamente un peligro de choques eléctricos al tocarlo, debido a que la corriente circula por el camino que opone menor resistencia a su paso, es por esto que mientras menor sea la resistencia del sistema de tierra se considera más efectivo su funcionamiento.

Es por lo tanto necesario que todos los cuerpos metálicos que en ciertas condiciones anormales, corran el peligro de quedar energizados, como es el caso de estructuras de acero, gabinetes de interruptores y cualquier otra clase de cuerpos metálicos que encierren circuitos eléctricos o estén en una inmediata cercanía, se mantengan siempre al mismo potencial que en tierra. Esto se logra conectando en forma permanente y efectiva a tierra éstos cuerpos metálicos a través de un sistema de tierra de baja impedancia y con suficiente capacidad conductiva de corriente, de tal -

forma que si un cuerpo metálico que en condiciones normales de operación no conduce corriente eléctrica es tocado accidentalmente por un conductor energizado, por chispas de sal to o por la acción de una descarga atmosférica (rayo), la diferencia de tensión momentánea que se desarrolla en el cuerpo metálico afectado y cualquier punto de la tierra, no es lo suficientemente alta como para representar un peligro de choque eléctrico a una persona que lo llegase a tocar en ese instante.

### 1.3 PELIGROSIDAD DE LA CORRIENTE ELECTRICA.

Comunmente puede pensarse que un choque eléctrico con tensión del orden de los 10 000 volts, puede ser mortal en mayor grado que un choque eléctrico con tensión de 100 volts. Esto es erróneo, pues se tiene conocimiento de individuos que han sido electrocutados con aparatos que utilizan el voltaje doméstico ordinario de 110 volts. Del mismo modo han ocurrido accidentes fatales al utilizar aparatos industriales que operan a tan solo 42 volts.

La medida real de la intensidad de un choque eléctrico está en función de la corriente que es forzada a circular por el cuerpo y no tanto del voltaje aplicado. Cual quier dispositivo eléctrico conectado a un circuito domésti

co puede bajo ciertas condiciones, transmitir una corriente mortal.

El grupo médico de la UNIPEDE (Unión Internacional de los productores de energía eléctrica) han llevado a cabo es tudios relacionados a los efectos ocasionados por descargas eléctricas en el cuerpo humano con el fn de obtener una - curva representativa de la peligrosidad y el daño que causa la corriente eléctrica cuando circula a través de un hombre en un accidente eléctrico ocasionado por diversas circuns - tancias. Esta curva tiene por objeto indicar los niveles de corriente en amperes que puede soportar el ser humano y se - consideren con el fn de buscar una mayor protección a la - vida.

Este mismo organismo recomienda la conexión a tierra - de todo sistema eléctrico con los medios adecuados, esta me dida disminuye la posibilidad de una fulminación o sus efec - tos, los cuales están en función de la magnitud de la des - carga y van desde un simple hormigueo hasta la muerte. En - la tabla 1.1 se muestran los efectos que de acuerdo a la - UNIPEDE causan a un hombre los distintos niveles de corrien - te al circular por el cuerpo humano.

Tabla 1.1

Corriente circulante  
en el cuerpo humano.

| (mA)     | Efectos  |
|----------|--|
| Hasta 1  | Imperceptible para el hombre.  |
| 2 a 3    | Sensación de hormigueo.  |
| 3 a 10   | El sujeto consigue generalmente--<br>desprenderse del contacto (libe -<br>ración). De todas formas la co -<br>rriente no es mortal.  |
| 10 a 50  | La corriente no es mortal si se -<br>aplica durante intervalos decre -<br>cientes a medida que aumenta su -<br>intensidad, de lo contrario, los -<br>músculos de la respiración se van<br>afectando por calambres que pue -<br>den provocar la muerte por asfi -<br>xia. |
| 50 a 500 | Corriente peligrosa en función -<br>creciente con la duración del -<br>contacto que da lugar a la fibri -<br>lación cardiaca (funcionamiento -   |

irregular con contracciones muy -  
frecuentes e ineficaces). Posi -  
ble muerte.

Más de 500

Decrece la posibilidad de fibri -  
lación pero aumenta el riesgo de  
muerte por parálisis de los cen -  
tros nerviosos.

Como se puede observar en la tabla anterior, no se -  
considera el voltaje, aunque se requiere de un cierto vol -  
taje para producir la corriente, la cantidad de corriente -  
varía dependiendo de la resistencia del cuerpo humano.

Por ejemplo, la resistencia del cuerpo humano varía -  
dependiendo de los puntos de contacto, del estado anímico -  
del individuo y las condiciones de la piel (Húmeda o seca). -  
Entre los oídos por ejemplo la resistencia interna es tan so -  
lo de 100 ohms, mientras que entre las manos y los pies se -  
encuentra por los 500 ohms. La resistencia de la piel puede -  
variar de 1 000 ohms cuando está mojada a más de 50 000 ohms  
cuando está seca. Cuando un sujeto ha entrado en contacto -  
con elementos energizados, comenzarán a manifestarse con -  
tracciones musculares principalmente en las articulaciones, -  
particularmente de las manos, extendiéndose a los del tron -

co, de la nuca y del rostro, este fenómeno se presenta en fracción de segundos por lo que es de particular importancia que los sistemas de tierra se encuentren en óptimas condiciones en todo momento para poder actuar cuando sea requerido.

Cabe señalar, que la función de los sistemas de tierra es proteger contra choques eléctricos producidos por las corrientes nocivas que en un momento de falla pueden llegar a circular por elementos que normalmente no están energizados, pero en ningún momento protege de recibir choques eléctricos a personas que hacen contacto directo con partes vivas energizadas de un circuito, hecho por el cual a toda instalación eléctrica sólo debe tener acceso para manipularla personal idóneo y con conocimientos suficientes, acordes al tipo de instalación que se trate y desde luego siguiendo todas y cada una de las reglas de seguridad que se deben tener al operar sistemas eléctricos tales como:

- a).- Estar siempre alerta.
- b).- Usar herramientas adecuadas con propiedad.
- c).- Usar ropas protectoras.
- d).- Seguir procedimientos establecidos y
- e).- Evitar riesgos innecesarios.



La curva de peligrosidad de la figura 1.3 considera la intensidad de corriente eléctrica que soporta el hombre y el tiempo de desprendimiento. Según la UNIPEDE.

De acuerdo a la compañía de luz y fuerza del centro S.A. se pueden tolerar intensidades de corrientes superiores, sin producir fibrilación, si la duración es muy corta. La ecuación que liga los parámetros de la intensidad de corriente tolerable y el tiempo que puede tolerarla el organismo es:

$$I_K^2 \cdot t = 0.0134$$

de donde

$$I_K = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

Donde" I = Valor efectivo de la corriente que circula por el cuerpo en Amperes.

t = Tiempo de duración del choque eléctrico en segundos.

0.116 = Constante de energía derivada empíricamente.

Es necesario para una buena comprensión, tener en --

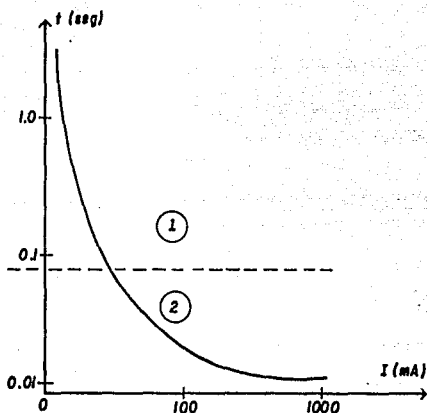


FIG. 1.3

- ① ZONA ESTADÍSTICAMENTE NO PELIGROSA PARA LA INTEGRIDAD FÍSICA DE LAS PERSONAS.
- ② ZONA PELIGROSA: SIGUIENDO LA VARIACION DE LA CURVA DE ARRIBA HACIA ABAJO SE PASA DEL PELIGRO DE LAS CONTRACCIONES MUSCULARES AL DE ASFICIA Y LUEGO AL DE FIBRILACION CARDIACA

cuenta los diversos casos que se pueden presentar al hacer contacto con superficies a diferente potencial.

Las diferencias de potencial se determinan de acuerdo con los conceptos de tensiones; de paso, de contacto y de transferencia que a continuación se definen.

#### 1.4 TENSIONES DE PASO, DE CONTACTO Y DE TRANSFERENCIA.

En base a las leyes de la electricidad y magnetismo, sabemos que, al circular la corriente por un conductor eléctrico, se establece a su alrededor un campo electromagnético que depende de la intensidad de la corriente conducida.

Un electrodo de tierra tiene como misión conducir y dispersar en el terreno las corrientes nocivas producidas por la falla de un circuito eléctrico o debido a los disturbios atmosféricos (rayos). Así cuando esto sucede, se forma alrededor del electrodo un campo magnético en forma de anillos equipotenciales que dependen de la forma que tenga éste, de sus dimensiones y de la resistividad del terreno donde se encuentre hincado.

Estos anillos equipotenciales, producen un embudo de tensión en las zonas próximas a la zona del electrodo de --

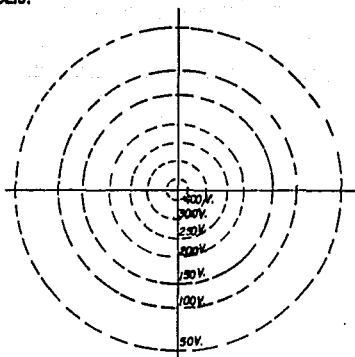
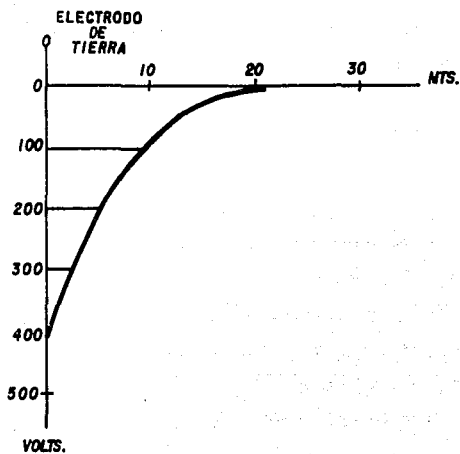


FIG. I. 4

DISTRIBUCION DE LAS CAIDAS DE TENSION EN LAS TOMAS DE TIERRA.

tierra; que es máximo en la vertical del electrodo y que resulta casi inapreciable a unos 20 metros de distancia, como se muestra en la figura 1.4.

#### 1.4.1. TENSION DE PASO.

Es la tensión que durante el funcionamiento del sistema de tierra puede resultar aplicada entre los pies de una persona que se encuentre parada en las cercanías del electrodo dispersor. En otras palabras, es la diferencia de potencial existente entre dos puntos sobre la superficie de la tierra separados por una distancia de un paso y que puede suponerse de aproximadamente un metro en la dirección de un máximo gradiente de potencial. En la figura 1.5 se puede observar el circuito equivalente de la tensión de paso.

El valor del voltaje de paso tolerable por un individuo se puede calcular por medio de la expresión:

$$V_{\text{paso}} = (R_k + 2R_f)I_k \text{ volts.}$$

$R_f$  = Resistencia a tierra de un pie en ohms que para fines prácticos se puede tomar como:

$R_f = 3\rho_s$ ; siendo  $\rho_s$  la resistividad del suelo en ohms-metro.

$R_k$  = Resistencia del cuerpo en ohms, es variable, sin embargo es aceptable tomar un valor promedio de 1000 ohms; tal como lo recomienda la guía 80 del IEEE.

$I_k$  = Valor eficaz de la corriente que circula por el cuerpo, expresado en amperes y se calcula como:

$$I_k = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

$t$  = Duración de la falla en segundos y se toma generalmente menor de 3 segundos.

Por lo tanto para fallas con duración menor de cinco segundos:

$$V_{\text{paso}} = \frac{(1000 + 6\rho_s) 0.116}{\sqrt{t}}$$

$$V_{\text{paso}} = \frac{116 + 0.7\rho_s}{\sqrt{t}}$$

Para fallas permanentes sostenidos se toma:

$$I_K = 0.009 \text{ Amperes.}$$

$$V_{\text{paso}} = (1000 + 6 \rho_g) 0.009$$

En estos cálculos, las resistencias de los electrodos de tierra, la del contacto de la mano y la de los zapatos, se consideran despreciables.

#### 1.4.2 TENSION DE CONTACTO.

Es aquella tensión a la que puede verse sometido el cuerpo humano como consecuencia de un contacto con las carcasas y estructuras metálicas que normalmente no están bajo tensión pero que eventualmente, pueden estarlo a causa de una avería en los circuitos eléctricos. La figura 1.6 nos muestra el circuito equivalente de la tensión de contacto.

De tal manera que el voltaje tolerable por el ser humano se puede calcular por medio de la expresión:

$$V_{\text{contacto}} = (R_k + \frac{Rf}{2}) I_k$$

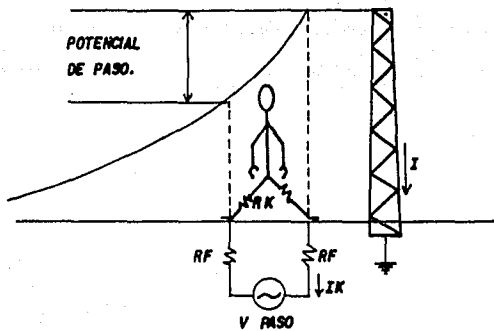


FIG. 1.5.  
VOLTAJE DE PASO.

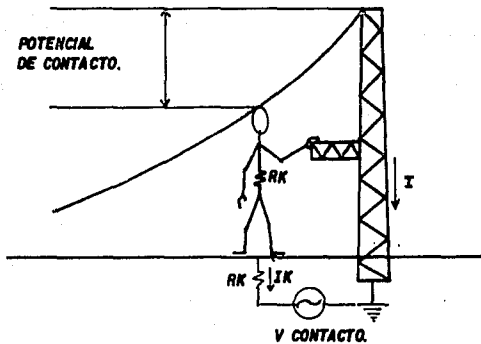


FIG. 1.6  
VOLTAJE DE CONTACTO.



$$= (1000 + \frac{3 \rho_s}{2}) \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

Para fallas con duración menor de cinco segundos:

$$V_{\text{contacto}} = \frac{(116 + 0.17 \rho_s)}{\sqrt{t}}$$

#### 1.4.3 TENSION DE TRANSFERENCIA.

Son las que se presentan en sitios alejados de la subestación donde ocurre la falla, usualmente esto se debe a presencia de estructuras enterradas en la cercanía de la subestación como tuberías, cercas metálicas, etc. Si una persona toca un conductor que ha sido conectado a tierra a una distancia mucho mayor que las dimensiones del sistema de tierra; la tensión del choque eléctrico puede ser esencialmente igual a la elevación total de potencial del sistema de tierra bajo condiciones de falla. En forma general el procedimiento que se aplica para limitar el peligro de potenciales transferidos, consiste en instalar juntas aislantes en las estructuras enterradas o superficiales cercanas a la subestación y para los cables de comunicación, en aplicar transformadores de aislamiento.

El potencial de transferencia se considera como un ca

so especial de potencial de toque, por lo tanto su valor puede limitarse a lo establecido por la expresión para voltaje de toque. Figura 1.7

#### 1.5 DIFERENCIA ENTRE EL HILO NEUTRO Y EL HILO DE TIERRA.

En el estudio de los sistemas de tierra, es importante tener en cuenta la diferencia que existe en el hilo neutro con respecto al hilo de tierra en los sistemas eléctricos.

El neutro se forma de la unión de los conductores de fase del sistema eléctrico conectado en estrella, su principal función es la de proporcionar la facilidad para obtener igualdad de tensiones en éstos sistemas. Debido a esto es que en condiciones normales de funcionamiento del sistema eléctrico se presenta circulación de corriente.

En un sistema balanceado, teóricamente al conductor neutro se le considera un potencial nulo con respecto a los conductores de fase, pero como ésta es una condición difícil de mantener en la práctica, en los sistemas desbalanceados el hilo neutro debe soportar la corriente de desbalanceo que es igual a la corriente que circula por la fase más cargada.

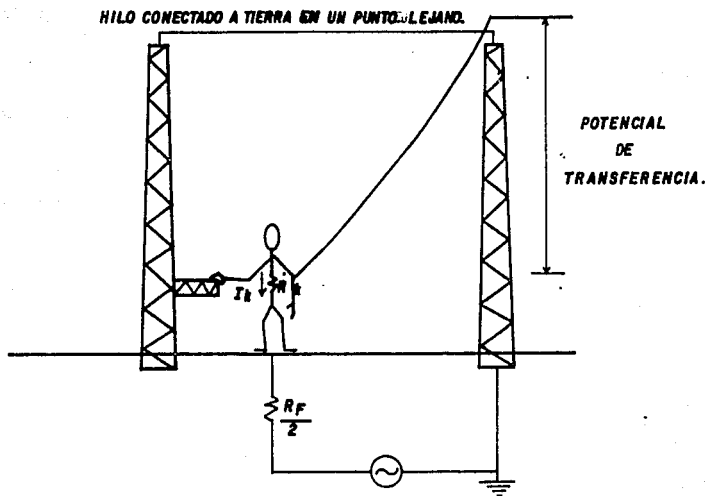
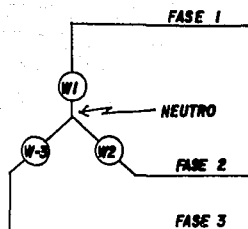


FIG. 1.7  
 POTENCIAL  
 DE  
 TRANSFERENCIA.

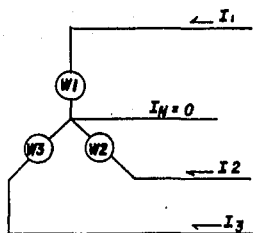
Por otro lado, el hilo de tierra es aquel que conecta al blindaje de los equipos eléctricos con los electrodos - que están en contacto directo con la tierra o suelo que pisamos, se utiliza para proporcionar un camino de baja impedancia para conducir las corrientes nocivas que pueden presentarse en lugares por los que en condiciones normales de funcionamiento no deben existir y así evitar potenciales peligrosos a las personas que toquen por alguna razón esos sitios energizados en el momento de producirse una falla en - el sistema eléctrico.

En algunas ocasiones se puede presentar una diferencia de potencial entre el hilo neutro y el hilo de tierra, para evitar esta situación, debe conectarse a tierra el neutro de los sistemas eléctricos uniendo así la tierra de aterrizaje de los equipos con la tierra de aterrizaje del -- transformador, reduciendo con ésto las resistencias a valores tendientes a cero.

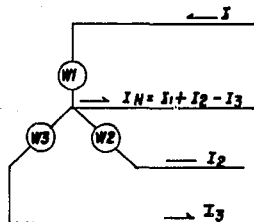
La función que desempeña un neutro aterrizado entre - otras, es la de mantener fijo el centro de un sistema trifásico auxiliado en cierto modo por su balanceo. Figura 1.8



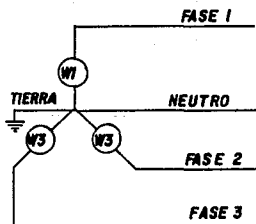
1.8 a  
**SISTEMA POLIFASICO  
 CONECTADO EN ESTRELLA.**



1.8 b  
**SISTEMA POLIFASICO  
 BALANCEADO.**



1.8 c  
**SISTEMA POLIFASICO  
 DESBALANCEADO.**



1.8 d  
**SISTEMA POLIFASICO  
 CON NEUTRO ATERRIZADO.**

**FIG. 1.8  
 SISTEMAS POLIFASICOS  
 CONECTADOS EN ESTRELLA.**

## 1.6 CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE TIERRA.

De acuerdo a su uso o función, los sistemas de tierra se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Sistemas de tierra para protección.
- Sistemas de tierra para servicio y
- Sistemas de tierra temporal.

### - Sistema de tierra para protección.

Es el sistema utilizado para conectar a tierra las partes de una instalación eléctrica que en condiciones normales no se encuentran sujetas a tensiones pero que pueden tener diferencia de potencial a causa de fallas accidentales en los circuitos eléctricos. En esta clasificación podemos mencionar gabinetes de tableros eléctricos, tanques de transformadores, carcazas de máquinas, estructuras metálicas de las subestaciones y líneas de transmisión y en general todos los soportes metálicos de equipos y aparatos.

### - Sistema de tierra para servicio.

Considerando que es necesario establecer una conexión a tierra en determinados puntos de una instalación eléctrica

ca con el fin de dar una mayor seguridad, un mejor funcionamiento y una mayor regularidad en la operación es necesario conectar a tierra ciertos puntos del sistema eléctrico, tales como: Neutros de transformadores y generadores con devanados conectados en estrella, apartarrayos, hilos de guarda, pararrayos y en fin todos los elementos que se sabe están sujetos a corrientes eléctricas importantes de corto circuito o rayos.

Con el fin de evitar tensiones de paso peligrosas, la localización de los electrodos de tierra se debe hacer donde haya menor flujo de personal, máximo de humedad y lejano de terrenos donde se encuentren instalaciones que puedan transportar el fenómeno a sitios no deseados, como ocurre con drenajes, canalizaciones eléctricas, telefónicas y ductos de combustible.

- Sistemas de tierra temporal.

Son aquellos que se efectúan cuando es necesario hacer una reparación del sistema eléctrico, para mantenimiento, para efectuar libranzas y en general para realizar conexiones temporales a tierra con partes de la instalación puesta fuera de servicio con el fin de que sean accesibles sin peligro para los trabajos a realizar.

## 1.7 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

Los elementos principales que constituyen un sistema de tierra son:

- Conductores de conexión.
- Electrodos o dispersores.
- Conectores y accesorios.
- La tierra considerada como polo y conductor eléctrico.

### Conductores de conexión

Son los elementos del sistema de tierra utilizados para conectar a los elementos que se desea aterrizar con el electrodo.

La función que cumplen los conductores es la de conducir la corriente eléctrica nociva a través de ellos con poca resistencia. Los materiales más usados para su fabricación son el cobre y el aluminio; se fabrican en diferentes tamaños y se definen por su sección transversal en  $\text{mm}^2$ . Comercialmente es usual denominarlos por la nomenclatura de la American Wire Gauge (AWG) o en miles de milésima de pulgada (MCM).



Para los sistemas de tierra es recomendable utilizar conductores eléctricos de cobre por sus características tanto eléctricas como térmicas y su alta conductividad y sobre todo por su resistencia a la corrosión. El calibre del conductor está en función del tipo de sistema de tierra y de las características del elemento por aterrizar.

#### Electrodos o dispersores.

Son los elementos del sistema de tierra que están en íntimo contacto con el terreno y tienen como misión dispersar en el terreno las corrientes eléctricas nocivas debidas a fallas en los circuitos eléctricos o a la acción de las descargas atmosféricas.

En el mercado hay en existencia diferentes tipos de electrodos de tierra, su elección atiende a las características del terreno donde se necesite colocar, a la resistencia que se quiera obtener y a la efectividad que se requiera por parte del sistema de tierra. Los más usuales debido a su costo y a la facilidad que prestan para ser enterrados son las varillas copperweld.

#### Conectores y accesorios.

Son los elementos utilizados para unir eficazmente -

los diferentes elementos del sistema de tierras y al mismo tiempo efectuar la conexión de los diferentes elementos que se requiere aterrizar con el propio sistema de tierra.

Los conectores utilizados en los sistemas de tierra son principalmente de tres tipos:

- Conectores atornillados.
- Conectores a presión y
- Conectores soldados.

Los conectores atornillados se fabrican de bronce de alto contenido de cobre, formando dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material está formado por bronce al silicio que les da alta resistencia mecánica y a la corrosión.

Los conectores a presión son más económicos que los atornillados y dan mayor garantía de buen contacto.

Las conexiones soldadas se usaron mucho hace algunos años y se siguen utilizando actualmente con buenos resultados, pero se ha ido desplazando por la introducción de los conectores atornillados y los de presión aunado a esto, a que se han detectado fallas debido a que la fusión de las

uniones de los cables es irregular y forma grandes zonas huecas que producen falsos contactos y aumenta la resistencia eléctrica en la unión. La efectividad de las conexiones sol-dadas además depende en gran parte de la habilidad del soldador.

#### La tierra considerada como polo y conductor eléctrico

El elemento principal de todo sistema de tierra es en sí la tierra propiamente dicha, o sea el suelo que pisamos.

El suelo o tierra es conductor de electricidad, de potencial prácticamente nulo, cuya propiedad presenta algunos inconvenientes y no pocas ventajas. Entre los primeros cabe citar el peligro de electrocución que representa para las personas el tocar un conductor eléctrico energizado cuando los pies u otra parte del cuerpo se haya en contacto con el suelo, pues en ese instante la corriente atraviesa el organismo y puede ocasionar la muerte. Entre las ventajas que presenta la conductividad del suelo, destaca su capacidad colosal que permite transmitirle todas las energías parásitas por medio de tomas de tierra sin modificar sus características originales.

Si se conectan las masas metálicas con el suelo, al existir un mal contacto y pasar las corrientes por aquellas

masas, el suelo se hallará a su mismo potencial y la corriente que pueda pasar entonces por el cuerpo es inofensiva y generalmente imperceptible.

## C A P I T U L O   I I

### METODOS UTILIZADOS PARA MEDIR RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD

## II. METODOS UTILIZADOS PARA MEDIR RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD.

Al hacer referencia a los sistemas de tierra, se debe tener en cuenta la resistividad eléctrica propia del terreno, cuyo valor depende de su propia naturaleza, humedad, compactación y temperatura, entre otras. Cuando debido a las condiciones naturales del terreno no se tenga la resistencia a tierra deseada, se procede a disminuir la resistividad del terreno circundante al electrodo, empleando métodos destinados para este fin.

### 2.1 RESISTIVIDAD.

En sus especificaciones, la CFE define a la resistividad como la resistencia específica de un material, que se determina sobre una muestra del mismo, que tenga un centímetro de longitud y un centímetro cuadrado de sección transversal, teniendo como unidades ohms-cm.

### 2.2 MEDICION DE LA RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL TERRENO.

La resistividad de un sistema de tierras, depende de la resistividad del terreno en el cual esté instalado y varía de acuerdo a su constitución o composición química, gra

do de humedad, temperatura y compactación.

De acuerdo a mediciones hechas por el Departamento de Estándares de los Estados Unidos de Norteamérica, la resistividad del terreno varía de 2 a 3000 ohms.

La tabla 2.1 nos da una idea de valores de resistividad de tierra en ohms-m, suponiendo una sección de un metro cuadrado.

Tabla 2.1

| Naturaleza del suelo                      | Resistividad promedio<br>(ohms-m) |
|---|-----------------------------------|
| Terreno vegetal.                          | 2-50                              |
| Terreno de cultivo o arcilloso            | 2-100                             |
| Terreno negro con granos<br>(limo y lodo) | 5-250                             |
| Tierra arenosa seca                       | 200                               |
| Tierra arenosa húmeda                     | 1 000                             |
| Tierra con guijarros y cemento            | 1 000                             |
| Tierra rocosa húmeda (piedra molida)      | 3 000                             |
| Roca porosa                               | 20-200                            |
| Roca sólida                               | 10 000                            |

Desde el punto de vista eléctrico, la determinación de la resistividad del terreno deberá obtenerse a través de mediciones directas, evitando siempre la aplicación de tabulaciones de carácter general. Las mediciones se deben hacer en varios lugares dentro del predio de la instalación, empleando alguno de los métodos que tradicionalmente se utilizan para éste propósito. Estas mediciones permitirán establecer la representación del suelo a través de un modelo homogéneo o un modelo estratificado.

Todos los métodos que se aplican para la medición de la resistividad del terreno, tienen su principio en la ley de ohm, misma que se usa para la medición de resistencia de conductores que en éste caso es el terreno.

Para medir la resistividad del terreno, es necesario pasar corriente a través de él, lo que se logra insertando electrodos en el suelo para obtener la circulación de corriente. El método generalmente empleado es el de los cuatro electrodos, del cual existen varias versiones que dependen de la configuración de los electrodos; en general se basan en la teoría desarrollada por Frank Wenner.

#### Método de Wenner.

La configuración universal del método de Wenner de -



los cuatro electrodos se muestra en la figura 2.1.

Como se observa, los electrodos se colocan en línea -  
 recta y a una misma profundidad de penetración, las medicio -  
 nes de resistividad dependerán de la distancia que exista -  
 entre electrodos y del contacto de éstos con la tierra. Por  
 lo contrario, no dependen en forma apreciable del tamaño y  
 del material de los electrodos.

Al usar esta configuración, si la distancia entre -  
 electrodos y la resistencia que se opone al paso de la co -  
 rriente son conocidos, y siempre que en la medición los -  
 electrodos 1 y 4 sean usados para inyectar corriente, y la  
 diferencia de potencial se mida entre los electrodos 2 y 3;  
 la resistencia específica del suelo estará dada por la ex -  
 presión:

$$\rho = \frac{4 \pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} = \frac{4 \pi a R}{n}$$

donde"  $\rho$  = Resistividad del terreno en ohm-m.

R = Resistencia medida en ohms.

a = Distancia entre electrodos en metros.

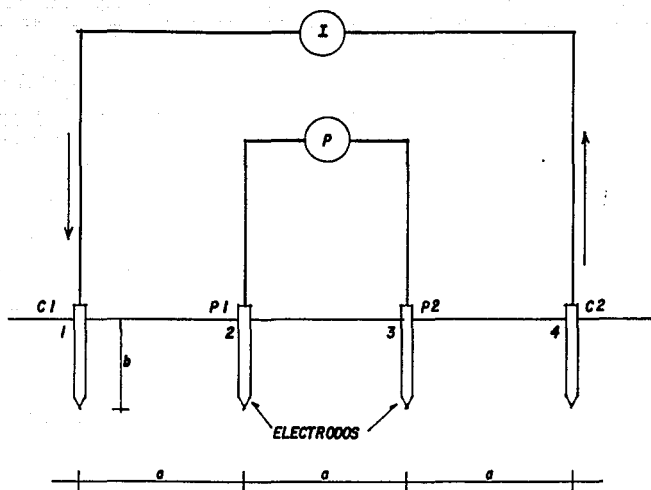


FIG. 2.1

CONFIGURACION UNIVERSAL  
DEL METODO DE WENNER.

b = Profundidad de penetración de los electrodos en metros.

n = Factor aproximado que tiene un valor entre uno y dos (depende de la relación b/a; si b=a -  
n = 1.187; si b=2a, n = 1.030; si b = 4a, -  
n = 1.003).

La expresión de la resistividad puede aproximarse a:

$$= 4 \pi a R \quad \text{si } b \gg a$$

$$= 2 \pi a R \quad \text{si } b \ll a$$

#### Método de Schlumberger.

Este es una modificación del método de Wenner. También emplea cuatro electrodos, en este caso la separación entre electrodos centrales o de potencial se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los interiores, a distancias múltiples (na) de la separación base de los electrodos internos (a). La configuración correspondiente a este método se muestra en la figura 2.2.

La expresión de la resistividad con este método corresponde a:

$$\rho_a(\text{Sch}) = \pi R n (n + 1) a$$

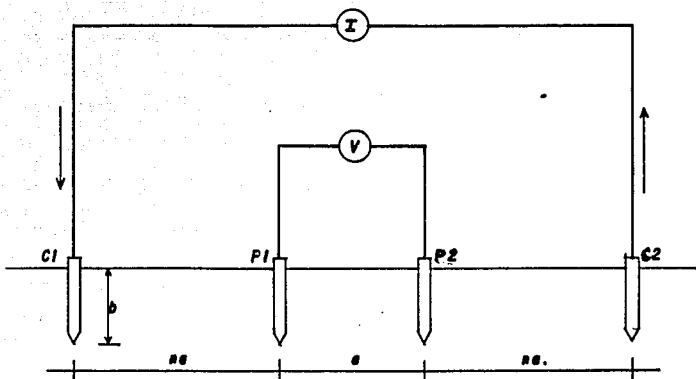


FIG. 2.2  
 CONFIGURACION ESQUEMATICA  
 DEL METODO DE SCHLUMBERGER.

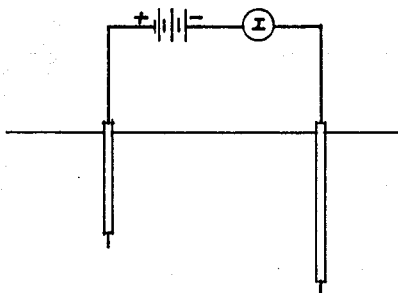


FIG. 2.3  
 REPRESENTACION ESQUEMATICA  
 DEL METODO DE SHEPARD CANES.

El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando el aparato de medición (megger de tierras) no tiene la precisión adecuada para valores de resistencia pequeñas, ya que con la separación entre electrodos del método de Wenner, se introducen errores si se emplean aparatos de poca precisión cuando la resistencia del terreno es del orden de 20 ohm-m y los valores de resistencia proporcionados por el aparato son del orden de  $10^{-3}$  ohms.

#### Sistema Shepard Canes.

Se usa una corriente continua que se establece por medio de una batería de tres volts de dos celdas, el medidor-conectado en serie es un miliamperímetro de doble rango 0-25 mA, graduado para leerse en ohms-cm. Esta lectura es directa.

Los electros están enterrados en el suelo por dos barras aisladas, con el cátodo de mayor longitud para evitar la polarización. Este método se emplea para pequeñas muestras en el terreno, ver figura 2.3 .

#### Método utilizado en laboratorio.

Para valores exactos, solamente se puede lograr en el laboratorio por medio del control de humedad y temperatura.

El método utilizado en laboratorio para muestras pequeñas, se reduce a una caja de madera, plástico o material altamente resistivo de dimensiones determinadas; únicamente con dos placas metálicas laterales que establecen una intensidad de corriente por medio de una batería en serie con un amperímetro, la caída de potencial se registra en un voltímetro, el cual tiene sus terminales separadas por una longitud (L) equidistante de las placas de metal, tal como se ve en la figura 2.4.

La resistencia se calcula con la ecuación:

$$R = \frac{\rho L}{W D} \quad (\text{ohms}).$$

Siendo W y D = a; y de la ley de ohm  $R = \frac{V}{I}$  (ohms).

Igualando estas ecuaciones y despejando  $\rho$ , tenemos:

$$\rho = \frac{R W D}{L} = \frac{V A}{I L} \quad (\text{ohms-cm})$$

#### Procedimiento de medición de la resistividad.

El material y equipo necesario para efectuar la medición de la resistividad en el terreno es:

- a) Megger de tierras o el vibroground.

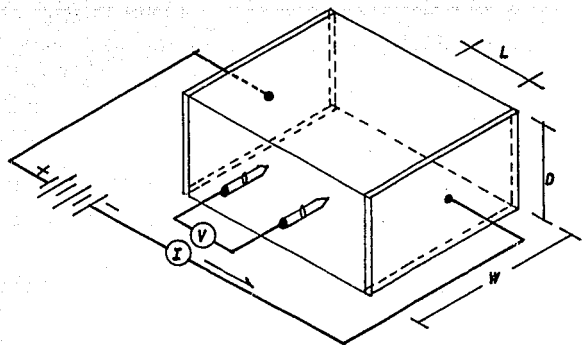


FIG. 24

DISPOSITIVO EMPLEADO EN LABORATORIO.

- b) Varillas copperweld (se pueden utilizar de aluminio, cobre, antimonio o fierro) de 15.9 mm de diámetro y de 600 a 1 000 mm de longitud, con punta en un extremo.
- c) Cables de cobre aislado para 600 volts calibre No. 14 al No. 10 AWG, con caimanes o conectores mecánicos de grapa en un extremo y en el otro la terminal adecuada al medidor de resistencia que se utiliza.
- d) Cinta métrica.

Las mediciones deben hacerse en épocas de sequía, evitando realizar mediciones después de días lluviosos o en temporada de lluvias.

Una vez conocida el área en que se hará la instalación, utilizando el método de Wenner se procederá a realizar la medición de la forma siguiente:

- 1) Clavar cuatro varillas en el suelo a una profundidad de 20 a 30 cm, dispuestas en línea recta con separación uniforme entre ellas. Se debe procurar que las varillas queden más o menos en un plano horizontal y que no existan huecos alrededor de las varillas. Ver figura 2.5.



- 2) Las terminales de corriente  $C_1-C_2$  del instrumento se conectan a través de los cables a las varillas de los extremos, las de potencial  $P_1-P_2$  a las varillas intermedias.
- 3) Se energiza el instrumento (de acuerdo a su instructivo) y se toman las lecturas respectivas de resistencia en ohms.
- 4) Se calcula la resistividad del suelo mediante la ecuación;

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

donde;

R = resistencia medida, en ohms.

a = separación entre electrodos, en metros.

$\rho$  = resistividad del suelo en ohms-metro.

Esta fórmula es válida solamente cuando la distancia entre electrodos (a) es mayor a la profundidad a que se entierran las varillas (aproximadamente  $a = 10b$ ), en el caso de que  $a = b$ , se debe usar la fórmula general:

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

donde n tiene un valor entre 1 y 2, que depende de la rela-

ción b/a.

$$\text{Si } b = a \quad n = 1.187$$

$$b = 2a \quad n = 1.030$$

$$b = 4a \quad n = 1.002$$

Si b es muy pequeño comparado con a, se utiliza la fórmula:

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

Normalmente se considera que la medición alcanza una profundidad igual a la separación entre electrodos.

#### Dirección recomendadas para la medición.

En el área en que se desea medir la resistividad se trazan dos líneas de prueba, pueden escogerse A y B, C y D, o ambas si se requiere mayor información, dependiendo del tamaño del terreno en el que se instalará el sistema de tierras.

Estas mediciones se hacen iniciando con una separación de tres a cinco metros, comenzando en el centro de la línea y variando cada vez la separación entre electrodos -

de dos a tres metros, deberán continuarse hasta cubrir una longitud de  $1.5L$ , fig. 2.6, los resultados se tabulan según la tabla 2.2.

Con los valores obtenidos en estas mediciones, se trazan las curvas  $\rho - a$ .

En el diseño de los sistemas de tierra, la resistividad es uno de los parámetros más importantes; T. Velazquez, indica en sus notas sobre este tema que en algunos casos es suficiente suponerlo homogéneo, pero que sin embargo, cuando se efectúan mediciones se encuentra generalmente que la no-homogeneidad es el resultado más común, por lo que al aplicar las fórmulas para obtener la resistividad se encuentran valores como los mostrados en la fig. 2.7.

De donde, en función de la separación entre electrodos se tiene una resistividad aparente ( $\rho_0$ )

Desde un punto de vista práctico, cuando se grafican los resultados de las mediciones de campo de la resistividad contra la distancia entre los electrodos, se obtienen los tipos de curvas mostradas en la fig. 2.8.

Aquí se observa, que la variación de la resistividad-

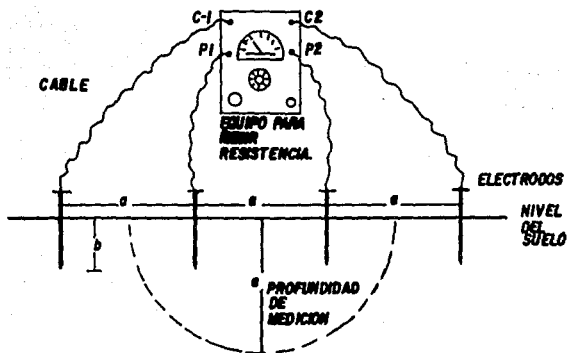


FIG. 2.5  
METODO DE MEDICION.

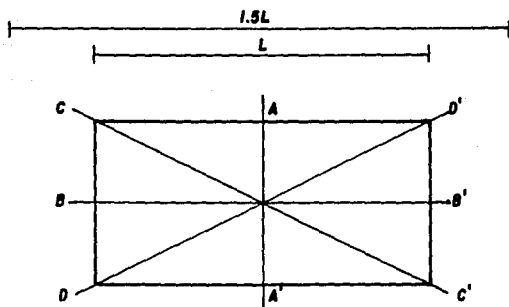


FIG. 2.6  
DIRECCIONES DE LA MEDICION.

es notoria al incrementar la separación entre electrodos, - al aplicar el método de Wenner, las variaciones observadas - se atribuyen fundamentalmente a la variación exponencial de la resistividad en función de la profundidad.

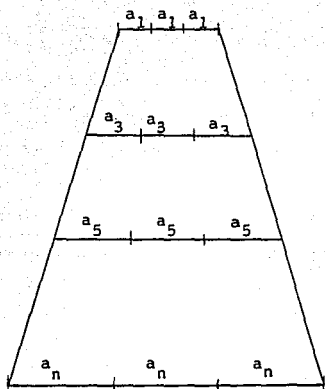
Con los valores de la tabla de resistividad o mediante las curvas obtenidas ( $\rho_a - a$ ), se pueden obtener el modelo homogéneo o el heterogéneo de dos capas, mediante programas de computadora.

Cuando no se dispone de un programa de computadora y se tiene suelo heterogéneo, la Comisión Federal de Electricidad propone en sus especificaciones tomar el promedio de los valores de resistividad obtenidos en las mediciones de campo.

En la figura 2.9 se pueden observar con algún detalle los modelos descritos; homogéneo y heterogéneo.

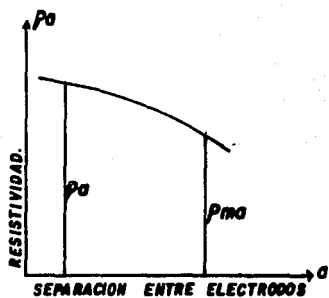
### 2.3 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.

La humedad contenida en la tierra, es un factor muy importante en el valor de la resistividad, pues aún con una pequeña variación en el porcentaje de humedad, se aprecia - una marcada diferencia en la efectividad de una conexión a

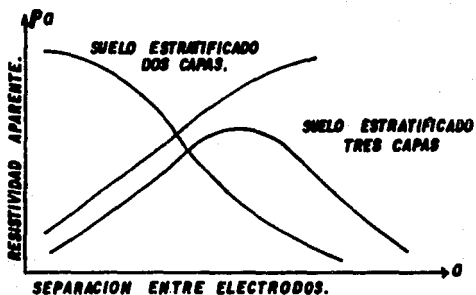


Medición de la resistencia R.

| Separación entre varillas | Línea de prueba |             |
|---------------------------|-----------------|-------------|
|                           | A               | B           |
| $a_1$                     | $\rho_{A1}$     | $\rho_{B1}$ |
| $a_2$                     | $\rho_{A2}$     | $\rho_{B2}$ |
| $a_3$                     | $\rho_{A3}$     | $\rho_{B3}$ |
| .                         | .               | .           |
| .                         | .               | .           |
| .                         | .               | .           |
| $a_n$                     | $\rho_{An}$     | $\rho_{Bn}$ |



**FIG. 2.7**  
**VARIACION EXPONENCIAL DE LA RESISTIVIDAD**



**FIG. 2.8**  
**RESISTIVIDAD APARENTE DEL TERRENO**  
**CON LA SEPARACION ENTRE ELECTRODOS.**

tierra.

En pruebas experimentales realizadas en terreno de arcilla roja con 10% de humedad, se obtuvieron resistividades 30 veces más altas que en el mismo tipo de terreno pero con 20% de humedad.

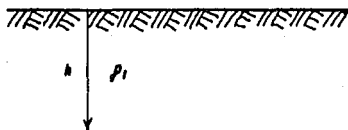
La humedad normal contenida en los terrenos es variable, sin embargo, se puede decir que el promedio es de aproximadamente 10% en época de estiaje y alrededor de un 35% en tiempo de lluvia, con un promedio de 18%.

En la tabla 2.3 se muestra la variación de resistividad con diferente contenido de humedad, para dos tipos de suelo.

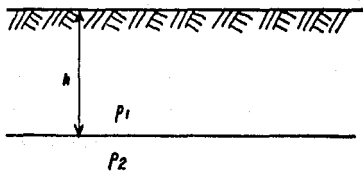
Tabla 2.3

| Contenido de agua<br>% en peso | Resistividad (ohm-cm)   |                         |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                | Suelo superficial       | Arcilla arenosa         |
| 0.0                            | 1 000 x 10 <sup>6</sup> | 1 000 x 10 <sup>6</sup> |
| 2.5                            | 250 000                 | 150 000                 |
| 5.0                            | 165 000                 | 43 000                  |
| 10.0                           | 53 000                  | 18 500                  |
| 15.0                           | 19 000                  | 10 500                  |
| 20.0                           | 12 000                  | 6 300                   |
| 30.0                           | 6 400                   | 4 200                   |





MODELO HOMOGENEO



MODELO HETEROGENEO.

FIG. 2.9

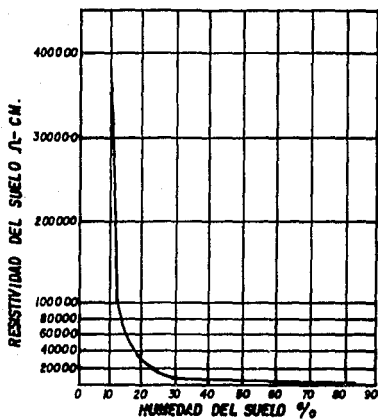
En la gráfica de la figura 2.10 se muestra la variación de la resistividad para una arcilla roja.

Cuando están completamente secos, casi todos los suelos tienen una resistividad del orden de aisladores casi perfectos.

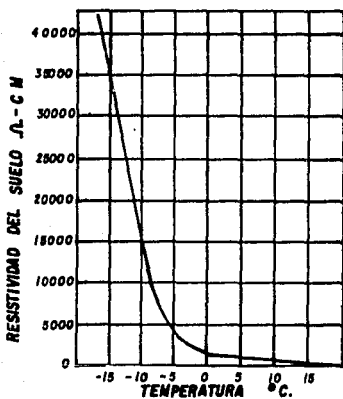
La resistividad disminuye rápidamente hasta que la humedad alcanza el 20%, a partir de este valor sólo se consigue una leve disminución de la resistividad con el aumento de la humedad; inversamente por debajo del 15%, la resistividad aumenta dramáticamente con la disminución de la humedad. Decreciendo la humedad del 30% al 5%, la resistividad aumenta alrededor de 400 veces.

#### Influencia de la temperatura.

La resistividad del suelo es influenciada también por la temperatura. La tabla 2.4 nos muestra la variación en la resistividad de la arcilla arenosa conteniendo el 15.2% en peso de humedad.



**FIG. 2.10**  
**VARIACION DE LA RESISTIVIDAD**  
**CON LA HUMEDAD.**



**FIG. 2.11**  
**VARIACION DE LA RESISTIVIDAD**  
**CON LA TEMPERATURA.**

Tabla 2.4

| Temperatura °C | Resistividad (ohm-cm) |
|----------------|-----------------------|
| 20             | 7 200                 |
| 10             | 9 900                 |
| 0 (agua)       | 13 800                |
| 0 (hielo)      | 30 000                |
| - 5            | 79 000                |
| -15            | 330 000               |

La figura 2.11 muestra la representación gráfica de la variación en la resistividad para una arcilla roja con 13.6% en peso de humedad.

En esta figura puede verse que la resistividad crece lentamente a medida que la temperatura disminuye hasta llegar al punto de congelación del agua. Por debajo del punto de congelación, la resistividad crece rápidamente al disminuir la temperatura. En estos casos, el sistema de tierras debe instalarse por encima del nivel de congelación para obtener un valor aceptable de la resistencia.

Dado que la resistividad varía con la humedad y la temperatura, la resistencia de los sistemas de puesta a tierra

rra varía con las diferentes estaciones del año. Por lo que, para que se tenga una mayor efectividad deberá ser construido con los electrodos clavados con una profundidad razonable.

De lo anterior, podemos concluir que el contenido de humedad es mucho más importante que la temperatura sobre la resistividad, siempre que la temperatura del suelo esté por encima de los 0°C, que es el caso más común en México.

#### Efecto del contenido de sales.

La tabla 2.5 muestra la sustancial reducción en la resistividad por un incremento en el contenido de sales. En arcilla arenosa con 15% en peso de humedad y 17°C de temperatura.

Tabla 2.5

| Sal agregada<br>% en peso de humedad | Resistividad<br>(ohm-cm) |
|--------------------------------------|--------------------------|
| 0                                    | 10 700                   |
| 0.1                                  | 1 800                    |
| 1.0                                  | 460                      |
| 5                                    | 190                      |
| 10                                   | 130                      |
| 20                                   | 100                      |

Un terreno seco tiene alta resistividad, pero un terreno húmedo también puede tenerla si no contiene sales, o sea si el agua es muy blanda. En lugares con régimen de lluvia muy elevado, la resistividad del suelo puede ser alta aún con el suelo saturado de agua. La cantidad de lluvia y la porosidad del suelo hacen que se laven los electrolitos naturales, dejando un suelo muy poco conductor.

#### 2.4. LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE TIERRA.

La resistencia es un sistema de tierras que representa la resistencia entre el electrodo y el suelo circundante. Para conseguir una baja resistencia de dispersión a tierra, el sistema debe ser proyectado con una alta conductancia, debe tener permanencia en el tiempo y confiabilidad. T. Velazquez nos señala que la resistencia total de una nueva red de tierras tiende a estabilizarse en los primeros años debido a los cambios cíclicos anuales, sin embargo, es conveniente hacer mediciones de la resistencia de una nueva red al quedar ésta terminada, con el fin de comprobar su efectividad. Las variaciones en la resistencia de redes grandes, a pesar de estar enterradas a profundidades menores de un metro, no parecen guardar una relación significativa con las variaciones observadas en la resistividad del terreno a esa profundidad. Esta situación indica que la resistencia que ofrecen las re-

des instaladas en grandes áreas de terreno, dependen de la resistividad de las capas más profundas donde se registren variaciones menores.

Por consiguiente, la resistencia será prácticamente la de todo el suelo que rodea al electrodo, debido a que es única; aunque teóricamente esto comprende una distancia infinita, en la práctica la mayor proporción, aproximadamente - el 98% del total, se encuentra contenida dentro de una distancia finita. Por lo que al área que rodea el electrodo se considera su área de influencia.

#### 2.5. COMPONENTES DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA TIERRA.

Si dos electrodos de algunos metros de longitud, son enterrados a cierta distancia de separación y se mantiene - sobre éstos electrodos una diferencia de potencial, aparecerá una corriente que dependerá de la resistencia eléctrica ofrecida por el suelo, ésta resistencia puede ser evidente - por la cantidad de calor liberada por el suelo, así como - por los efectos sobre las conexiones a tierra que afectan a la distribución de éste y los alrededores del cuerpo metálico.

Así pues, la resistencia de un electrodo de puesta a

tierra tiene básicamente los siguientes componentes:

a) Resistencia del propio electrodo, conductores y conexiones.

Con cualquiera de los materiales y secciones comúnmente empleados, la resistencia del electrodo en sí es despreciable, así también como los conductores que enlazan el electrodo con los elementos de la red. Sin embargo, con el transcurso del tiempo, la conexión del electrodo con el conductor puede dejar de tener una resistencia de contacto despreciable si no es resistente a la corrosión. Puede llegar a la pérdida de contacto entre ambos, trayendo consigo una degradación del sistema tierra.

b) Resistencia de contacto entre electrodo y suelo.

Datos experimentales de laboratorio efectuados en la Bureau of Standards de USA, afirman que si el electrodo está libre de pintura o grasa y el terreno esta firmemente compactado, la resistencia de contacto es despreciable; también se encontró que la capa de óxido presente en la superficie del electrodo no aumenta perceptiblemente la resistencia de dispersión a tierra, ya que éste óxido es permeable al agua del terreno y su resistividad no es mayor a la del terreno mismo.



Asimismo los métodos de cálculo que se han desarrollado para los sistemas de tierra, suponen una incidencia despreciable de la resistencia de contacto.

c) Resistencia contribuida por el terreno inmediato al electrodo.

Cuando la corriente fluye hacia afuera del electrodo cada elemento de corriente viaja en un camino que cambia de sección transversal a medida que se aleja del electrodo. La resistencia ofrecida por el suelo, es la resistencia combinada de todos los caminos y elementos de corriente en paralelo, así como la resistividad del suelo y puntos cercanos.

Sobre puesta a tierra de sistemas eléctricos, se afirma que en un electrodo introducido en un terreno de resistividad uniforme, conduce corriente en todas direcciones si se considera que el electrodo esta rodeado por capas de tierra de igual espesor, separadas por superficies equipotenciales, Ver figura 2.12 la capa adyacente al electrodo tiene obviamente la menor área y por tanto ofrece la mayor resistencia. A distancias mayores con respecto al electrodo las capas tienen mayor área y por consiguiente menor resistencia. Finalmente se alcanza una distancia desde el electrodo a partir de la cuál la inclusión de capas adicionales

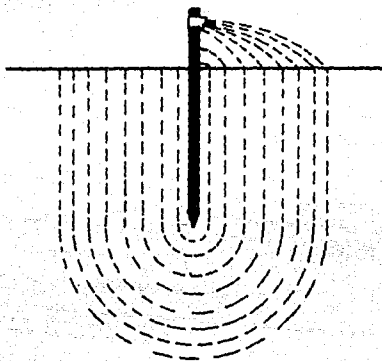


FIG. 2.12

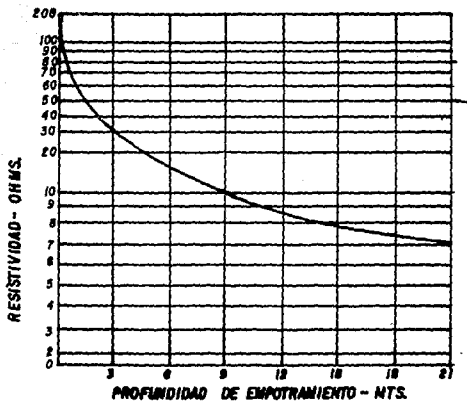


FIG. 2.13

RELACION DE PROFUNDIDAD Y RESISTENCIA  
PARA UN SUELO UNIFORME.

les, no cambia perceptiblemente la resistencia de dispersión a tierra del electrodo. Esta distancia se estima generalmente entre 2.50 y 3.00 metros y es conocida como resistencia efectiva de dispersión a tierra, y depende principalmente de la longitud y profundidad a que es enterrado el electrodo.

## 2.6. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE DISPERSION A TIERRA.

Para calcular la resistencia de dispersión a tierra de electrodos en forma analítica, se puede hacer uso de la fórmula matemática tomada de la teoría electromagnética.

$$R = \frac{\rho}{2\pi C}$$

Donde: R= Resistencia de dispersión a tierra.

$\rho$  = Resistividad del suelo.

C= Capacidad combinada en el vacío, del electrodo y su imagen sobre el nivel del suelo

Este método supone la resistividad uniforme a través de todo el volumen de terreno considerado.

El concepto básico que se desprende de esta fórmula es mostrar la forma que debe disponerse una cantidad dada de metal para obtener los mejores resultados, esto es, un alto valor de capacidad electrostática y por tanto el valor

más bajo de resistencia de dispersión a tierra. Por ejemplo, el alambre no debe enterrarse enrollado en forma helicoidal, sino a lo largo de toda su longitud, porque en esta disposición el valor de la capacidad electrostática es el mayor posible.

Otra fórmula que nos permite conocer la resistividad del terreno midiendo la resistencia de dispersión a tierra de un electrodo cilíndrico de dimensiones conocidas, es utilizando el método de los tres electrodos, desarrollada por el profesor H. B. Dwight:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left( \frac{4L}{a} \right) - 1$$

Donde: R = Resistencia de dispersión a tierra en ohms.

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

L = Longitud de empotramiento en cm.

a = Radio del electrodo en cm.

Ambos métodos son aproximados, por la aproximación geométrica que debe hacerse en el cálculo de las capacidades y que la exactitud disminuye al decrecer el cociente L/a del electrodo. La fórmula para dos electrodos iguales en paralelo es:

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left( 1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2}{s} \frac{L^4}{s^4} \dots \right)$$

Donde: S = Distancia entre electrodos en cm, Siendo-  
 $S < L$  si S = L la resistencia es:

$$R = \frac{\rho}{4rL} \left( \ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$$

No obstante, las dificultades prácticas para conocer las características del terreno, no invalidan los conceptos implícitos en las fórmulas. Son precisamente éstos conceptos, los que orientan la línea de acción para obtener mejores puestas de tierra.

Haciendo mediciones previas a la resistividad del terreno, con las limitaciones ya incluidas, las fórmulas de cálculo constituyen una valiosa herramienta para la aproximación al objetivo de anticipar las dimensiones de un sistema de puesta a tierra. Esto hace que una vez materializado, sea necesario medir su resistencia de dispersión a tierra efectiva y proceder a su mejoramiento en caso de ser necesario.

En la tabla 2,6 se da un resumen de fórmulas utilizadas para el cálculo de la resistencia a tierra.

#### Efectos de las dimensiones del electrodo.

La resistencia de dispersión a tierra de un electrodo

se reduce a medida que se incrementa su profundidad de empotramiento, ésto puede comprobarse fácilmente por medio de la fórmula general. Generalmente hablando, se consigue una disminución del 40% en la resistencia cuando el empotramiento se duplica. En la figura 2.13 se muestra gráficamente la variación de la resistencia con la profundidad de empotramiento, asumiendo resistividad constante en todo el volumen considerado.

En cambio el aumento del diámetro prácticamente influye muy poco en la resistencia.

Una buena regla es seleccionar un diámetro de electrodo mínimo compatible con la necesaria resistencia mecánica para ser enterrado en el suelo sin doblarse. De aquí que generalmente resulte más económico utilizar electrodos redondos de pequeño diámetro (13 o 16 mm).

#### Efectos de la resistividad del suelo.

Las fórmulas de Dwight de la tabla 2.6 muestran que la resistencia de dispersión a tierra es directamente proporcional a la resistividad del terreno, que es factor fundamental que determina cuál será la resistencia de un electrodo y a que profundidad deberá enterrarse para obtener una resistencia determinada. Por supuesto, en la práctica -

las características de un terreno y por tanto su resistividad, pueden variar muy fuertemente con la profundidad.

Si se desea, pueden hacerse mediciones a medida que el electrodo va penetrando en el terreno y se pueden conocer las resistividades de los diferentes estratos que el electrodo va atravesando.

## 2.7 MEDICION DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE TIERRAS.

Con el objeto de establecer el valor real de la resistencia a tierra del sistema de tierras una vez instalado, se deben hacer mediciones en campo para poder determinar la elevación de tensión durante una falla a tierra. Estas mediciones servirán además para verificar los cálculos hechos durante el diseño y asegurar la efectividad de la malla para limitar los gradientes de potencial a valores tolerables.

Es necesario medir periódicamente la resistencia del sistema de tierra con el fin de corroborar su eficiencia.

La resistencia del sistema de tierra será prácticamente la de todo el suelo que rodea al electrodo, por lo que -

el área que rodea al electrodo se le considera su área de influencia. Si en el método de medición se utiliza un electrodo auxiliar, es fundamental buscar que el área de influencia de éste no se traslape con el área del electrodo principal o del electrodo a medir.

#### Método de caída de tensión.

Es el método de uso común, utilizado para la medición de la resistencia a tierra de los electrodos.

Las casas constructoras de equipos de medición, fabrican varios tipos de aparatos para medir el valor de la resistencia de los electrodos y con ellos acompañan las instrucciones necesarias para realizar las mediciones en las condiciones requeridas. Se utilizan, como es natural, electrodos auxiliares para la obtención de los valores de las resistencias buscadas. Generalmente van provistos de un magneto, porque es preciso efectuar la medición a un voltaje de valor apreciable. La figura 2.14 muestra uno de estos aparatos, utilizado para medir fuertes resistencias.

Consta de un pequeño generador de corriente alterna accionado por manivela (1), de un transformador de corriente (4) y de una resistencia de compensación graduable (3).



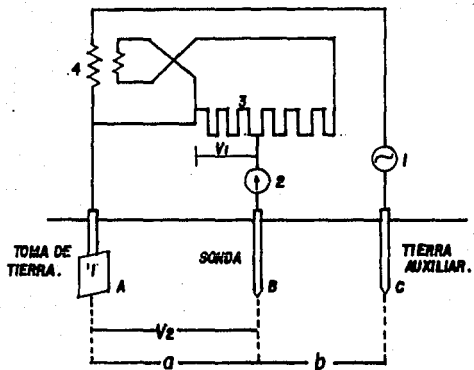


FIG. 2.14  
**ESQUEMA DE LA DISPOSICION  
 PARA COMPROBAR LAS TOMAS DE TIERRA.**

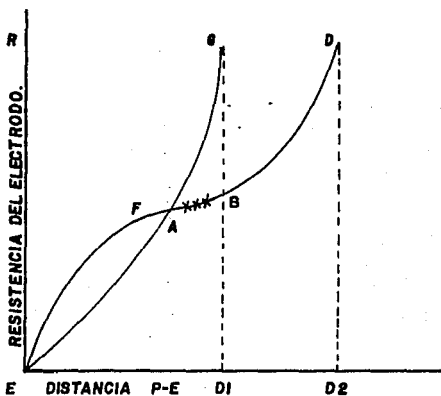


FIG. 2.15  
**CURVAS DE RESISTENCIA DE ELECTRODOS DE TIERRA.**

Para las mediciones hay que disponer de una tierra auxiliar (C) y de una sonda (B). (A) es la toma de tierra cuyo valor en ohms se trata de determinar. El generador lleva un instrumento de cero (2) para efectuar las lecturas.

La corriente que del generador pasa por el primario - del transformador y se dirige por el terreno desde (A) a (C), crea una tensión  $V_2$  entre (A) y (B). En la misma forma, la corriente que circula por el secundario del transformador, a través de la resistencia de compensación (3), da origen a una tensión  $V_1$ , cuando ambas tensiones son iguales por la conveniente graduación de la resistencia, es decir  $V_1 = V_2$ , el valor de dicha resistencia será el correspondiente a la toma de tierra (A) y el instrumento marcará cero.

El aparato va provisto de tres sensibilidades para la resistencia: 0 - 10, 0 - 100, y 0 - 1 000 ohm.

Las distancias a que debe colocarse la sonda (B) y la toma de tierra auxiliar (C), que en la figura aparecen como a y b, dependen de la clase y tamaño del electrodo y están comprendidas de la siguiente forma: a entre 5, 10 y 20 metros, b entre 20 y 40 metros; estas longitudes son valores mínimos.

Debido a la gran sensibilidad del instrumento, la medición se obtiene prácticamente con un pequeño error, aún cuando las resistencias de la tierra auxiliar y la de sonda sean elevadas.

#### Curvas de resistencia a tierra del sistema.

Durante las mediciones de resistencia a tierra de un electrodo por el método de caída de tensión, es fundamental evitar el traslape de las áreas de influencia de los tres electrodos que intervienen, lo que se logra graficando las mediciones como en la figura 2.15.

Si por ejemplo, el electrodo de corriente se localiza a la distancia ( $D_1$ ) del electrodo de prueba, al realizar mediciones variando la distancia del electrodo sonda (B) a partir del electrodo por medir (A) hasta llegar a la posición del electrodo de corriente (C) se obtendrá la curva EFG. Donde se observa que el valor de la resistencia se incrementa continuamente a medida que se desplaza el electrodo sonda a lo largo de la línea que une al electrodo bajo prueba con el electrodo de corriente. Esto se debe al traslape de las áreas de influencia.

Ahora bien, si el electrodo de corriente se coloca a-

una distancia mayor ( $D_2$ ), en tal forma que no exista una zona donde se traslapen las áreas de influencia de cada uno de los electrodos, se obtendrá una curva del tipo EFABD, curva en la que encontramos (entre A y B) valores que presentan estabilidad no habiendo en estos puntos superposición de áreas de influencia. Por lo que este valor corresponde a la resistencia real del electrodo.

Como recomendación práctica, para evitar el traslapo de áreas de influencia se sugiere colocar el electrodo de corriente a una distancia cuatro veces D, del electrodo bajo prueba, donde D es el diámetro equivalente del área del electrodo de tierra. Si con esta distancia no se obtienen tres valores aproximadamente iguales de resistencia (porción A-B de la figura 2.15), se deberá incrementar la distancia a seis veces D.

#### Método de los dos puntos.

Este método evalúa la resistencia de una forma de tierra de resistencia desconocida, haciendo uso de una "tierra auxiliar" de valor conocido, y del cuál se presume un valor despreciable con respecto al valor de la que se está evaluando, y el valor obtenido será llamado resistencia de tierra relativa. Ver figura 2.16

El método está basado en el uso de NaCl (sal de mesa) por su alta conductividad como una solución acuosa en proporción 1:4 aplicada en un área apropiada.

Para construir la resistencia conocida, se coloca una malla metálica de aluminio o cobre sobre un charco de la solución acuosa con sal, la malla a su vez se conecta al medidor como se muestra en la figura 2.17.

El valor de la resistencia conocida será menor cuando más cerca esté de los materiales conductores (varillas, tubos de agua, etc.) mientras que el valor de la malla en el charco será menor de 25 ohms, por tanto, si el valor obtenido mediante este método es mayor de 25 ohms, será necesario utilizar el método de caída de tensión para verificarlo. - Mientras que si es menor a este valor, la resistencia conocida será mucho menor que la resistencia evaluada de la toma de tierra bajo prueba y en consecuencia el valor obtenido en el medidor será muy próximo al valor real que tiene - la toma de tierra.

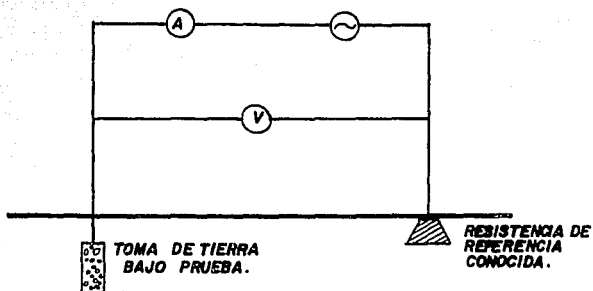


FIG. 2.16

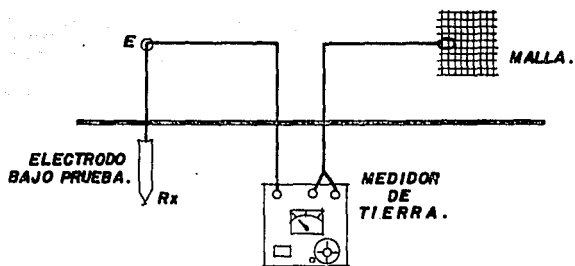



FIG. 2.17








2.8 FORMULAS UTILIZADAS PARA CALCULAR LA RESISTENCIA A TIERRA DE ELECTRODOS CON DIFERENTES FORMAS GEOMETRICAS.

Las dimensiones deberán estar en centímetros para obtener la resistencia en ohms.

Tabla 2.6

FORMULAS APROXIMADAS PARA TOMAS DE TIERRA

|  |   |
|--|---|
|  | Hemiesfera, a la superficie del terreno de radio a.<br>$R = \frac{\rho}{2\pi a}$  |
| ●  | Una varilla de longitud L y radio a.<br>$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \log_e \frac{4L}{a} - 1 \right)$  |
| ●  | Dos varillas cilíndricas a una distancia S entre ejes siendo $S > 2L$ .<br>$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \log_e \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left( 1 - \frac{L^2}{3S^2} + \frac{2}{5} - \frac{L^4}{S^4} \dots \right)$ |
| ●  | Dos varillas cilíndricas a una distancia s entre ejes, siendo $S < 2L$ .<br>$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \log_e \frac{4L}{a} + \log_e \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$            |
| —  | Conductor horizontal enterrado a una profundidad S/2, siendo su longitud 2L.<br>$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \log_e \frac{4L}{a} + \log_e \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$                       |
| L  | Conductor en ángulo recto, de longitud de brazos L a la profundidad S/2.<br>$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{S} - 0.237 + 0.215 \frac{S}{L} + 0.104 \frac{S^2}{L^2} - 0.042 \frac{S^4}{L^4} \right)$  |

|  |   |
|--|---|
|   | <p>Estrella de 3 puntas de longitud de brazos L a la profundidad S/2</p> $R = \frac{\rho}{6\pi L} \left( \log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{S} + 1.071 - 0.209 \frac{S}{L} + 0.238 \frac{S^2}{L^2} - 0.054 \frac{S^4}{L^4} \right)$   |
|    | <p>Estrella de 6 puntas de longitud de brazos L a la profundidad S/2.</p> $R = \frac{\rho}{12\pi L} \left( \log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{S} + 10.98 - 5.51 \frac{S}{L} + 3.26 \frac{S^2}{L^2} - 1.17 \frac{S^4}{L^4} \dots \right)$                                    |
|   | <p>Anillo de diámetro D, diámetro del conductor d a una profundidad h</p> $R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left( \ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{2h} \right)$   |
|    | <p>Barra horizontal de longitud 2L de sección axb enterrada a una profundidad S/2 y b a/8.</p> $R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \log_e \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - ab}{2(a+b)^2} + \log_e \frac{4L}{S} - 1 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$ |
|    | <p>Placa redonda enterrada horizontalmente, de radio a enterrada a una profundidad S/2</p> $R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi S} \left( 1 - \frac{7a^2}{12S^2} + \frac{33a^4}{40S^4} \dots \right)$  |
|  | <p>Placa redonda enterrada verticalmente, de radio a enterrada a una profundidad S/2.</p> $R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi S} \left( 1 + \frac{7a^2}{24S^2} + \frac{99a^4}{320S^4} \dots \right)$  |
|  | <p>Estrella de 4 puntas, de longitud de brazos L a la profundidad S/2.</p> $R = \frac{\rho}{8\pi L} \left( \log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{S} + 2.912 - 1.071 \frac{S}{L} + 0.645 \frac{S}{L} + 0.645 \frac{S^2}{L^2} - 0.145 \frac{S^4}{L^4} \right)$                   |



**CAPITULO III**  
**ELECTRODOS DE USO COMUN EN LOS SISTEMAS DE**  
**TIERRA**

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

### III. ELECTRODOS DE USO COMUN EN LOS SISTEMAS DE TIERRA.

Como ya se mencionó, con el término de electrodo entendemos, un cuerpo metálico puesto en íntimo contacto con el terreno y destinado a dispersar en el mismo las corrientes eléctricas. Puede estar constituido de un solo elemento, o por diversos elementos conectados entre sí mediante conductores enterrados y no aislados del terreno.

La metodología para electrodos de conexión a tierra, se ha desarrollado básicamente en el modo de respuesta de un conductor metálico semiesférico cuyo parámetro principal:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r}$$

Ha sido definido dependiendo directamente de la resistividad ( $\rho$ ) del suelo y de la dimensión ( $r$ ) de la superficie de dicho conductor.

Actualmente existen muy variadas formas de electrodos - utilizados en la puesta a tierra de sistemas eléctricos, siendo los más comunes los tubos para agua y las varillas de tipo copperweld por su facilidad en la instalación y por ser más económicas.

Para la obtención con facilidad de la ecuación matemática que define la resistencia en la disipación de corriente, se ha optado por hacer electrodos con figuras simétricas, pues en arreglos raros es difícil encontrar ésta ecuación matemática.

### 3.1. TUBERIAS UTILIZADAS PARA LA CONDUCCION DE AGUA.

Las normas Técnicas para instalaciones Eléctricas señalan: Una tubería metálica subterránea utilizada para la conducción de agua fría, puede usarse como electrodo de puesta a tierra, pero siempre y cuando esté en contacto directo con la tierra en por lo menos tres metros de longitud, Fig. 3.1.

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

Se recomienda que un electrodo de tubería metálica de agua sea complementado por un electrodo adicional (de varilla placa, etc.) para formar un sistema más seguro cuando la importancia de la instalación lo justifique. En tramos muy largos, las juntas y uniones pueden incrementar la resistencia -

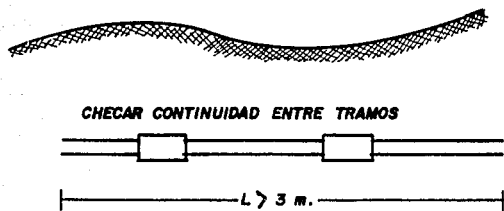


FIG. 3.1  
TUBERIA METALICA SUBTERRANEA DE AGUA.

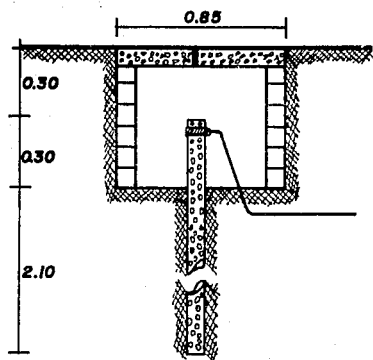


FIG. 3.2

en cientos de ohms, por lo que la resistencia dependerá del lugar en que esté la conexión de la toma de agua y de la sección transversal de la tubería, por ésto su uso es esencialmente apropiado para circuitos con voltaje no mayor de 1 000-volts.

También se pueden utilizar como electodos de puesta a tierra la tubería metálica de revestimiento de un pozo profundo, cañería metálica de drenaje, con excepción de tuberías o tanques que contengan algún material combustible.

Las conexiones de la puesta a tierra, se deben hacer en por lo menos dos puntos de la tubería (a lo largo de la tubería); y siempre que sea posible, las conexiones de cobre a acero deberán estar hechas en la superficie.

### 3.2. TUBERIAS DE ACERO.

Deben tener por lo menos 19 mm. de diámetro exterior y una longitud mínima de 2.40 metros, de acuerdo a las NTIE, y deben estar galvanizados.

En la figura 3.2 se muestra un tubo de acero galvanizado perforado, con su registro para facilitar el mantenimiento. Las perforaciones en el tubo tienen por objeto, el poder in -

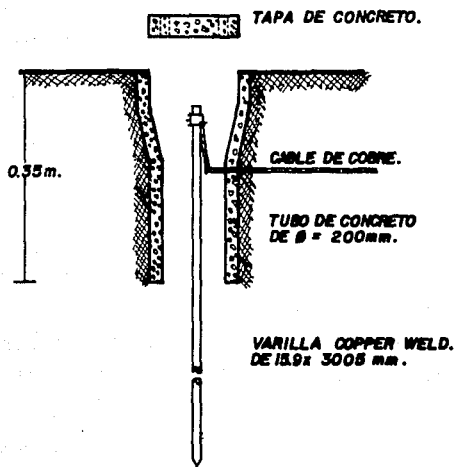
yectar agua o alguna otra solución química al subsuelo y con ello aumentar la humedad y por lo tanto la conductividad del terreno.

### 3.3. VARILLAS.

Es el sistema de uso más común, debido principalmente a su bajo costo, así como a su fácil instalación. Estos electrodos pueden ser de cobre, acero, copperweld o aluminoweld. Las N.T.I.E. establecen que las varillas de acero y las de hierro deben tener por lo menos 1.6 cm. de diámetro y las de material no ferroso, un diámetro no menor de 1.27 cm. y una longitud mínima de 2.40 metros.

De éstos electrodos el más utilizado es el de copperweld, que consiste en una barra de acero con baño de cobre soldado con diámetro de 15.9 mm. y longitud de 2.44 y 3.05 metros.

Es indispensable el empleo de registros en los electrodos para poder efectuar controles y mediciones. Una forma práctica de construcción del registro para electrodos en forma de varilla o de tubo, es la utilización de un tubo de concreto de 200 mm. de diámetro tal como se muestra en la figura 3.3.



**FIG. 3.3**  
**REGISTRO PARA TOMA DE TIERRA.**

Cuando no se consigue la resistencia deseada con una sola varilla, se pueden clavar más hasta conseguirlo. La distancia entre varillas ha de ser por lo menos igual a la profundidad a la que están clavadas.

### 3.4. ELECTRODOS TIPO V INVERTIDA.

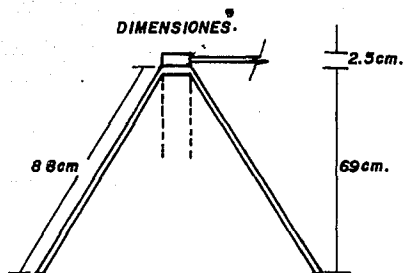
Este tipo de electrodo es utilizado por la empresa Proyección Electrónica S.A. en la puesta a tierra de sistemas eléctricos, principalmente para la conexión a tierra de apartarrayos.

En la figura 3.4 se muestra éste tipo de electrodo, que está formado por una placa de 0.635 x 7.62 x 182 cm, cuyo material puede ser aluminio, cobre, acero galvanizado en caliente, acero inoxidable u otro, dependiendo del PH del terreno.

Esta empresa asegura que con éste tipo de electrodo, dada su forma de V invertida, se logran disminuir los efectos de la tensión de paso, ya que se logra la anulación del campo electromagnético producido al circular la corriente eléctrica. Se afirma que ésta anulación del campo se hace en la parte central del electrodo y se basa en la ley de Coulomb.

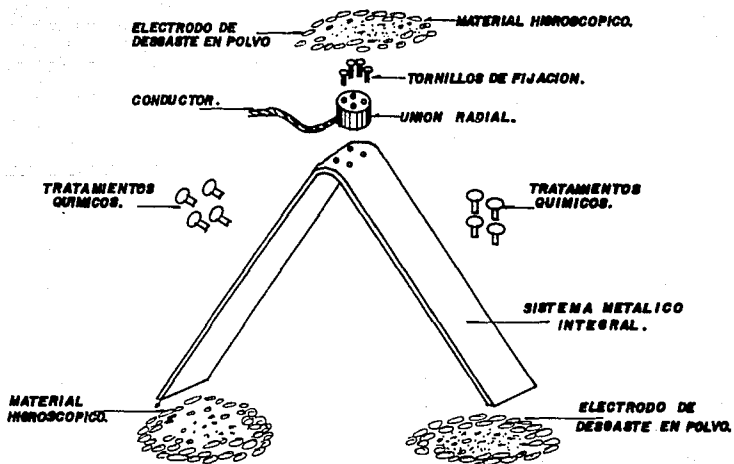
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r^2}$$





**FIG. 3.4**

**MONTAJE.**



**FIG. 3.5**

**ELECTRODO V INVERTIDA.**

donde:

$r$  = Distancia entre cargas.

$q$  = Carga en la placa.

$q_0$  = Carga en el punto central.

$e_0$  = Permeabilidad del terreno donde se instala.

Los valores de  $E$  para las distancias  $r_1, r_2, \dots, r_n$  corresponden a  $E_1, E_2, \dots, E_n$  en las que el valor resultante es la suma vectorial de todas las cargas.

Se toma como la suma de cargas de un dipolo con cargas del mismo signo, pero en éste caso los conductores son placas que forman campos circulares, logrando con ello que la magnitud de los vectores que se anulan en el centro sean mayores.

Su instalación se recomienda, se afectúe donde el flujo de personal sea menor, la humedad sea máxima y alejado de drenajes, ductos eléctricos o cualquier elemento conductor que desvíe la disipación eléctrica. Para la obtención de valores de resistencia a tierra menores se pueden agregar tratamientos químicos y materiales higroscópicos o hacer uso de la protección catódica para alargar la vida del electrodo, Ver figura 3.5.

### 3.5. ELECTRODOS EP-ET.

Este tipo de electrodo es utilizado por la empresa Electrostática Parres, S.A. y está construido de cobre electrolítico aleación 110, 600 cm. de conductor de cobre electrolítico aleación 110, 66.370 circular mils y 1.6 x 40.79 mm de sección transversal, tiene un recubrimiento plateado. Su contenido químico básicamente se conforma por magnesio, coke y sulfato de cobre. Sus dimensiones son 19 cm de diámetro por 119 cm de longitud con un peso de 21 Kgs. Fig. 3.6.

El conductor de cobre está dispuesto en forma toroidal para disipar la corriente en el subsuelo. Disminuye la resistencia de tierra al paso de la corriente eléctrica, por medio de su contenido químico catódico (anticorrosivo), que diluye un electrolito aumentando así la profundidad y volumen de disipación, disminuyendo el tiempo de arqueo de la descarga.

Se asegura que con este electrodo se pueden obtener resistencias a tierras de 8 ohms en resistividades de hasta 20 000 ohms-cm .

### 3.6. HORMIGON ARMADO.

El hormigón armado puede utilizarse como electrodo de -

tierra metálico (la armadura) inmerso en un medio razonablemente homogéneo (el hormigón) y cuya resistividad es del orden de los 3 000 ohms-cm. A su vez, el hormigón está inmerso en el terreno cuya resistividad puede variar desde 100 hasta 1 000 000 ohms-cm.

La relación de resistividades del hormigón y el terreno, determina entonces la resistencia de dispersión a tierra resultante. Si el terreno tiene resistividad superior a la del hormigón (caso frecuente), hay ventaja en conectar la puesta a tierra a la armadura metálica de la base del hormigón.

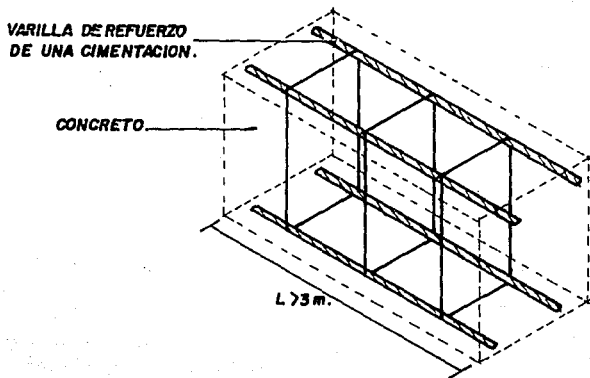
La masa de hormigón tiende a absorber la humedad del suelo y mantener elevado su propio contenido de humedad, lo que se traduce en una relativamente baja y estable resistividad.

Por el contrario, si la resistividad del terreno es muy baja, la resistencia a tierra de la base es más elevada que la de un electrodo implantado directamente en el terreno.

Las bases de fundación de las torres metálicas de transmisión constituyen un caso de éste tipo de electrodo, como así también las bases de fundación de los postes de hormigón-armado.



**FIG. 3.6**  
**ELECTRODO EP-ET**



**FIG. 3.7**  
**HORMIGON ARMADO.**

P. Wiener, demostró que las barras metálicas incluidas - en hormigón, tienen una alta capacidad de dispersión de co - rriente a tierra y que la corrosión es menor que para electro - dos implantados directamente en el terreno.

En terrenos difíciles, éste tipo de electrodos puede - brindar una óptima solución técnica, dando resistencias de - dispersión a tierra baja con la ventaja adicional de que el costo es prácticamente nulo, ya que se hace uso de la obra ci - vil del edificio. Todo lo que se necesita es hacer accesible - al exterior la armadura de las bases. Para ello, deben soldar - se las barras de armadura con pernos que salgan de la base so - bre el nivel del piso. Estos pernos pueden ser los mismos que se utilizan para fijar la estructura del edificio si ésta es - metálica.

De ésta forma, todas las bases quedan automáticamente - conectadas entre sí, obteniéndose resistencias de dispersión - a tierras muy bajas.

Si la estructura no es metálica, deben unirse delibera - damente todas las bases con una red de conductores de tierra, para conseguir el mismo propósito.

Las NTIE indica que las columnas de concreto armado tam

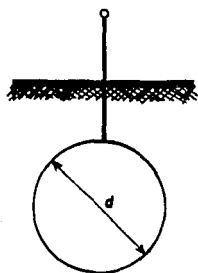
bién se conectan a tierra; en éste caso, la conexión del cable de tierra se hace directamente al armado de la columna, mediante conexión soldable cable-varilla, para ésto, las varillas deben ser de por lo menos 13 mm. de diámetro y longitud no menor de 6 metros en el fondo.

### 3.7. ELECTRODOS EN FORMA DE PLACA.

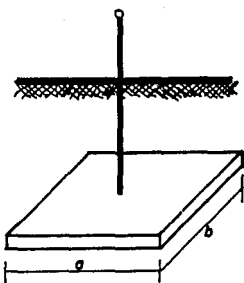
De acuerdo a la NTIE, un electrodo en forma de placa debe tener por lo menos 2 000 cm<sup>2</sup> de superficie. Los electrodos de placa de fierro o acero deben tener un espesor no menor de 6 mm. y los de metal no ferroso no menor de 2 mm.

El uso de éste tipo de electrodos va en decremento, debido a que para enterrarlas se requiere de un mayor espacio - así como mayor esfuerzo que con las varillas, sin embargo, por su forma de instalación nos permite conocer en forma directa el tipo de suelo donde quedará instalada, ya que al tener que efectuar la excavación, nos permite conocer el tipo de terreno donde se instala. La conexión del conductor de tierra a la placa se puede efectuar con ayuda de remaches o tornillos, pudiendo ser ésta unión al centro o en la periferia.

En algunos casos es más ventajoso enterrar las placas vertical que horizontalmente, ya que la zanja por excavar se-

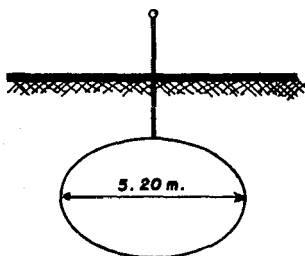


**CIRCULAR.**



**CUADRADA.**

**TOMAS DE TIERRA EN FORMA DE PLACA .**



**TOMA DE TIERRA EN FORMA DE BUCLE.**

**FIG. 3.8**



rá menor.

Por otro lado, cuando la placa se coloca verticalmente, hay mayor posibilidad de mejorar el contacto entre el metal y la tierra, aumentando de ésta forma la efectividad de la conexión a tierra.

El tamaño ordinario de las placas varía entre 3.0 y 6.0 metros cuadrados y su instalación se recomienda a una profundidad de entre los 1.60 a 2.44 metros, ya que a una profundidad mayor no se presentan marcados cambios en la reducción de la resistencia. Ver figura 3.8.

Para una placa circular de diámetro  $d_1$ , la resistencia de puesta a tierra se expresa como:

$$R = \frac{\rho}{4d} \quad \text{ohms.}$$

Si la placa es rectangular o en forma cuadrada, la resistencia será:

$$R = \frac{\rho}{\sqrt{ab} \cdot 4.5} \quad \text{ohms.}$$

donde:  $a, b$  = Longitud de los lados de la placa.

$\rho$  = Resistividad del terreno.

d = Diámetro

### 3.8. ELECTRODOS EN FORMA DE ANILLO.

Para la obtención de bajas resistencias de tierra, se puede utilizar también el electrodo en forma de anillo, que consiste en colocar un conductor desnudo en el fondo de una excavación, bordeando exteriormente los cimientos del edificio, o bien cuando ello no sea posible, a una profundidad de 0.50 metros respecto de la superficie original del terreno. De éste modo se forma un anillo de perímetro igual o superior al de la edificación, puesto en el más íntimo contacto posible con el terreno. Como conductor se puede emplear alambre o cable de acero galvanizado en baño caliente, cobre o acero-cobreado.

Al rellenar la excavación, héchese sobre el anillo, apisonándolo a fondo, una primera capa de tierra de baja resistencia, tal como humus, limo, etc. No se recomienda la colocación de grava y guijarros.

La colocación del sistema de tierra debe extenderse a todas las dependencias del edificio que se alimenten con energía eléctrica, utilizando conductores empalmados al anillo y que se extiendan al interior del edificio, colocando tomas de

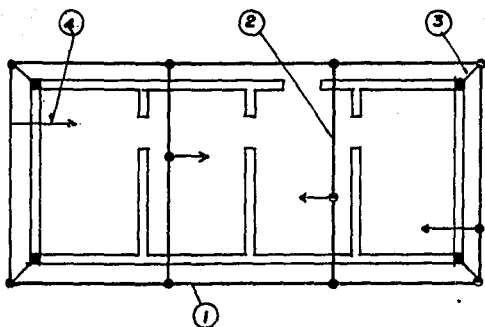
tierra donde sea requerido.

Para cada edificio se proveerá de un electrodo en anillo. Cuando en el mismo lugar de la excavación se levanten diversos edificios, es conveniente conectar entre sí los diferentes anillos, empleando los mismos materiales que se hayan utilizado en su construcción. Sin embargo, también se puede colocar un único electrodo en anillo siguiendo el perímetro exterior de la excavación. Observar figura 3.9.

- donde:
- (1) Electrodo en anillo, colocado en el fondo de la zanja de la cimentación, o bien a una profundidad mínima de 0.5 metros por debajo de la superficie del terreno.
  - (2) Empalme entre el electrodo en anillo y eventuales conexiones a tierra.
  - (3) Empalmes para conexión al electrodo en anillo de las armazones metálicas de los cimientos y andamios.
  - (4) Empalme para la conexión a tierra de los usuarios.

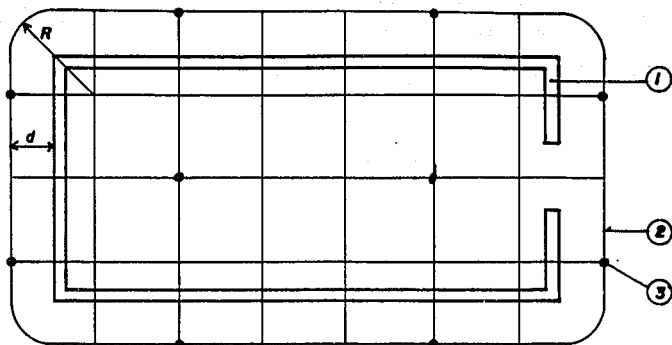
### 3.9. ELECTRODOS EN FORMA DE MALLA.

Este tipo de electrodo, como su nombre lo indica, con -



- ① ELECTRODO EN ANILLO COLOCADO EN EL FONDO DE LA ZANJA DE LA CIMENTACION O BIEN A UNA PROFUNDIDAD MINIMA DE 0.5 MTS. POR DEBAJO DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO.
- ② EMPALME ENTRE EL ELECTRODO EN ANILLO Y EVENTUALES CONEXIONES A TIERRA.
- ③ EMPALMES PARA LA CONEXION AL ELECTRODO EN ANILLO DE LAS ARMAZONES METALICAS DE LOS CIMIENTOS Y ANDAMIOS.
- ④ EMPALME PARA LA CONEXION A TIERRA DE EQUIPOS Y DEMAS USUARIOS.

**FIG. 3.9**  
**DISPOSICION TIPICA DEL ELECTRODO EN ANILLO.**



- 1 CONSTRUCCION (POR EJEMPLO CABINA)
- 2 ELECTRODO EN FORMA DE MALLA.
- 3 VARILLA.
- R RADIO; LO MAS AMPLIO POSIBLE PARA REDUCIR LAS TENSIONES DE PASO.
- d DISTANCIA  $\geq$  1 METRO

FIG. 3.10  
ELECTRODO EN MALLA.

siste en formar una malla por medio de conductores enterrados a una profundidad de 0.3 a 0.6 metros, de acuerdo al tipo de terreno donde se instale. Son utilizados preferentemente para la conexión a tierra de cabinas y estaciones eléctricas, a fin de tener la tensión de contacto dentro de los límites admitidos. La malla debe complementarse en los nudos y a lo largo de su perímetro con varillas clavadas. A fin de reducir las tensiones de paso, la malla debe extenderse por lo menos un metro más allá del perímetro de la edificación, tal como se muestra en la figura 3.10.

Enriquez Harper Gilberto, señala que a la malla se le puede considerar como placa si la separación entre conductores es la adecuada.

Por medio de la fórmula de Laurent se puede conocer la resistencia de la malla:

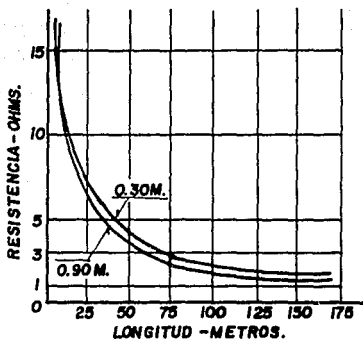
$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

donde:  $r = \frac{A}{L}$  = Radio equivalente en metros.

$L$  = Longitud total del conductor en metros. (incluyendo varillas).

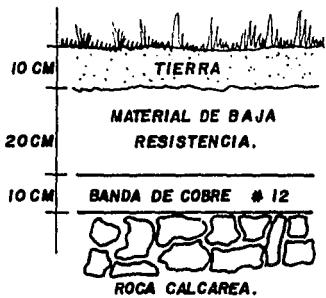
$A$  = Área total de la malla en  $m^2$ .

$\rho$  = Resistividad.

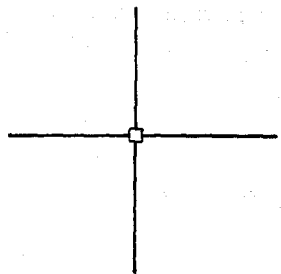


$P = 10000 \text{ OHMS-CM.}$   
 $\phi \text{ CONDUCTOR} = 3/8''$

**FIG. 3.11**  
**RESISTENCIA DE UN CONDUCTOR**  
**EN FUNCION DE SU LONGITUD.**



**FIG. 3.12**  
**INSTALACION CON BANDA**  
**DE COBRE.**



**FIG. 3.13**  
**CONDUCTORES EN CRUZ**

### 3.10. ELECTRODOS PARA ZONA ROCOSA.

Cuando al construir un sistema de tierras nos encontramos con mantos de roca en la superficie del terreno y la aplicación de varillas o la excavación de zanjas para la instalación de placas resulta muy complicado, así como en lugares muy secos particularmente durante periodos de sequía, es necesario diseñar un sistema de tierras que permita captar la mayor cantidad de humedad posible en el subsuelo a través de la acción de capilaridad. Un método efectivo es el de instalar conductores o estrechas bandas de metal en largas zanjas, cavando a una profundidad como la capa lo permita. Para la instalación de éste tipo de electrodos se requiere de un gran espacio de terreno y de una larga excavación.

El concepto es el de emplear sistemas de puesta a tierra de grandes dimensiones físicas para compensar la elevada resistividad del suelo.

En las figuras 3.11 a 3.13 se pueden observar el comportamiento de éste tipo de electrodos.



## C A P I T U L O   I V .

### PROCEDIMIENTOS UTILES PARA REDUCIR LA RESISTENCIA

### DE LOS SISTEMAS DE TIERRA.

#### IV. PROCEDIMIENTOS UTILES PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE LOS SISTEMAS DE TIERRA.

En capítulos anteriores, vemos que dependiendo de la naturaleza del terreno, se tienen diferentes valores estadísticos de resistividad. En ocasiones, estos valores son muy superiores a los marcados en tablas, y dependiendo del tipo de electrodos utilizados y del lugar donde se implementen, se tienen diferentes valores de resistencia, por lo que el método aplicado para reducir la resistencia en un caso particular, no es aplicable a cualquier otro. Por lo tanto, para cada sistema se debe medir, estudiar y darle una solución particular.

Las Normas Técnicas para Instalaciones eléctricas, indican que en mallas de tierra para subestaciones eléctricas, la resistencia total no debe exceder, los 10 ohms, pero después, es preferible alcanzar la mínima posible.

En algunos terrenos la resistividad es tan elevada que resulta prácticamente imposible obtener una puesta a tierra de valor razonablemente bajo, salvo que se empleen sistemas de enormes dimensiones con un costo muy elevado. En tales casos se puede recurrir al uso de métodos que ayudan a reducir la resistividad del sistema de tierras.

#### 4.1. ELECTRODOS PROFUNDOS.

Este método consiste en realizar perforaciones profundas hasta encontrar terrenos de baja resistividad, instalando para ello los electrodos correspondientes.

En experiencias realizadas en los Estados Unidos, se observó que en la mayoría de los casos, cuando el terreno es penetrable, a medida que aumenta la profundidad disminuye la resistividad, debido a que aumenta el contenido de humedad, lo que indica que los suelos mejores conductores se encuentran a niveles más profundos.

Un aspecto importante en la implantación de electrodos profundos, es que la resistividad obtenida es estable y prácticamente independiente de las variaciones de estación del año.

Como datos ilustrativos, tenemos que en los Estados Unidos suele llegarse a 60 metros más de profundidad con el uso de electrodos profundos, y por otro lado, tenemos que en la zona volcánica del sur de la ciudad de México se han realizado estudios para la puesta a tierra de alimentadores aéreos de 23 kv, logrando un buen aterrizaje de los mismos. Se utilizó para ello electrodos especiales, realizando perforaciones-



FIG. 4.1

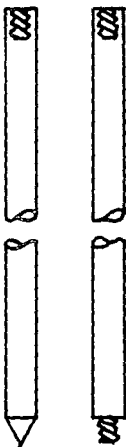


FIG. 4.2

profundas de hasta 100 metros para encontrar terrenos con baja resistividad.

Una técnica para la implantación profunda de electrodos se basa en el uso de barras seccionadas, cuya longitud varía entre 1.50 y 3.0 metros, que llevan ambos extremos roscados - y se empalman mediante manguitos con rosca hembra. El extremo inferior de las barras es tronco-cónico para facilitar la penetración, y el extremo superior es biselado para evitar la deformación por los golpes. Ver figura 4.1.

Otra versión de barras seccionales puede verse en la figura 4.2. En éste caso existen dos tipos diferentes de secciones, pero tiene la ventaja con respecto al anterior, de que ofrece menos resistencia a la implantación al carecer de manguitos, y permite un íntimo contacto con el suelo del área lateral del electrodo.

El método más simple para enterrar las barras, es mediante un marro, pero existe una herramienta manual que consiste en un pinzón de aproximadamente 12 kg. con dos trozos de caño en ambos lados de diferente longitud, dentro de los cuales se inserta la barra. El pinzón va por tanto guiando al golpear la barra y el trabajo se realiza con total facilidad y seguridad.

#### 4.2. CONTRA-ANTENAS.

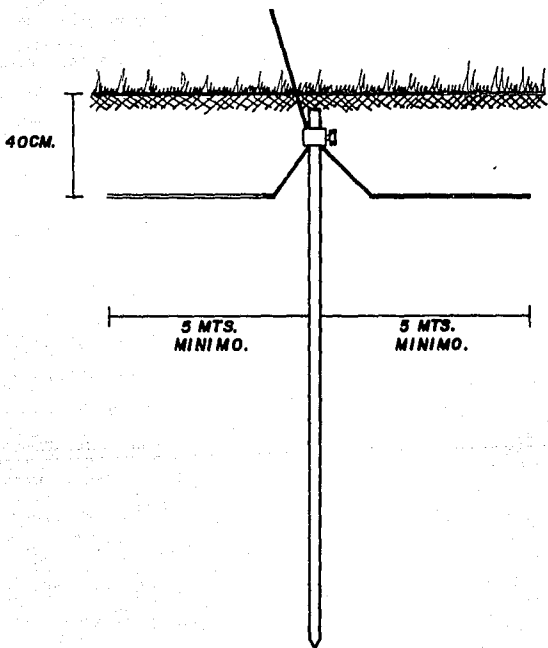
Cuando el valor de la resistencia de tierra no es la deseada con un sólo electrodo y cuando la adición de electrodos se dificulta por las características del terreno, se puede optar por la utilización de contra-antenas, que consiste en instalar líneas radiales de conductor de cobre partiendo del electrodo ya instalado. Ver figura 4.3.

Estas líneas radiales van enterradas en una zanja con profundidad mínima de 0.4 metros con conductor de calibre #6 como mínimo, el cuál irá conectado a la varilla de tierra.

El número de contra-antenas y su longitud para llegar al valor deseado de resistencia, está en función de los valores obtenidos al hacer las mediciones en el terreno.

#### 4.3. ELECTRODOS MULTIPLES EN PARALELO.

Este método consiste en colocar electrodos en diferentes cantidades y configuraciones, espaciados una distancia uno del otro en por lo menos igual a la longitud del electrodo más largo; pues si se acercan demasiado pierden efectividad rápidamente. La instalación de dos o más electrodos juntos nos ayuda a reducir



**FIG. 4.3**  
**CONTRAANTENAS.**

cir la resistencia, pues la resistencia de uno de ellos a tierra es casi igual que la de dos o más.

Cuando los electrodos tienen el espaciamiento adecuado, tienden a seguir la ley de las resistencias en paralelo, es decir, dos electrodos tendrán  $1/2$  de la resistencia de un sólo electrodo. Sin embargo ésta relación no es cierta al cienpor ciento en la práctica, pues dependerá del espaciamiento entre electrodos, uniformidad del terreno y otros factores que tienden a cumplir la ley de resistencias en paralelo, pues con ello se tienen dos o más caminos de flujo de corriente a tierra.

En la figura 4.4 se observan los resultados obtenidos de resistencia con dos o más varillas en paralelo, con la separación y la profundidad de ellas. Las varillas utilizadas son del tipo copperwel de 0.65, 2.03 y 3.05 metros de longitud. A distancia cero, la resistencia es tomada como la cantidad de todos los especímenes en grupo. La curva muestra que la distancia entre varillas acelera la reducción de la resistencia, cayendo rápidamente al principio y lentamente después, tendiendo a tomar el valor promedio de  $R_L/2$  en el infinito, sin embargo, después de 1,83 a 3,05 metros, se hace prácticamente despreciable para propósitos ya prácticos.



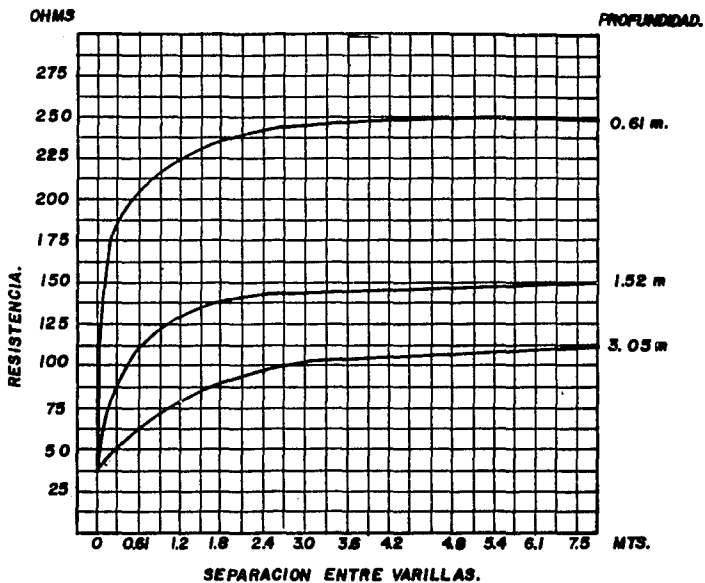


FIG. 4.4 (a)

VARIACION DE LA RESISTENCIA DE DOS VARILLAS ENTERRADAS CON LA PROFUNDIDAD Y LA SEPARACION DE ELLAS.

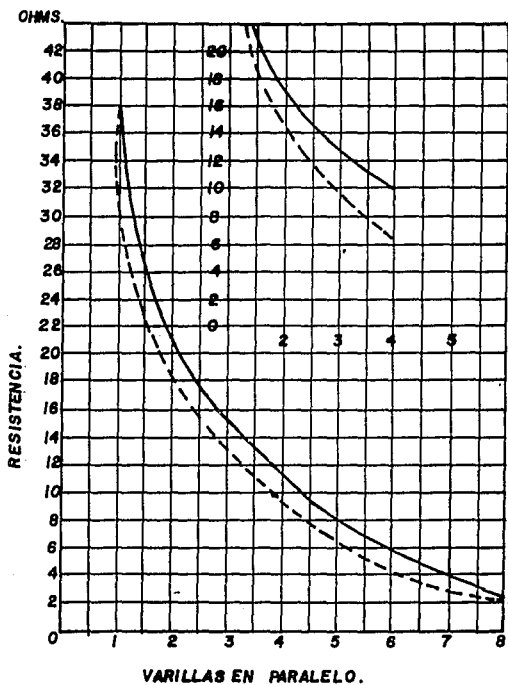
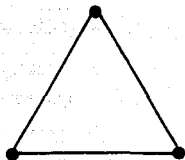


FIG. 4.4 (b)

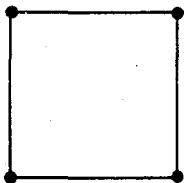
VARIACION DE LA RESISTENCIA DE VARILLAS  
EN PARALELOS CON EL NUMERO DE ELLAS  
A 3.05 METROS DE PROFUNDIDAD.



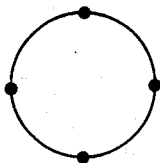
**EN LINEA.**



**EN TRIANGULO.**



**EN CUADRO.**



**EN CIRCULO.**

**FIG. 4.5**

**ARREGLOS MAS COMUNES CON ELECTRODOS.**

Los arreglos más comunes utilizados en la implantación de electrodos múltiples se muestran en la figura 4.5.

#### 4.4. TRATAMIENTOS QUIMICOS.

En algunos terrenos, la resistividad es tan elevada que para obtener una puesta a tierra de valor razonablemente bajo se necesitará emplear sistemas de enormes dimensiones con un costo muy elevado. En éstos casos, se puede recurrir al uso de un sistema de dimensiones físicas limitadas y reducir artificialmente la resistividad del terreno más inmediato al electrodo.

En los comercios se pueden adquirir productos especiales para rociar el terreno inmediato al electrodo; se trata de soluciones que originan precipitados inatacables por los ácidos del terreno y que dan lugar a formaciones de masas gelatinosas que se desparraman produciendo numerosas ramificaciones de agua. De ésta forma no sólo resulta aumentada la conductividad del terreno, sino también la superficie de contacto entre el electrodo y el terreno.

Se puede recurrir a las sales minerales como el cloruro de sodio, el sulfato de magnesio y el sulfato de cobre, disueltas en agua y vertidas sobre el terreno, o directamen

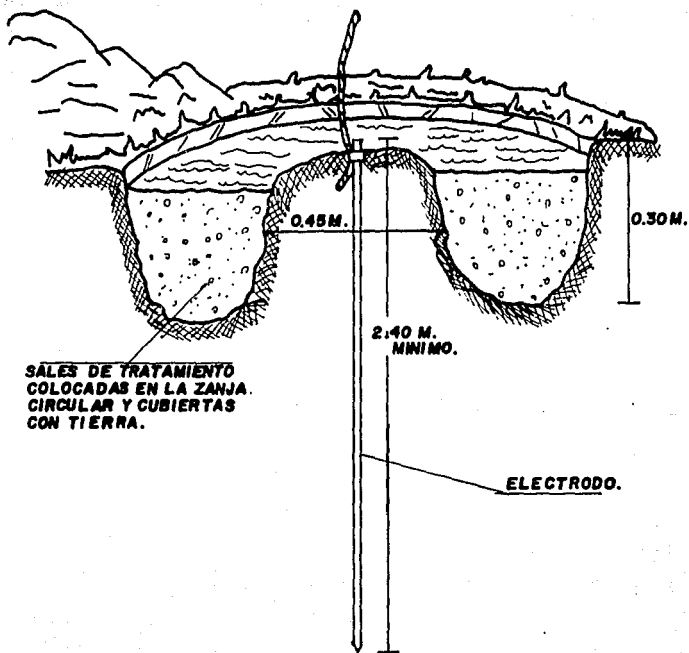


FIG. 4.6

METODO DE LA ZANJA CIRCULAR  
PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS.

te en el electrodo si éste es tubular. Sin embargo, los resultados no siempre corresponden a lo previsto y en algunos casos se producen fenómenos de corrosión; por otra parte, algunas de éstas soluciones contienen productos tóxicos cuya manipulación exige cautela.

#### Agregado de sales simples.

La figura 4.6 muestra un método típico para el tratamiento químico simple de suelos mediante sales, que como ya se dijo, aumentan sustancialmente la conductividad del suelo.

Las sales deben ser colocadas preferentemente en una zanja circular rodeando al electrodo y tapadas con tierra, sin entrar en contacto directo con el electrodo. Esto otorga la mejor distribución de sales con el menor efecto corrosivo.

Otra forma de hacer el agregado de sales al terreno, es mezclándola con el material que servirá de relleno a perforaciones hechas donde se instalará un electrodo.

El sulfato de magnesio, sulfato de cobre, cloruro de sodio (sal común) y el cloruro de calcio, son sales que pueden utilizarse con éste propósito. El sulfato de magnesio -

es especialmente recomendable por ser menos corrosivo, sin embargo, la sal común es la más económica y bastante satisfactoria con el método de la zanja circular.

Los efectos de éste método no son permanentes en el tiempo, por que las sales son lavadas por el mismo suelo a través de la percolación (filtraje) producido por las lluvias.

La sal debe reponerse después de un periodo de tiempo que depende del régimen de lluvias y de la propiedad del suelo (puede estimarse de 2 a 4 años). En otras palabras, la resistividad del suelo tratado va aumentando paulatina mente hasta alcanzar el valor original. Debido entonces a su degradación, éste método es poco aconsejable, ya que actualmente se dispone de alternativas tanto o más efectivas, de gran permanencia y no corrosivas.

#### Agregado de coque o carbón.

La resistividad del coque es de aproximadamente 130 ohm-cm, es decir, muy inferior a la de la gran mayoría de los suelos y es además independiente del contenido de humedad.

Cuando al hacer una excavación para introducir un -

electrodo la llenamos de carbón, se está cambiando o reemplazando el suelo en contacto con el electrodo por una sustancia de baja resistividad.

Se consigue, en efecto, una apreciable reducción de la resistencia, aunque no independiente del contenido de humedad, ya que por razones prácticas, la cantidad de carbón que se utiliza es limitada, la resistencia debida al resto del volumen del suelo es grande y por tanto, la variación en función de la humedad aparece casi en la misma proporción que en electrodos instalados sin tratamiento artificial.

Respecto a la sal, el carbón tiene la desventaja de que debe excavarse para su colocación, pero tiene la ventaja de ser permanente en el tiempo, por lo que no necesita renovarse.

Una seria desventaja, tanto para la sal como para el coque es su efecto corrosivo, que puede reducir notablemente la vida útil del electrodo, especialmente si es ferroso.

Tratando de obtener mejores resultados, suelen colocarse los electrodos en una perforación rellena con distintos materiales o una mezcla de ellas, tales como: carbonilla de carbón vegetal, polvo de coque, polvo de grafito, sa-



les, etc.

### Aporte de sales gel.

Tratando de superar el fundamental inconveniente de la adición de sales, o sea su no permanencia, se desarrollaron métodos para corregir esa deficiencia. Todos ellos tienen un denominador común y consisten en inyectar o irrigar el terreno con dos o más sales en solución acuosa acompañadas de catalizadores en la proporción adecuada, que reaccionan entre sí formando un precipitado en forma de gel estable, con una elevada conductividad eléctrica, resistentes a los ácidos del terreno, con buenas cualidades higroscópicas y lo más importante, insoluble en agua. La insolubilidad es lo que confiere al tratamiento la permanencia en el tiempo.

De ésta manera se consiguen notables reducciones en la resistencia a tierra que van del 25 al 80 por ciento del valor original sin tratamiento.

Las soluciones químicas más conocidas para éste método son:

a). Acrylamida.

La gel pura tiene una resistividad de aproximadamente 1 ohm-m. Las sales y catalizador utilizados son tóxicos

y deben conocerse las reglas para su empleo.

b). Gel de silicato.

Soluciones de silicato de sodio con catalizadores adecuados forman un gel de ácido sílico de baja resistividad, alrededor de 0.23 ohm-m. El ácido hidrocblórico usado como catalizador debe ser, por supuesto, tratado con cuidado.

c). Método Sanick.

Este proceso lleva el nombre del químico sueco que lo desarrolló. Es un gel de ferrocianuro de cobre, que se forma por la combinación de sulfato de cobre y ferrocianuro de sodio. La resistividad es de aproximadamente 0.2 ohm-m. El tiempo de formación de la gel es muy corto, por lo que las soluciones deben aportarse al terreno separadamente.

Ensayos en laboratorio han demostrado que tanto el hierro como el cobre, se corroen en contacto con los tres gel mencionados. La rapidez de corrosión no ha sido suficientemente establecida, pero en principio, se considera que no es más seria de la que puede esperarse en terrenos ácidos o alcalinos.

### Uso de la bentonita.

Debido a que la resistividad del terreno depende de la composición del mismo, se hace necesario en algunos casos mejorar las condiciones de resistividad, para que los electrodos de tierra tengan menor resistencia. Uno de los sistemas más económicos y de mayor efectividad para abatir la resistividad es tratar el terreno en base a la absorción de humedad de la bentonita sódica.

La bentonita es un mineral de composición compleja, básicamente arcilla, de notables características higroscópicas, buen conductor de la electricidad y que además protege de la corrosión a los electrodos ferrosos.

El procedimiento de ejecución de puesta a tierra con inyección de bentonita, puede emplearse en cualquier tipo de terreno de características desfavorables y no solamente para el caso de altas resistividades.

En las normas de distribución y construcción de líneas aéreas de la CFE se recomienda que en todos los casos en que se utilice la bentonita, la mezcla deber ser de 1,5 litros de agua por cada kilogramo de bentonita. Esta mezcla se debe batir hasta obtener una masa uniforme y gelatinosa. Una vez -

terminado el trabajo, se debe permitir el acceso al agua para mantener la humedad de la mezcla.

a). Sistema de tierra con varillas y bentonita.

En éste caso se recomienda hacer una cepa de 45 - centímetros de diámetro por 1,50 metros de profundidad, en lo que se clava el electrodo de tierra - al centro de la misma. Posteriormente se llena la cepa con la mezcla de bentonita y agua, se agrega para que el terreno se impregne bien con la mezcla, figura 4.7.

b). Sistema de tierra con contra-antenas y bentonita.

Se instala la red de contra-antenas, se llena la zanja con la mezcla de bentonita y agua a lo largo de las contra-antenas, por último se tapa la zanja con la tierra extraída.

c). Tratamiento de terrenos rocosos con bentonita.

Se efectúan perforaciones con equipo neumático o moto-vibrador, con brocas de 5.08 cm de diámetro - por 150 cm de longitud, el número de perforaciones depende de las características del terreno y de los valores de resistividad requeridos. Se elabora una parrilla con alambre de cobre semiduro desnudo calibre no. 6 AWG de una pieza (sin empalmes) para insertarse en las perforaciones, ambos extremos -

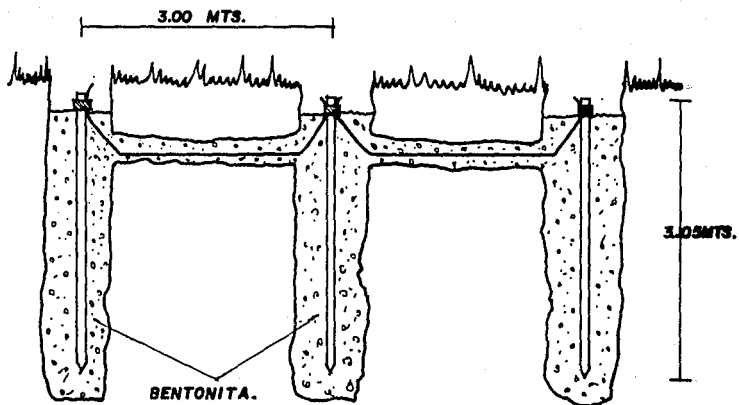


FIG. 4.7

COMBINACION DE ELECTRODOS  
MÚLTIPLES CON BENTONITA.

del alambre se unen con entorche.

Las zanjas y perforaciones se llenan con una pasta fluida de bentonita con agua, la parte superior de la zanja (10 cm) se recubre con material de la excavación.

#### 4.5. CORROSION DE ELECTRODOS DE TIERRA.

Tanto la corrosión general como la corrosión por perforación puede afectar el funcionamiento y la confiabilidad de los sistemas de conexión a tierra cuando la sección transversal del conductor corroído se hace inadecuada para la corriente diseñada. La corriente se convierte en un factor decisivo, ya que no es factible el inspeccionar o probar la extensa conexión a tierra para localizar el daño de corrosión, ni practicable para reforzar o reemplazar las secciones corroídas de los conductores a tierra.

Si los electrodos son de cobre, se corroen en suelos que contienen sales de amonio y azufre, los elementos químicos nitrados lo atacan rápidamente al igual que muchos ácidos orgánicos aún cuando están diluídos.

Si el electrodo es de aluminio, es atacado por el ácido clorhídrico que lo corroe fácilmente por lo que el trata-

tamiento con el cloruro de sodio no es conveniente hacerlo. igualmente no debe hacerse sistemas de tierra con electrodos de aluminio en las inmediaciones del mar. En cambio resiste el ácido sulfúrico diluido, el ácido nítrico lo corroe ligeramente lo mismo que sus compuestos.

Los ácidos orgánicos débiles no lo atacan y se protege con una capa de óxido de aluminio que evita la progresión de los ataques de corrosión.

Si los electrodos son de acero, se corroen fácilmente en suelos que contienen sales de amonio y azufre, pero tiene ventajas tecnoeconómicas sobre el cobre, aunque su uso va desapareciendo para utilizar el cobre y el aluminio en la implantación de sistemas de tierra.

El resultado de estudios experimentales en los cuales los conductores de cobre, acero y aluminio fueron enterrados juntos en seis diferentes subestaciones, mostrarón que la tasa de corrosión de acero no galvanizado fue aproximadamente 4.4 veces mayor que la del cobre.

Debido al gran número de factores complejos influyentes en la tasa de corrosión del suelo, un análisis detallado es necesario para determinar el grado de corrosión de

los conductores en un sitio dado.

El uso de desperdicios de madera, hojas u otros elementos higroscópicos susceptibles de una descomposición orgánica, no se recomienda por producir ácidos que pueden atacar al electrodo de tierra.

La protección catódica o electrodos de castigo, se considera también como tratamiento químico, teniéndose en cuenta que para el cobre se pueden utilizar como electrodos de castigo el zinc, el magnesio y el hierro, para el aluminio se puede utilizar el magnesio y el calcio, pero no el hierro, ya que al combinarse el óxido de hierro y el aluminio en polvo puede provocarse reacción exotérmica.

El suelo es una mezcla heterogénea de muchas micro y macro estructuras de diferentes características físicas y químicas. La resistividad del suelo es una medida de casi todas las propiedades físico-químicas del suelo. Los datos experimentales acerca de la corrosión del acero indican que el grado de corrosión en la mayoría de los suelos aumenta con la disminución de la resistividad del suelo. El rango generalmente aceptado de corrosividad del suelo, determinado por su resistividad, se muestra en la table 4.1.



Tabla 4.1

RESISTIVIDAD DEL SUELO Y CORROSION.

| Escala de resistividad<br>del suelo en ohms-metro | Clase                       |
|---|-----------------------------|
| Menos de 25                                       | Altamente corrosivo.        |
| 25 - 50   | Moderadamente corrosivos.   |
| 51 - 100  | Ligeramente corrosivo.      |
| Sobre 100   | Muy ligeramente corrosivos. |

## C A P I T U L O   V

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS PARA EL  
EDIFICIO DE LABORATORIOS DEL AREA DE  
INGENIERIA ELECTRICA DE LA ESCUELA NA -  
CIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON.

V. DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS PARA EL EDIFICIO DE  
LABORATORIOS DEL AREA DE INGENIERIA ELECTRICA DE LA  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON

5.1. DISEÑO PRELIMINAR DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

El diseño de una red de tierras se considera por lo general una tarea fácil; sin embargo, es un problema complejo si se incluyen en forma realista todos los factores que determinan su comportamiento, tales como la resistividad del suelo, su composición química, los cambios de temperatura durante las estaciones del año, la estructura longitudinal y transversal del terreno, etc., todo esto nos predispone para establecer una metodología de medición y de poder interpretar los datos para considerarlos un parámetro de diseño.

El diseño de redes de tierra generalmente consiste en determinar la longitud, calibre y disposición de los conductores que se entierran a poca profundidad de tal manera que satisfaga la necesidad de seguridad humana, la protección de los equipos y control de las sobretensiones, todo esto en condiciones de falla a tierra.

Para optimizar el diseño de las redes de tierra se han -

desarrollado programas de computadora, los cuales hacen posible estudiar de manera más precisa el funcionamiento de redes de tierra complejas en suelos heterogéneos. Sin embargo, es necesario contar con una metodología de diseño simplificada, por medio de la cual puedan determinarse los parámetros básicos de un diseño preliminar así como el comportamiento esperado.

## 5.2. DATOS DE DISEÑO.

La información que se requiere para el cálculo preliminar de la red de tierra es:

### Plano de localización general.

Un plano que muestra la disposición del terreno en el cual se pretende instalar el sistema de tierras.

### Resistividad del suelo.

Este dato deberá obtenerse a través de mediciones de campo utilizando cualquiera de los métodos descritos.

### Corriente de falla.

El valor de la corriente de falla se podrá obtener de la empresa suministradora de energía eléctrica. Para éste dato -

no deberá usarse la información de capacidad interruptiva, ya que este valor difiere del correspondiente a la corriente de falla a tierra calculada por medio de estudios de corto circuito.

Es de gran importancia establecer que la corriente de falla debe ser precisamente la de falla de una fase a tierra, ya que en ningún caso debe tomarse el valor de la falla trifásica, valor útil para especificaciones de capacidad interruptiva, a pesar de que normalmente proporciona valores mayores a los de la corriente de falla de fase a tierra, además la falla trifásica puede controlarse mediante las protecciones hasta llegar a su extinción, mientras que la falla de fase a tierra drena corriente hacia aquella, antes de que actúen las protecciones.

### 5.3. PARAMETROS DE DISEÑO.

Las características naturales del suelo y la capacidad de corto circuito de la red eléctrica en el lugar de la instalación, determinan los parámetros básicos que nos permiten conocer la forma de la red de tierras. Los parámetros por determinar son:

#### Area de la red.

Cuando en forma práctica se efectúa un diseño, se pre -

sentan dos condiciones; la disponibilidad de un área limitada que reflejará un valor límite de la resistencia a tierra del electrodo, o bien, el uso de un área no limitada, con lo que se logrará el valor de resistencia para el electrodo de puesta a tierra.

#### Potenciales de paso y de toque.

Para asegurar la protección del personal dentro del área de la instalación durante la ocurrencia de una falla, es necesario limitar éstos potenciales a valores normalizados, los cuales se han establecido a través de experimentos.

#### Longitud del conductor de la red.

Conociendo la longitud del conductor de la red, se puede adoptar una configuración sobre el área de que se puede hacer mano.

#### Sección transversal del conductor.

Realmente, quienes limitan el área del conductor son la rigidez mecánica y la capacidad térmica, esta última es la que impone la circulación de la corriente de falla a través de la red.

#### Varillas de tierra.

Tienen por objeto distribuir de manera eficaz la corriente

te de falla en el terreno, especialmente cuando la resistividad del suelo es menor a medida que aumenta la profundidad, o cuando existen fuertes variaciones de la resistividad superficial del terreno, en las diferentes estaciones del año.

#### Tiempo de apertura de interruptores.

Como indican las expresiones utilizadas en el cálculo de los potenciales de contacto y de paso, el tiempo en el que persiste la falla determinará la magnitud del potencial seguro. A pesar de que actualmente existen interruptores de protección que operan en un lapso de tiempo de 0.2 segundos, se sugiere, para efectos de cálculo, se tomen valores más conservadores con tiempos de apertura del orden de los 0.5 segundos.

#### 5.4. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.

El objetivo de estas recomendaciones para el cálculo preliminar del sistema de tierras es presentar un método sistemático simplificado que permita efectuar los cálculos preliminares que den una idea de las dimensiones del sistema de tierras a instalar, así como su comportamiento esperado. El método presentado no es exacto, pues se basa en expresiones empíricas y en algunos casos llevan a resultados incongruentes, por lo que se recomienda que para el cálculo final de la red de tierras se apliquen los programas digitales que

existen para tal fin.

cálculo de la resistencia deseada.

El primer parámetro que se determinará en los diseños - de redes de tierras, es la resistencia deseada para la red, - este valor dependerá de la corriente de falla a tierra y de - la elevación de potencial esperada en el área de subestación.

$$R = \frac{V}{I}$$

Donde: R = resistencia de la red.

V = Elevación aceptable de potencial en la red.

I = Corriente de falla.

El resultado de esta expresión constituye un objetivo, - ya que la resistencia final de la red en el diseño dependerá - del área y de la longitud del conductor. Sin embargo, nos da una idea de la magnitud de la resistencia de la red, que bus- - cará satisfacerse.

El valor de la elevación del potencial en la red lo li- - mita el nivel de aislamiento de los equipos de comunicación - y control, tradicionalmente se toma de 5 Kv., o de 10 Kv, cuand - do el área de la red y la corriente de falla imponen limita - ciones serias.



### Cálculo del calibre del conductor.

Tradicionalmente se ha considerado que el calibre del conductor está en función de su capacidad térmica, pero, con los tiempos de apertura que tienen los sistemas de protección modernos, ésto ha dejado de ser una limitación y la sección transversal de los conductores de la red estará determinada por razones mecánicas, por lo que bastarán conductores con calibre de 2/0 a 4/0 AWG. Según la ecuación de ONDERDONK, un conductor de calibre 4/0 AWG soporta, antes de la fusión, una corriente de 40 000 amperes por un tiempo de 0.5 segundos.

Con la ecuación de Onderdonk, se puede seleccionar el calibre del conductor de cobre y la unión adecuada para evitar la fusión.

$$A = \frac{I}{\sqrt{\frac{c_p \left( \frac{T_m - T_a}{324 + T_a} + 1 \right)}{33 t}}}$$

donde: A = área del cobre en circular mil (1 C.M. = 0.005067 mm<sup>2</sup>)

I = corriente de falla en amperes.

t = temperatura máxima permisible (1083 °C temperatura de fusión del cobre, 450°C permisible para soldadura de latón y 250°C para uniones con conectores).

Ta = temperatura ambiente (35° a 40°).

Otra forma de cálculo es, dividiendo la corriente máxima de fallas a tierra entre la densidad de corriente del material usado.

$$A = \frac{I}{D}$$

donde: A = área del conductor en mm<sup>2</sup>.

I = corriente máxima de falla a tierra en amperes.

D = densidad de corriente del material usado en amp./mm<sup>2</sup>

(para el cobre D = 160 amp./mm<sup>2</sup> para el aluminio -

D = 100 amp./mm<sup>2</sup>).

Para una selección rápida del calibre del conductor se puede hechar mano de la tabla 4.1, basada en la ecuación de Onderdonk.

Tabla No. 5.1.

CALIBRES RECOMENDADOS DE CONDUCTORES DE COBRE UTILIZADOS EN LAS REDES DE TIERRAS.

| Tiempo de duración de la falla (segundos). | mm <sup>2</sup> por ampere |                                   |                              |
|--|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|  | Cable solo                 | con uniones de soldadura de laton | con uniones de de conectores |
| 30.0                                       | 0.02026                    | 0.02530                           | 0.03297                      |
| 4.0  | 0.00709                    | 0.01013                           | 0.01216                      |
| 1.0  | 0.00355                    | 0.00506                           | 0.00608                      |
| 0.1  | 0.00253                    | 0.00329                           | 0.00430                      |

Las normas Técnicas para Instalaciones Eléctricas nos -  
recomiendan, para utilizar en los electrodos de tierra, los ca-  
libres de conductores mostrados en la tabla 5.2.

TABLA No. 5.2.  
CALIBRE DEL CONDUCTOR DEL ELECTODO  
DE TIERRA EN SISTEMAS DE CORRIENTE  
ALTERNA

| Calibre del conductor más grande de la acometida o alimentador general para conductores en paralelo.<br>AWG o MCM (cobre) | Calibre del conductor del electrodo de tierra.<br>AWG o MCM (cobre) |
|---|---|
| 2 ó menor   | 8   |
| 1/0   | 6   |
| 2/0 a 3/0   | 4   |
| 4/0 a 350   | 2   |
| 400 a 600   | 2/0   |
| 600 a 1000  | 3/0   |
| más de 1000   | 4/0   |

Cálculo de la longitud del conductor.

Para calcular la longitud del conductor que formará la malla capaz de mantener las tensiones dentro de los límites de seguridad se utiliza la expresión:

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{116 + 0.17 \rho_s}$$

donde :  $\rho$  = resistividad del terreno en ohms-metro.

$I$  = corriente de falla en amperes.

$t$  = duración de la falla (normalmente 0.5 segundos).

$\rho_s$  = resistividad superficial del terreno en ohms-metro  
(generalmente se considera entre 3000 y 5000 ohm-metro)

$K_m$  - coeficiente de paso, que se calcula con la expresión:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \log \left( \frac{D^2}{16 h d} \right) + \frac{1}{\pi} \log \left( \frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \frac{7}{8} \times \dots \frac{m}{m+1} \right)$$

donde:  $D$  = separación entre conductores en metros.

$d$  = diámetro del conductor en metros.

$h$  = profundidad de enterramiento de la malla (0.5 metros).

El número de factores en el paréntesis del segundo término no es de dos menos, que el número de conductores paralelos más cortos de la malla.

$K_i$  = factor de corrección por irregularidad que permite, por la no uniformidad del terreno, el flujo de corriente de diferentes partes de la malla.

$$K_i = 0.65 + 0.172 n$$

donde:  $n$  = número de conductores paralelos más cortos de la malla.

El producto  $K_m \times K_i$ , nos da valores entre 1.8 y 2.25 dependiendo del número de conductores paralelos y del área de la malla.

La ecuación para el cálculo de la longitud del conductor se deduce a partir de los valores de voltaje de toque y voltaje de malla en la situación más desfavorable.

#### Número de varillas a emplear.

Cuando, debido a las condiciones del terreno, no se consigue la resistencia deseada utilizando la malla simple, y es antieconómico el uso de más conductor, se puede recurrir a las varillas de tierra para poder llegar a mayores profundidades.

Es difícil dar una fórmula generalizada para calcular el número de varillas requeridas, ya que los electrodos de tierra no siguen a la perfección la ley de las resistencias en paralelo, sin embargo, se acepta la fórmula:

$$N_v = 0.6 \sqrt{a}$$

donde;  $a$  = área total de la superficie en  $m^2$ .

También es aceptado el uso de la fórmula empírica.

$$N_v = 1.125 R_v$$

donde  $R_v$  es la resistencia de la varilla en ohms definida por:

$$R_v = \frac{\rho}{1.415 L} \left( \ln \frac{96 L}{d} - 1 \right)$$

donde:  $\rho$  = resistividad del terreno en ohms-metro

$L$  = longitud de la varilla en pies (un pie = 30.43 cm.).

$d$  = diámetro de la varilla en pulgadas (una pulg. = 2.54 cm).

Para varillas de 10 pies (305 cm) de longitud y 3/4 de pulgada (1.9 cm), la expresión se reduce a:

$$N_v = 0.3214 \rho \text{ ohms.}$$

Las varillas se distribuyen a lo largo del perímetro de la malla con distancias de separación de dos a tres veces su longitud, cuando haya varillas adicionales, se instalarán en el interior de la malla.

#### 5.5. ANALISIS DE OPERACION DE LA RED.

Para juzgar el comportamiento de la red, una vez determinados los parámetros básicos, se procede al análisis del comportamiento esperado.

#### Cálculo de la resistencia de la red.

La resistencia que tendrá la malla de tierras calculada

será:

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

donde:  $\rho$  = resistividad del suelo en ohms-metro.

$L$  = longitud del conductor enterrado en metros.

$r$  = radio equivalente de la malla en metros.

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

donde:  $a$  = área total de la malla en  $m^2$ .

En esta expresión,  $\rho/4r$  es la contribución a la resistencia del área de la red y  $\rho/L$ , es la resistencia con que contribuye el conductor enterrado.

#### Cálculo de los potenciales de contacto, de paso y de malla.

Para conocer las tensiones de contacto y de paso máximas tolerables, aplicamos las expresiones generalizadas:

$$V_{\text{contacto}} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

$$V_{\text{paso}} = \frac{116 + 0.7 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

La diferencia de potencial en volts, del conductor de la malla y la superficie del terreno al centro del rectángulo de

la malla es el "voltaje de malla", calculado por la expresión:

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

$K_i$  = factor de corrección de irregularidad.

donde:  $K_m$  = coeficiente de paso.

$\rho$  = resistividad del terreno

$L$  = longitud del conductor que forma la red

$I$  = corriente de falla a tierra inyectada a la red.

Las tensiones de contacto y de paso se pueden controlar disminuyendo el espaciamiento entre los conductores que forman la malla. La situación es diferente en zonas inmediatas a la periferia de la red, donde el problema puede existir aún con el uso de una placa sólida como malla. Este problema es más serio en subestaciones pequeñas, donde la red cubre un área limitada. A este tipo especial de tensión se le conoce como "tensión periférica de la malla" y generalmente tiene valores superiores a los de la tensión de contacto y se calcula por medio de la expresión:

$$E_p = K_p K_i \frac{\rho I}{L}$$

donde:  $E_p$  = tensión de la periferia de la malla.

$K_i$  = factor de corrección de irregularidad.

$\rho$  = resistividad del terreno.

$I$  = corriente de la falla a tierra.



L = longitud del conductor que forma la red.

KP = coeficiente de periferia.

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

El número de términos dentro del paréntesis es igual al número de conductores transversales (los de menor longitud) en la malla.

De lo anterior se deduce que la distribución de corriente en la malla no es uniforme en toda la red, sino que existe una mayor densidad de corriente en su periferia, por lo que se recomienda que al menos los primeros tres conductores cercanos a la periferia estén separados por distancias que midan la mitad de la separación que existe entre los otros conductores de la red.

#### Cálculo de la elevación máxima de potencial de la red.

La máxima tensión que puede alcanzar la red de tierras - en la condición más desfavorable se calcula con la expresión:

$$E = R I$$

donde: I = corriente máxima de corto circuito.

R = resistencia total de la malla.

Se dice que una malla de tierras es segura cuando se cumplen las siguientes condiciones:

V malla - menor - V contacto.

V periférico - menor - V paso.

Long. calculada - menor o igual - Long. propuesta.

$$R = \frac{V}{I} - \text{mayor} - R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

#### 5.6 EJEMPLO DE APLICACION.

A partir de los siguientes datos, calcular las características de la red de tierras y evaluar su comportamiento.

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| Corriente de falla            | = 14 000 A.    |
| Duración de la falla          | = 0.5 segs.    |
| Area de la instalación.       | = 96 x 12 mts. |
| Resistividad del terreno.     | = 100 Ohm-m.   |
| Resistividad superficial.     | = 3 000 ohm-m. |
| Profundidad de enterramiento. | = 0.5 mts.     |
| Temperatura ambiente.         | = 35 ° C.      |
| Tipo de conectores.           | = mecánicos    |

Solución.

En función del área con que se cuenta, se dispone un arre

glo inicial en forma de malla con cuadrícula de 8.0 x 8.0 metros y un total de 16 conductores longitudinales y 13 conductores transversales.

a) Longitud total del conductor.

$$L = (13 \times 120) + (16 \times 96) = 3\ 096 \text{ m.}$$

b) Area de la instalación.

$$a = 96 \times 120 = 11\ 520 \text{ m.}^2$$

c) Radio equivalente.

$$r = \sqrt{\frac{a}{\pi}} = \sqrt{\frac{11\ 520}{3.1416}} = 60.55 \text{ m.}$$

d) Resistencia aproximada de la red.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{5\ 000}{14\ 000} = 0.36 \text{ ohms.}$$

e) Calibre del conductor.

$$A = \frac{I}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{324 + T_a} + 1\right)}{33 t}}} \cong \frac{14\ 000}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{250 - 35}{324 + 35} + 1\right)}{33 (0.5)}}}$$

$$A = 125\ 965 \text{ Circular Mil}$$

$$A = 125\ 965 \text{ C.M.} \times 0.0005067 \text{ mm}^2 / \text{C.M.} = 63.83 \text{ mm}^2$$

Corresponde a un conductor de cobre calibre 2/0 AWG con sección transversal de 67.4 mm<sup>2</sup> y 9.266 mm de diámetro.

f) Longitud mínima del conductor.

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{116 + 0.17 \rho_s}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16 h d} + \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \dots \times \frac{m}{m+1} \right)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(8)}{(16)(0.5)(0.00927)} + \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \dots \times \frac{29}{30} \right)$$

$$K_m = 1.076 + (-0.395) = 0.68$$

$$K_i = 0.65 + 0.172 (n)$$

$$K_i = 0.65 + 0.172 (13) = 2.866$$

sustituyendo valores.

$$L = \frac{(0.68) (2.866) (100) (14\ 000) (\sqrt{0.5})}{116 + 0.17 (3\ 000)} = 3\ 082 \text{ m.}$$

g) Número de varillas.

$$N_v = 0.6 \sqrt{a} = 0.6 \sqrt{11\ 520} = 65$$

Se instalarán 65 varillas tipo copperweld de 3.05 metros de longitud y 19 mm de diámetro, con lo que la nueva longitud de conductor será de:

$$L = 3\ 082 + (65 \times 3.05) = 3\ 280 \text{ m.}$$

h) Resistencia de la red.

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} = \frac{100}{(4)(60.55)} + \frac{100}{3280} = 0.44 \text{ ohms.}$$

i) Cálculo de los potenciales de paso, de contacto y de malla.

$$V_{\text{paso}} = \frac{116 + 0.7 \rho_s}{\sqrt{E}} = \frac{116 + 0.7 (3\ 000)}{\sqrt{0.5}} = 3\ 134 \text{ volts.}$$

$$V \text{ contacto} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{t} = 116 + \frac{0.17 (3\ 000)}{0.5} = 885 \text{ volts.}$$

$$V \text{ malla} = K_m K_i \frac{I \rho}{L} = (0.68)(2.866) \frac{(14\ 000)(100)}{3280} = 832 \text{ v.}$$

j) Tensión en la periferia de la malla.

$$E_p = K_p K_i \frac{\rho I}{L}$$

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

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{8+0.5} + \frac{1}{2(8)} + \frac{1}{3(8)} + \dots + \frac{1}{15(8)} \right)$$

$$K_p = (0.3183)(1.407) = 0.4487$$

sustituyendo valores.

$$E_p = (0.4487)(2.866) \frac{100(14\ 000)}{3\ 280} = 549 \text{ volts.}$$

k) Elevación máxima de potencial en la red.

$$E = R I = (0.44)(14\ 000) = 6\ 160 \text{ volts.}$$

de lo anterior se tiene que:

$$V \text{ malla} = 832 \text{ - menor - } V \text{ contacto} = 885 \text{ volts.}$$

$$V \text{ periférico} = 547 \text{ - menor - } V \text{ paso} = 3\ 134 \text{ volts.}$$

Conclusión:

La malla es segura y adoptará la configuración mostrada en la figura 5.1.

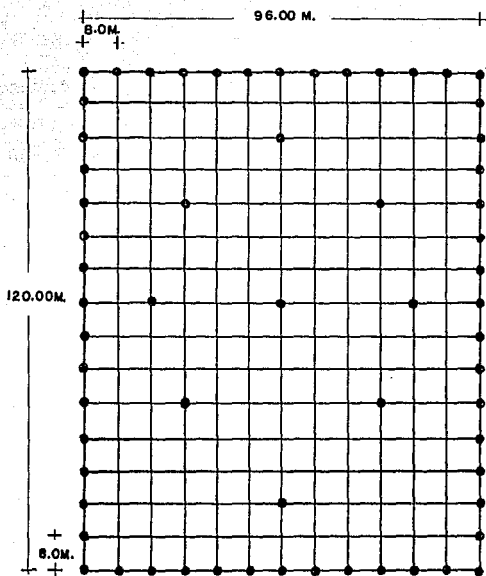


FIG. 5.1  
CONFIGURACION DE LA MALLA

— CABLE DE COBRE DESNUDO CAL. 2/0 AWG.  
● VARILLA COPPERWELD DE 3005x 16 mm Ø

## 5.7. CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO, CLASIFICACION Y METODOS DE CALCULO.

Un corto circuito, es un circuito en el cual disminuye la resistencia y la corriente aumenta bruscamente en comparación con la normal. La disminución de la resistencia puede ser causada por la unión de dos o más conductores con corriente, provocando que ésta circule por donde exista menor resistencia.

En un sistema eléctrico en general, se pueden presentar los siguientes tipos de fallas por corto circuito.

|                      |             |
|----------------------|-------------|
| Línea a tierra.      | 85%.        |
| Línea a línea.       | 8%.         |
| Dos líneas a tierra. | 5%.         |
| Trifásica.           | 2% o menos. |

Para efectos de cálculo es suficiente el estudio de las fallas trifásicas y las de línea a tierra, la primera, por los esfuerzos severos a que somete a los aparatos y equipos, y el de línea a tierra por su probabilidad de ocurrencia.

La magnitud de las corrientes de corto circuito depende de las diversas fuentes que la generan, de sus reactancias y de las reactancias del sistema hasta el punto de falla, siste-

mas de suministro público, generadores, motores síncronos y -  
motores de inducción.

#### Corriente de corto circuito simétrica.

Es una combinación de todas las corrientes de corto circuito de las diferentes fuentes y se presenta como una onda simétrica respecto del eje cero. Este término se aplica a corriente alterna únicamente.

#### Corriente de corto circuito asimétrica.

Es aquella que tiene una onda senoidal fuera del eje de simetría debido a una componente de corriente continua superpuesta. Una corriente asimétrica dará como resultado mayores valores de corriente de cortocircuito que una corriente simétrica ya que es la suma de la simetría y de otra componente unidireccional dependiente de  $R$  y  $X$ .

Esta asimetría se presenta al inicio del corto circuito y es reducida en forma logarítmica por las resistencias y demás causas disipadoras de la energía hasta hacerse nula, figura 5.2

El cálculo de las corrientes de corto circuito se puede hacer por métodos matemáticos, muchos de los cuales van orien



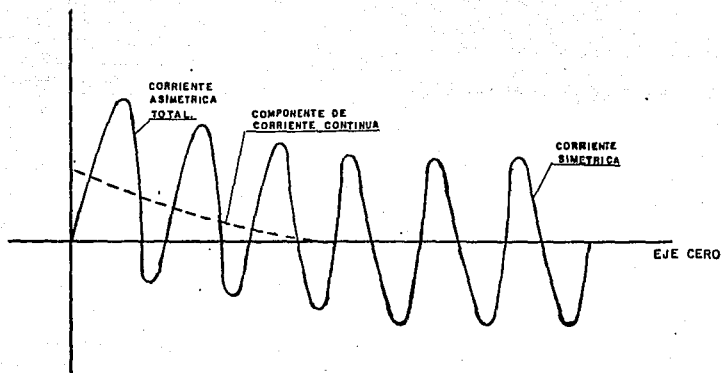


FIG. 5-2

LA COMPONENTE DE CORRIENTE CONTINUA EN UN CIRCUITO REAL, DISMINUYE CON EL TIEMPO DEBIDO A LA PRESENCIA DE RESISTENCIAS. LA CORRIENTE ASIMETRICA - INICIAL CAMBIA A CORRIENTE SIMETRICA.

tados hacia el uso de programas digitales, Estos métodos de cálculo pueden resultar complicados, además de que por lo general requieren de mucha información.

Los estudios de corto circuito con fines prácticos para instalaciones de tipo industrial, se pueden hacer por métodos aproximados que son bastante simples y nos dan una idea del orden de la magnitud de las corrientes de corto circuito, que en la mayoría de los casos corresponden a valores conservadores, es decir, mayores que los esperados y suficientemente confiables para su uso.

Un sistema eléctrico está constituido básicamente por fuentes productoras de energía, elementos de transformación, líneas de transmisión y redes de distribución así como los elementos de consumo (cargas), que eléctricamente hablando se pueden dividir en elementos activos (fuentes) y elementos pasivos (las impedancias de los diferentes elementos). Se consideran como elementos activos o fuentes suministradoras de corriente de corto circuito a:

- Generadores.
- Motores de inducción.
- Motores síncronos.
- Red de la compañía suministradora.
- Turbo-generadores (plantas de emergencia).

Los elementos pasivos o limitadores de las corrientes de corto circuito son:

- Las impedancias de: generadores, motores síncronos, motores de inducción y turbo-generadores.
- Las impedancias de: las líneas de transmisión y distribución, transformadores, reactores y resistencias limitadoras.

Para iniciar el estudio de corto circuito, es necesario contar con un diagrama unifilar del sistema que muestre la instalación de todas las fuentes de corriente de corto circuito. Con ésto se deberá preparar un diagrama de impedancias o reactancias de los diferentes elementos del sistema que pueden influir en el cálculo, figura 5.3, tomando en cuenta lo siguiente:

Impedancia de la red de alimentación.

El valor depende de las características de la red misma. En este caso, la corriente de corto circuito se expresa en Kiloamperes o bien se da el valor de la llamada capacidad interruptiva en MVA, en cualquier caso es un valor que proporciona la compañía suministradora.

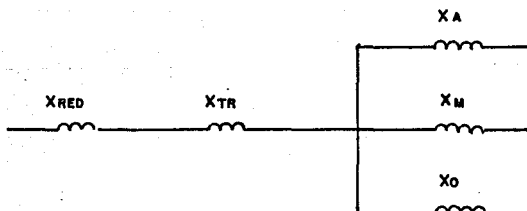
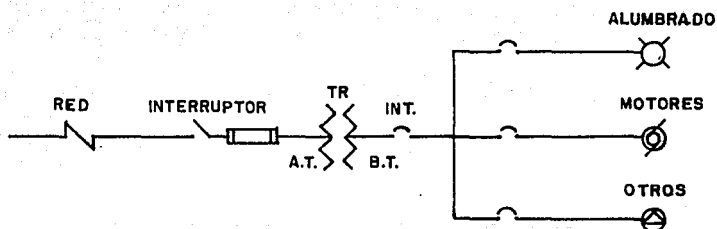


DIAGRAMA DE REACTANCIAS.

FIG. 5.3

ELEMENTOS PRINCIPALES QUE  
CONTRIBUYEN A LAS CORRIENTES  
DE CORTO CIRCUITO.

$$Z = \frac{V^2}{P_{CC}} ; I_{CC} = \frac{VA}{\sqrt{3} \cdot KV}$$

Impedancia de generadores y motores síncronos.

Este valor se obtiene directamente de la placa de datos, generalmente está expresada en por ciento, basado en la propia capacidad nominal. Si no es susceptible de obtener este tipo de información, se puede recurrir al uso de la tabla 5.3 con muy buenos resultados.

Impedancia de los motores de inducción.

En este tipo de motores se puede despreciar la resistencia de manera que la impedancia, es del mismo valor que la reactancia. La reactancia de un motor de inducción se puede calcular por:

$$X = \frac{V_n}{3I_a} \quad \text{ó} \quad X\% = \frac{100 I_n}{I_a}$$

donde:  $I_n$  = Corriente nominal.

$I_a$  = Corriente de arranque del motor.

$V_n$  = Voltaje nominal del motor.

$X$  = Reactancia.

También se puede hacer uso de la tabla 5.4 para obtener-

la reactancia expresada en por ciento a su base de potencia nominal.

#### Impedancia de transformadores.

Este valor se puede obtener de la placa de datos del transformador, generalmente se expresa en por ciento en relación a su base de capacidad nominal. Este dato también se puede obtener en forma aceptable de la tabla 5.5.

#### Impedancia en cables.

Para obtener los valores de resistencia y reactancia de los distintos cables, se puede recurrir a las tablas proporcionadas por los fabricantes. En este caso la resistencia no se puede despreciar por su valor superior respecto a la reactancia, y depende del tipo de material y la sección transversal del conductor.

Para efectos prácticos se asume que los HP en motores operación a 440 volts, es igual a los KVA del transformador que los alimenta y que la reactancia es el 25% de los KVA del transformador, tomada como la reactancia de un motor equivalente. Del mismo modo en sistemas a 220 volts los HP equiva--

TABLA 5.3.

VALORES DE REACTANCIAS DE GENERADORES A LA BASE DE LOS KVA  
NOMINALES

|  |                  |               |
|--|------------------|---------------|
| Generador de polos salientes con devanados de amortiguamiento. | 12 polos o menos | $X''d = 18\%$ |
|  | 14 polos o más   | $X''d = 24\%$ |
| Generador de polos salientes sin devanados de amortiguamiento. | 12 polos o menos | $X''d = 25\%$ |
|  | 14 polos o más   | $X''d = 35\%$ |

$X''d$  = Reactancia subtransitoria.

TABLA 5.4.

VALORES APROXIMADOS DE REACTANCIAS PARA MOTORES DE C.A. A LA  
BASE DE LOS KVA NOMINALES: EXPRESADAS EN PORCIENTO.

|  |            |                               |
|--|------------|-------------------------------|
| Grandes motores sincronicos individuales.  | 6 polos    | $X''d = 10\%$ , $X'd = 154\%$ |
|  | 8-14 polos | $X''d = 15\%$ , $X'd = 24\%$  |
| Grupo de motores sincronicos.              |            |                               |
| 600 volts o menos.                         |            | $X''d = 25\%$ , $X'd = 33\%$  |
| Mayores de 600 volts.                      |            | $X''d = 15\%$ , $X'd = 25\%$  |
| Grandes motores de inducción individuales. |            | $X''d = 25\%$ .               |
| Grupo de motores de inducción              |            |                               |
| 600 volts o menos                          |            | $X''d = 25\%$                 |
| Mayores de 600 volts.                      |            | $X''d = 20\%$                 |

$X'd$  = Reactancia transitoria.

TABLA No. 5.5.

VALORES DE REACTANCIA DE TRANSFORMADORES, EXPRESADA EN PORCIENTO  
A LA BASE DE SU CAPACIDAD NOMINAL.

| CLASE DE VOLTAJE KV | IMPEDANCIA % |
|---------------------|--------------|
| 15                  | 4.5 - 7      |
| 25                  | 5.5 - 8      |
| 34.5                | 6 - 8        |
| 46                  | 6.9 - 9      |
| 69                  | 7 - 10       |
| 92                  | 7.5 - 10.5   |
| 115                 | 8 - 12       |
| 138                 | 8.5 - 13     |
| 161                 | 9 - 14       |
| 196                 | 10 - 15      |
| 220                 | 11 - 16      |



lente. Del mismo modo en sistemas a 220 volts los HP equivalentes de los motores son igual al 50% de los KVA del transformador, esto es por presencia de cargas de alumbrado.

Los métodos utilizados en el estudio de corto circuito son:

- Método de las componentes simétricas.
- Método del bus infinito.
- Método de las potencias o los MVA.
- Método práctico.

#### Método de las componentes simétricas.

Este método nos permite expresar un sistema desequilibrado de fasores (que representan volts o amperes) en tres sistemas equilibrados de fasores designados: componentes de secuencia positiva ( $x_1$ ), componentes de secuencia negativa ( $x_2$ ) y componentes de secuencia cero ( $x_0$ ).

Este método se recomienda para cálculos en sistemas industriales de gran capacidad y donde la precisión de los datos buscados son un factor importante.

Este método aplica las siguientes expresiones en el cálculo de fallas.

$$\text{Falla de fase a tierra} = \frac{3v_n}{x_1 + x_2 + x_0}$$

$$\text{falla trifásica} = \frac{V_n}{x_1}$$

donde:  $V_n$  = Voltaje de fase a neutro.

$x_1$  = Reactancia de secuencia positiva en ohms.

$X_2$  - " " negativa "

$X_0$  = " " cero "

### Método del bus infinito.

Este método considera la fuente de suministro como un bus infinito. Se dice que un bus es infinito si su voltaje y su frecuencia son constantes.

La corriente máxima en el lado secundario del transformador se calcula con la expresión:

$$I_{sec} = \frac{KVA \times 1000}{\sqrt{3} \times V_{sec}}$$

La corriente de corto circuito máxima que puede suministrar el transformador está en función de su propia impedancia.

$$I_{cc} = \frac{100\%}{Z\%} \times I_{sec}$$

### Método de las potencias o de los MVA.

Es similar al método del bus infinito, sólo que utiliza la potencia de los elementos del circuito en lugar de las reactancias.

Para su aplicación, las potencias en paralelo se suman y las potencias en serie se reducen de igual forma que las reactancias, hasta obtener una potencia equivalente.

$$MV_{Acc} = \frac{Kv^2}{Z} = \frac{MVA}{Z_{pu}}$$

$$I_{cc} = \frac{V}{Z}$$

### Método práctico.

Se utiliza con fines prácticos en instalaciones de tipo industrial.

Este método considera que la máxima corriente de corto circuito en la alimentación es el valor que se puede tener en el punto principal de desconexión y que los elementos principales que contribuyen a la corriente de corto circuito son la red de alimentación y la carga local de los motores:

$$I_{tcc} = I_{ccs} + I_{ccm}$$

donde:  $I_{tcc}$  = Corriente total de corto circuito en el punto de falla.

$I_{ccs}$  = Corriente de corto circuito que alimenta la red de suministro.

$I_{ccm}$  = Corriente de corto circuito en que contribuyen los motores.

En la práctica la contribución a la corriente de corto circuito por los motores se toma como cinco veces la suma de las corrientes a plena carga de los motores, estén operando o no, es decir:

$I_{ccm} = 5$  (Suma de corriente a plena carga de todos los motores).

Si la corriente de corto circuito del sistema es  $I_{ccs}$ , la capacidad interruptiva se expresa como:

$$P_{ccs} = \sqrt{3} V I_{ccs}$$

El valor de la corriente de corto circuito que proporciona el sistema en el punto de alimentación se calcula como:

$$I_{ccs} = \frac{V_s}{\sqrt{3} Z_s}$$

donde:  $V_s$  = Voltaje del sistema

$Z_s$  = Impedancia del sistema hasta el punto de alimentación.

$$Z_s = \sqrt{R^2 + X^2}$$

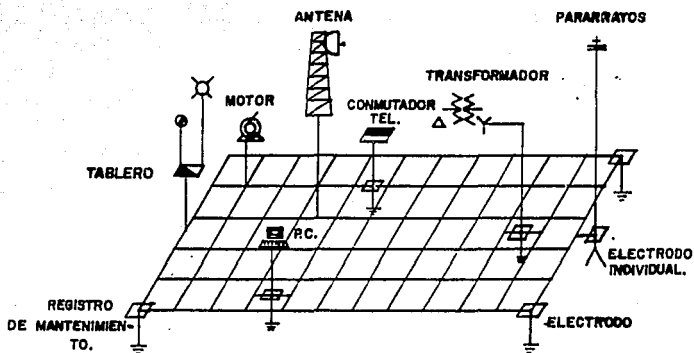
Para valores pequeños de resistencia (10 veces) se considera  $X_s = Z_s$ . La corriente total de corto circuito entonces será:

$$I_{tcc} = \frac{V_s}{1.732 Z_s} + I_{ccm}$$

#### 5.8. LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA INTERCONEXION DE DIFERENTES SISTEMAS DE TIERRA.

En este aspecto el National Electrical Code (NEC) prohíbe el uso de electrodos de pararrayos en el aterrizaje de aparatos y equipos electrónicos, para los cuales deberá utilizarse un sistema distinto y separado.

Sin embargo, si un electrodo de pararrayos se hinca dentro del área de la malla de tierras de la edificación, éstos deberán conectarse firmemente para evitar diferencias de potencial peligrosas al ocurrir una falla en uno de ellos, pero esta unión, deberá efectuarse entre electrodos, nunca en los



MALLA DE TIERRAS

FIG. 5.4

INTERCONEXION DE SISTEMAS DE TIERRAS

conductores de bajada. Además de que éstos sistemas distintos y separados físicamente, están interconectados por el terreno donde están instalados.

Si un rayo impacta en el sistema de pararrayos y en sus cercanías existe un sistema diferente y sin conexión firme entre ellos, se crearía una diferencia de potencial del orden de los miles de volts entre el electrodo del pararrayos y el otro sistema provocando arcos; quedando latente el peligro de provocación de fuego o en el peor de los casos la muerte por electrocución.

De lo anterior se concluye que si en una misma área es necesario instalar sistemas de tierra con diferentes fines, éstos deberán unirse firmemente entre sí para asegurar una superficie equipotencial tal como se muestra en la figura 5.4.

#### 5.9. DISEÑO PROPUESTO.

El objetivo de este diseño es el de mejorar al sistema de tierras actual del edificio de laboratorios del área de Ingeniería eléctrica de la E.N.E.P. Aragón.

Estado actual del sistema de tierras.

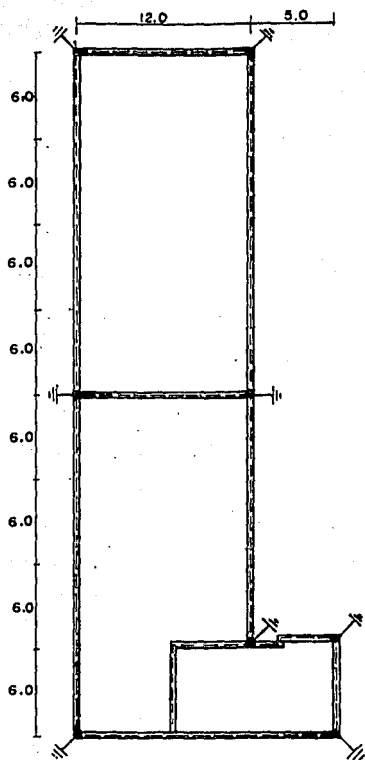
De acuerdo al proyecto realizado para tal fin, el edifi

cio cuenta con un sistema de tierras para los pararrayos -- como el que se aprecia en la figura 5.5, correspondiente al sistema Melsens con jaula de Faraday.

En levantamiento ocular efectuado al mencionado edificio se observó que:

- Las bajadas de los conductores de los pararrayos se hacen ahogándolos en las columnas de concreto del edificio, procedimiento no recomendado debido a los efectos que se pueden ocasionar.
- Se marcan bajadas de conductores, así como la localización de electrodos de tierra, donde el flujo de personas es alto.
- La sujeción de las bases de las puntas pararrayos al conductor, se hace por medio de grapas de presión, lo que ocasiona, al paso del tiempo, falsos contactos por los efectos que sufren los conductores al circular por éstos corriente, ocasionando con ésto, aumentos en la resistencia del sistema.
- No se cuenta con registros de mantenimiento en los lugares donde se indica la presencia de electrodos de tierra, con la inconveniencia de no prestarse para el





- PUNTA PARARRAYOS DE 30 CM. DE LARGO Y 13 MM. DE DIAMÉTRO.
- CONDUCTOR PARARRAYOS DE ALUMINIO TIPO B CLASE I.
- ⏏ ELECTRODO DE TIERRAS CON VARRILLA TIPO COPPERWELD.

FIG. 5.5  
SISTEMA DE PARARRAYOS.

ENEP ARAGON  
EDIFICIO DE LABORATORIOS,  
AREA DE INGENIERIA ELECT-  
TRICA.  
PLANTA AZOTEA  
ESCALA 1:250  
AGOT: metros.

mantenimiento y la verificación de la efectividad del sistema.

- Las estructuras de las antenas parabólicas, no están firmemente conectadas a este sistema de tierras y no se cumple con las distancias de separación establecidas por las Normas Técnicas para Instalaciones eléctricas.
- Para la conexión a tierra de los equipos del laboratorio, como son: motores, tableros, contactos, aparatos de medición y control etc., se cuenta con buses de tierra en los tableros de distribución, conectados a su vez, a un bus general ubicado en el local que ocupan, el transformador que abastece de energía al edificio y el tablero general, con la inconveniencia de las largas distancias. Además este bus general no está firmemente conectado a tierra.

#### Cálculo de la corriente de corto circuito.

Al edificio lo abastece de energía eléctrica un transformador trifásico tipo seco de 225 KVA con relación de transformación de 440 - 220/127 volts, conexión delta estrella y reactancia de 4.16%.

Para calcular la corriente de corto en este sistema eléctrico, se utilizara el método del bus infinito partiendo del diagrama unifilar y su correspondiente diagrama de reactancias mostrados en la figura 5.6, con lo que se obtienen los siguientes resultados:

Corriente en el lado secundario del transformador.

$$I \text{ sec.} = \frac{\text{KVA} \times 1000}{\sqrt{3} \text{ Vsec.}} = \frac{225 \times 1000}{\sqrt{3} \quad 220} = 590.47 \text{ A.}$$

La corriente máxima de corto circuito puede ser suministrada por el transformador esta dada por:

$$I \text{ cc.máx.} = \frac{100\%}{X\%} I \text{ sec.}$$

$$I \text{ cc.máx.} = \frac{100\%}{4.16\%} (590.47) = 14 \ 000 \text{ A}$$

#### Medición de la resistividad del terreno.

Debido a la existencia de una gran cantidad de tubos galvanizados en las cercas de malla ciclónica, incados en los alrededores del área que ocupa el edificio de laboratorios de interes y para evitar lecturas erróneas por fugas de la corriente de prueba por los mencionados tubos, se optó por realizar las mediciones de resistividad en un terre-

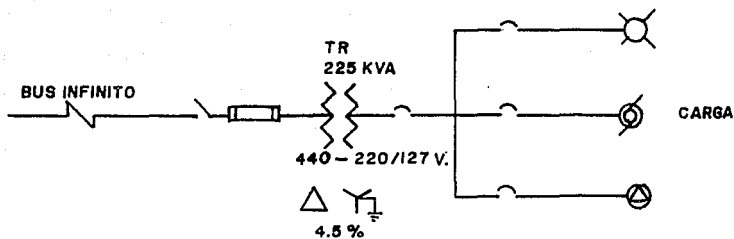


DIAGRAMA UNIFILAR

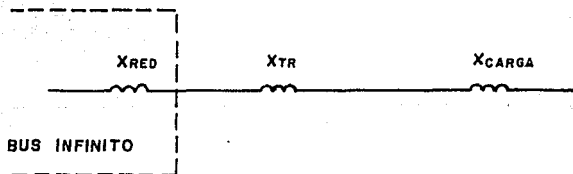


DIAGRAMA DE REACTANCIAS.

FIG. 5.6

no con características similares al estudiado. Para tal fin se escogió el área verde que se ubica a un costado del estacionamiento de la propia institución, de características similares y con menor problema para efectuar las mediciones.

En el proceso de medición de la resistividad de terreno se uso el método de Wenner o de los cuatro electrodos.

#### Equipo empleado.

- Vibroground de lectura central cero, modelo 243 de la empresa Associated Research INC. que nos da lecturas directas de resistencia en ohms.
- Cables de cobre aislado calibre 12 AWG.
- Electrodos de copperweld de 60 cm. de longitud y 16 mm de diámetro, hincados a 30 cm de profundidad.
- Coenctores mecánicos de presión.
- Cinta métrica.

Para obtener los valores de la resistividad a partir de los valores de resistencia obtenidos en las mediciones por medio del Vibroground se utilizará la expresión.

$$\rho = 2\pi aR$$

donde: R = Resistencia medida en ohms.

a = separación entre electrodos en metros.

$\rho$  = resistividad del terreno en ohms-metro.

Los valores obtenidos con las mediciones fueron:

| Separación entre electrodos (metros) | Resistencia leída (ohms) | Resistividad obtenida (ohms-metro) |
|--------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 3                                    | 0.06                     | 1.13                               |
| 5                                    | 0.06                     | 1.88                               |
| 10                                   | 0.05                     | 3.14                               |
| 15                                   | 0.04                     | 3.76                               |
| 20                                   | 0.03                     | 3.76                               |
| 30                                   | 0.03                     | 3.76                               |

Como se puede observar, a mayores profundidades se tienen valores mayores de resistividad, tendiendo a ser constante a partir de los 15 metros. Aunque la malla se enterrara a 0.5 metros de profundidad, donde la resistividad es menor, para efectos del diseño se tomará como valor conservador de resistividad el de 3.76 ohm-m.

En función de la configuración geométrica que tiene el edificio y dada su existencia, se iniciará el diseño proponiendo un electrodo con arreglo en forma de anillo rodeando al edificio, figura 5.7 a 1.5 metros de separación con respecto a las caras exteriores de las columnas de concreto que so tienen al edificio.

Una vez hechas las mediciones se procede al cálculo-

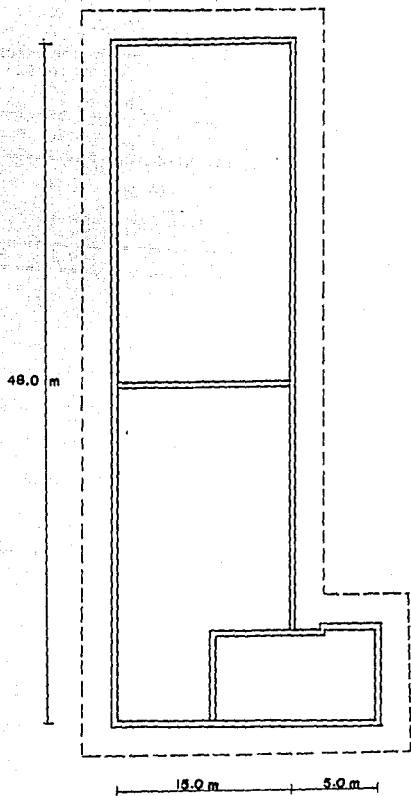


FIG. 5.7  
DISEÑO INICIAL.

de los parámetros del electrodo propuesto.

Datos de diseño.

|                              |                 |
|------------------------------|-----------------|
| Corriente de falla           | = 14 000 A.     |
| Duración de la falla         | = 0.5 segs.     |
| Temperatura ambiente         | = 25 °C.        |
| Resistividad del terreno     | = 3.76 ohms-m.  |
| Resistividad superficial     | = 3 000 ohms-m. |
| Profundidad de enterramiento | = 0.5 m.        |
| Conectores empleados         | = mecánicos.    |

Cálculos:

a) Longitud del conductor; de la figura 5.7, tenemos que:

$$L = 15 + 20 + 51 + 42 + 5 + 9 = 142 \text{ m.}$$

b) Area ocupada por el anillo.

$$a = (51 \times 15) + (5 \times 9) = 810 \text{ m}^2.$$

c) Radio equivalente.

$$r = \sqrt{\frac{a}{\pi}} = \frac{810}{\pi} = 16 \text{ m.}$$

d) Resistencia aproximada.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{5\ 000}{14\ 000} = 0.36 \text{ ohms.}$$

e) Calibre del conductor.

$$A = \frac{I}{\sqrt{\log \left( \frac{T_m - T_a}{324 - T_a} + 1 \right)}} = \frac{14\ 000}{\sqrt{\log \left( \frac{250 - 25}{324 + 25} + 1 \right)}}$$



$$A = 122\ 337 \text{ Circular MIL.}$$

$$A = (122\ 337 \text{ C.M.}) (0.0005067 \text{ mm}^2/\text{C.M.}) = 62 \text{ mm}^2.$$

Corresponde a un conductor de cobre calibre 2/0 AWG, con una sección transversal de  $67.4 \text{ mm}^2$  y  $9.266 \text{ mm}$  de diámetro.

f) Longitud mínima del conductor para el anillo.

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{E}}{116 + 0.17}$$

De acuerdo a datos experimentales, para electrodos en forma de anillo, el producto  $K_m.K_i$  nos da valores de aproximadamente 1.8, por lo que sustituyendo valores en la expresión anterior:

$$L = \frac{(1.8)(3.7)(14\ 000)(0.5)}{116 + 0.17(3\ 000)} = 105 \text{ m.}$$

g) Número de varillas.

$$N_v = 0.6 \sqrt{a} = 0.6 \sqrt{810} = 17$$

De ser necesario se instalaran 17 varillas del tipo copperweld de  $3.05 \text{ m}$ , de longitud y  $19 \text{ mm}$ . de diámetro.

h) Resistencia del anillo; para calcular la resistividad de un electrodo en forma de anillo se emplea la expresión:

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left( \ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{2h} \right)$$

donde:  $D = \text{diámetro del anillo.} = 2(16) = 32 \text{ m.}$

$d = \text{diámetro del cable.} = 0.009266 \text{ m.}$

$h = \text{profundidad de enterramiento} = 0.5 \text{ m.}$

sustituyendo valores:

$$R = \frac{3.76}{2(\pi)^2(32)} \left( \ln \frac{8(32)}{0.009266} + \ln \frac{4(32)}{2(0.5)} \right)$$

$$R = (0.006)(15.084) = 0.09 \text{ ohms.}$$

i) Potenciales de contacto, de paso y de malla.

$$V \text{ contacto} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.17(3\ 000)}{0.5} = 885 \text{ volts.}$$

$$V \text{ paso} = \frac{116 + 0.7 \rho_s}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.7(3\ 000)}{0.5} = 3134 \text{ volts.}$$

$$V \text{ malla} = K_m K_i \frac{\rho I}{L} = (1.8) \frac{3.7(14\ 000)}{105} = 888 \text{ volts.}$$

Como el voltaje de malla resulta mayor que el voltaje de contacto, para dar mayor longitud al conductor enterrado, se instalaran cinco varillas en el anillo y dos conductores transversales de 15 metros cada uno, para la conexión de tableros y equipos, por lo que la longitud total será de:

$$L = 105 + 5(3.05) + 2(15) = 150 \text{ m.}$$

con lo cual tendremos un voltaje de malla de:

$$V \text{ malla} = (1.8) \frac{3.7(14\ 000)}{150} = 622 \text{ volts.}$$

j) Tensión en la periferia del anillo.

$$E_p = K_p K_i \frac{\rho I}{L}$$

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} \right) = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{32+0.5} \right) = 0.328$$

$$K_i = 0.65 + 0.172(4) = 1.338$$

sustituyendo valores tenemos:

$$E_p = (0.328)(1.338) \frac{3.7(14\ 000)}{150} = 152 \text{ volts.}$$

k) Elevación máxima de potencial en el anillo.

$$E = R I = (0.09)(14\ 000) = 1260 \text{ volts.}$$

De lo anterior se tiene que:

|              |                            |        |
|--------------|----------------------------|--------|
| V malla      | = 622 - menor - V contacto | = 885  |
| V periférico | = 152 - menor - V paso     | = 3134 |
| Elev. máxima | = 1260 - menor - V paso    | = 3134 |

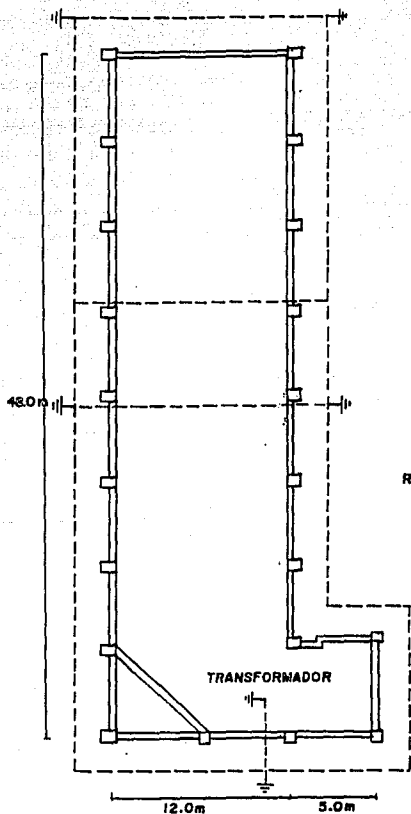
Conclusión.

El anillo será seguro y adoptará la configuración mostrada en la figura 5.8.

A este anillo se podrán conectar los tableros de alumbrado y distribución, los motores y demás equipo que en condiciones normales de operación no conducen corriente.

Para la conexión a tierra del transformador, equipo de computación y pararrayos, se instalarán electrodos individuales y para evitar diferencias de potencial al ocurrir una falla en alguno de éstos, se conectarán firmemente al anillo - éstos electrodos de tierra.

Para una protección eficiente del edificio contra descargas atmosféricas se propone la instalación de dos pararrayos de tipo dipolo, conectados cada uno a un electrodo tipo V invertida, los que se detallan en el capítulo VI, por lo -



ANILLO DE TIERRA CON  
CABLE DE COBRE DES-  
NUDO CAL. 2/0 AWG EN-  
TERRADO A 0.5 m.



ELECTRODO DE TIERRA  
CON VARRILLA. COPPER-  
WELD DE 3.05 m DE  
LONG. Y 19 mm DE Ø.



VARRILLA COPPERWELD

REGISTRO DE MANTENIMIENTO.

FIG. 5.8

ANILLO DE TIERRAS PROPUESTO.

ENEP ARAGON.  
EDIFICIO DE LABORATORIOS  
AREA DE INGENIERIA ELEC-  
TRICA.  
PLANTA BAJA  
ESCALA 1:250  
ACOT. metros

que su instalación quedará como se ilustra en la figura 5.9.

Los cables de bajada de los pararrayos serán de cal. -  
1/0 AWG con aislamientos THW y se protegerán mecánicamente -  
con un tubo conduit de P.V.C. tipo pesado de 3.0 metros de -  
longitud y 10 mm de diámetro, empotrado 20 cm en el terreno.

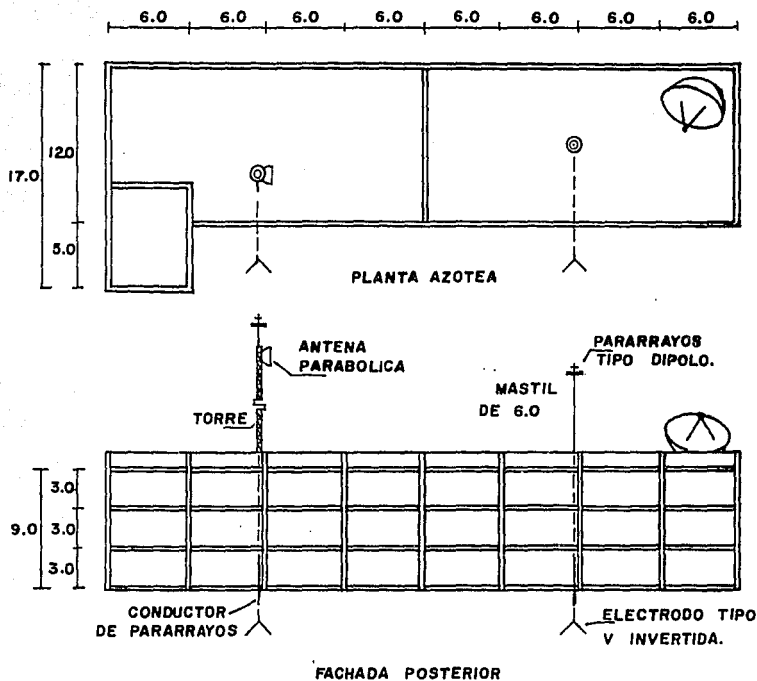


FIG. 5.9  
SISTEMA DE PARARRAYOS.  
PROPUESTO.

## C A P I T U L O VI

### CONEXION A TIERRA DE EQUIPOS INDUSTRIALES

## VI. CONEXION A TIERRA DE EQUIPOS INDUSTRIALES.

### 6.1 IMPORTANCIA DE LA CONEXION A TIERRA DE EQUIPOS INDUSTRIALES.

Los principales objetivos que se persiguen con la conexión a tierra de los equipos se concretan en dar protección contra descargas eléctricas a las personas que operan, utilizan o circulan cerca de estas instalaciones, protegiendo también los elementos que forman la propia instalación.

Una conexión adecuada a tierra facilita la operación de los dispositivos de protección contra sobrecorriente, principalmente en el caso de falla a tierra.

En los sistemas polifásicos de corriente alterna la conexión adecuada del neutro a tierra estabiliza las tensiones del sistema en su ángulo de defasamiento y en su magnitud, evitando variaciones de tensión cuando existen cargas desbalanceadas en las fases.

Un neutro conectado a tierra mantiene fijo el centro de un sistema trifásico auxiliando en cierto modo su balanceo. Existe una analogía curiosa que aunque un poco incierta ayuda a comprender cómo funciona un neutro conectado a



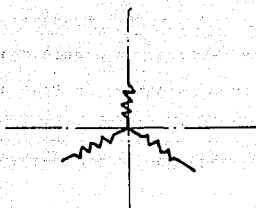


FIG. 6.1

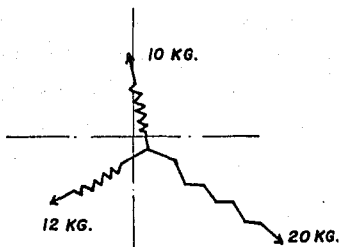


FIG. 6.2

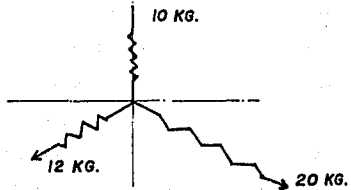


FIG. 6.3

tierra. Se trata de tres resortes iguales unidos en su extremo y formando una Y simétrica condicional a uno de sus ejes, fig. 6.1 Si tres personas de fuerzas distintas tiran de cada uno de los extremos libres de los resortes, el centro de la Y se desplazará hacia la persona que tire más fuerte, figura 6.2. Este es el caso de un neutro aislado en que se ha registrado un desbalanceo.

Ahora supongamos el mismo caso pero con el centro de la Y firmemente anclado a un lugar fijo, lo que sucede ahora es que los resortes se elongarán proporcionalmente a las fuerzas que reciban, pero el centro de la Y no se desplaza hacia ningún lado. Este es el caso de un neutro a tierra en el que se ha registrado un desbalanceo entre las fases, fig. 6.3.

Ahora bien, cuando existe un desbalanceo en la carga de un sistema, es conveniente tener el neutro sólidamente conectado a tierra, pero cuando el desbalanceo es provocado por una falla de alguna línea a tierra, entonces convendrá no tenerlo conectado sólidamente a tierra porque esto provoca una fuerte elevación de la corriente que podría incluso llegar a estar supeditada a la pura reactancia del transformador.

Por esta razón en algunas ocasiones es necesario conectar el neutro a tierra a través de una resistencia o una reactancia.

Para lograr las ventajas totales de conexión a tierra del punto neutro tienen que unirse a tierra todos los puntos neutros del voltaje y todos los posibles puntos de fuerza del sistema.

#### 6.2. EQUIPOS QUE DEBEN CONECTARSE A TIERRA.

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

Para las instalaciones interiores puede colocarse una barra colectora adentro del edificio tendiéndola por toda la periferia del mismo. El material del colector conviene que sea cobre estirado suave o semiduro, ya sea en forma de cable, alambre o barra, que se unirá en dos o más puntos por medio de electrodos de conexión a tierra, además de su interconexión con la estructura del edificio y con la tubería de distribución de agua.

La barra colectora de tierra debe ir colocada en forma de anillo 50 cm abajo del lecho alto de losa terminada, - de ser posible, o debajo de la dala de la estructura y ahogada en el concreto. Todas las conexiones con la barra co - lectora ahogada en la construcción deberán hacerse por me-- dio de soldadura de latón (autógena), aluminio-térmica o por algún proceso similar. Por razones de orden mecánico, el - conductor colector para conexión a tierra no debe ser menor del calibre 2/0 AWG, pero las recomendaciones estipulan de barras, cable o alambre de cobre calibre 4/0 AWG para insta - laciones chicas, y de 500 a 700 MCM en instalaciones gran - des. La capacidad conductiva de corriente de la barra colec - tora de conexión a tierra, no debe ser menor del 25% de la corriente máxima de régimen en servicio continuo de cual - quiera de los elementos de carga de la planta o del edifi - cio (requisito del National Electric Code).

#### Red de tierra de la subestación.

por ser la subestación el local donde se maneja la ma - yor cantidad de energía eléctrica de toda la instalación - con el equipo más peligroso y costoso, se requiere que los trabajos se realicen cuidando todos los detalles de la cons - trucción. Lo aquí expresado está de acuerdo a lo establecido, en las Normas Nacionales vigente, de la Secretaría de Co

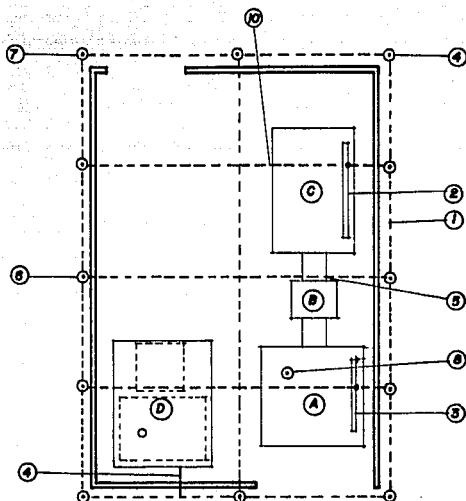


FIG. 6.4

- (A) SUBESTACION BAJA TENSION.
- (B) TRANSFORMADOR.
- (C) SUBESTACION ALTA TENSION.
- (D) PLANTA DE EMERGENCIA.
- 1. MALLA DE TIERRA (CABLE DE COBRE)
- 2. BARRA DE TIERRA EN ALTA TENSION
- 3. BARRA DE TIERRA EN BAJA TENSION.
- 4. CONEXION A TIERRA DE PLANTA DE EMERGENCIA.
- 5. CONEXION A TIERRA DE TRANSFORMADOR.
- 6. CONECTOR DE DERIVACION TIPO T.
- 7. VARILLA COPPERWELD.
- 8. VARILLA DE APARTARRAYOS.
- 9. CONECTOR DE CABLE A VARILLA.
- 10. CONEXION DE GABINETE.

RED DE TIERRA PARA UNA SUBESTACION.

mercio y Fomento Industrial y a las internacionales N.E.C.-  
de los EE.UU.

Cuando se carezca de un proyecto específico se reco -  
mienda que un cable continuo forme el perímetro exterior, -  
de manera que encierre toda el área en que se encuentra el  
equipo de la subestación y forme una malla constituida por  
cables colocados paralela y perpendicularmente con un espa -  
ciamiento razonable (por ejemplo formando rectángulos de 3-  
por 6 metros). En lo que sea posible, los cables que forman  
la malla deben colocarse a lo largo de las hileras de es -  
tructuras o equipo, para facilitar la conexión a los mis -  
mos, fig. 6.4.

Se recomienda que los conductores de la malla sean de  
cobre, con calibre mínimo de 4/0 AWG para subestaciones pe -  
queñas y de 500 MCM para subestaciones grandes y que los -  
conductores de puesta a tierra del equipo no sean de un ca -  
libre menor al 2 AWG.

La cerca metálica colocada alrededor de una subesta -  
ción de intemperie debe conectarse a tierra. Si la cerca se  
encuentra en la inmediata cercanía de la subestación y el -  
cable colector de unión a tierra tienen menos de un ohm, la  
cerca puede conectarse a este cable a intervalos de 8 me -

tros mediante cables de calibre no menor de 1/0 AWG. Si la cerca esta alejada de la subestación o si la resistencia del cable colector es mayor de 1 ohm, la cerca no deberá conectarse a este cable. En este caso se instalará una serie de varillas de copperveld a lo largo de la cerca, con un espaciamiento máximo de 8.0 metros. 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 calibre 1/0 AWG como mínimo.

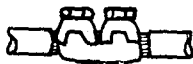
Al conectar el punto neutro de un transformador al sistema de tierra, la conexión se ejecutará con un conductor equivalente a los hilos de las fases, aunque por ningún concepto se podrán utilizar calibres menores a 1/0 AWG. La conexión a tierra tendrá que hacerse en dos puntos separados.

Todos los conductores o barras colectores que queden enterrados deberán tener una razonable flojedad.

Debido a la necesidad de un punto de fusión alto no se permite soldadura de estaño en ninguna de sus conexiones o uniones. Estas uniones o conexiones deberán realizarse de preferencia por medio de moldes especiales para que sean fundidos, podrán usarse también conectores mecánicos ya sea



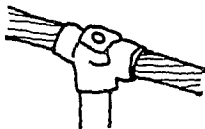
EMPALME FUNDIDO  
CABLE A CABLE.



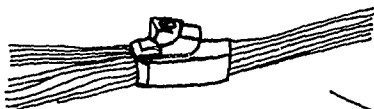
CONECTOR MECANICO ATORHILLABLE.



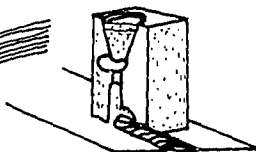
EMPALME CABLE A CABLE  
A PRESION.



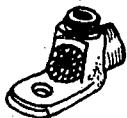
CONECTOR CABLE A VARILLA  
(ELEMENTO TERMOFUNDENTE)



CONEXION CON DERIVACION  
PARALELA DE CABLES HORIZONTALES.



MOLDE PARA CONECTOR  
TERMOFUNDIDO.



ZAPATA TERMINAL TIPO PALETA.



CONECTOR CABLE A CABLE.

CONECTORES.

FIG. 6.5



atornillados o de compresión; como última solución pueden realizarse soldaduras con autógena cuidando de no dañar los conductores de conexión a tierra, fig. 6.5.

#### Conexión a tierra de estructuras metálicas.

Todos los miembros estructurales de metal tienen que conectarse con un cable unido a tierra y que puede servir también para la conexión a tierra de otros elementos como motores y generadores de gran tamaño. fig. 6.6.

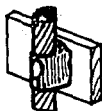
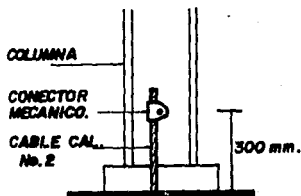
Las estructuras de acero de edificios se conectarán a tierra en la base de cada una de las columnas que forman esquina, y en las intermedias a distancias no mayores de 18 mts. Las derivaciones de unión serán de cable de cobre de un calibre no menor al 2/0 AWG. Las conexiones ocultas deben ejecutarse por medio de soldadura de latón, aluminotérmica o por otro proceso de consistencia equivalente y las conexiones a la estructura se harán con estos mismos procedimientos o por conexiones a presión, sin soldadura.

#### Conexión a tierra de columnas de concreto armado.

En este caso, la conexión del cable de tierra se hace directamente al armado de la columna, mediante una conexión



**CABLES EN COLUMNA METALICA.**

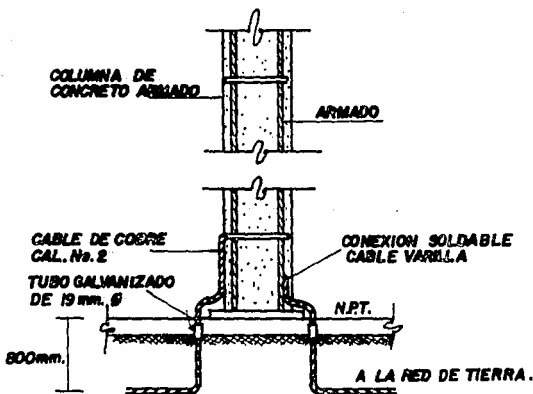


**VISTA.**



**FIG. 6.6**

**CONECTORES EN COLUMNA METALICA.**



**FIG. 6.7**

**CONEXION A TIERRA DE COLUMNAS DE CONCRETO ARMADO.**

soldable cable-varilla, quedando dicha conexión bajo el recubrimiento o acabado de la columna. El cable se protegerá con tubo galvanizado al pasar de superficial a enterrado.

El tipo de conexión con la red de tierra deberá traer un saliente de su armado para hacer la conexión a tierra, - según fig. 6.7.

#### Conexión a tierra de motores diversos.

Todas las armazones de los motores deben conectarse a tierra mediante un conductor equipado con una terminal de - cobre unida con soldadura de latón o con un conector de presión confiable, sujeto al motor por abajo de la cabeza de - uno de los tornillos de la mascara, fig. 6.8, o por un tornillos de la mascara, fig. 6.3, o por un tornillo especial- de 5/16 plg. (8mm) de diámetro mínimo, atornillado en al - gún lugar de la carcasa del motor. El otro extremo del conductor de tierra se conecta por medio de abrazaderas o terminales adecuadas al elemento de unión a tierra más próximo.

Las derivaciones hechas del cable colector de tierra- hacia motores o generadores grandes pueden conectarse directamente en la placa de la base.

El calibre de los conductores para unión puede elegirse de acuerdo a la tabla 6.1.

#### Conexión a tierra de ductos para conductores eléctricos.

Todo tipo de elementos utilizados para proteger y conducir las líneas eléctricas deben conectarse a tierra, tales como el caso de: gabinetes de conexión, tableros, cajas de derivación, cajas de aparatos de control, ductos de las líneas de servicio, tuberías conduit, acoplamientos, accesorios para tubos y ductos, cable armado, forro de plomo para cable y enrejados.

En aquellas instalaciones donde alguna pieza metálica que encierra conductores eléctricos es utilizada como parte de la conexión a tierra con el objeto de proteger el equipo, debe asegurarse la continuidad eléctrica del total de las acciones de dicha pieza.

En las instalaciones a base de tubo conduit, cable armado o ductos metálicos, la conexión a tierra debe ejecutarse lo más cerca posible del lugar en donde los conductores reciben el suministro de energía en el sistema de ductos o tubería.

Tabla 6.1

CALIBRE MINIMO DE CONDUCTORES PARA ATERRIZARJE DE  
EQUIPO ELECTRICO Y CHAROLAS

| Régimen de disparo del dispositivo de sobrecarga colocado al frente del equipo eléctrico. | Conductor de cobre cal. | Conductor de aluminio cal. |
|---|-------------------------|----------------------------|
| 15  | 14                      | 12                         |
| 20  | 12                      | 10                         |
| 30  | 10                      | 8                          |
| 40  | 10                      | 8                          |
| 60  | 10                      | 8                          |
| 100   | 8                       | 6                          |
| 200   | 6                       | 4                          |
| 400   | 2                       | 1/0                        |
| 600   | 1/0                     | 2/0                        |
| 800   | 1/0                     | 3/0                        |
| 1000  | 2/0                     | 4/0                        |
| 1200  | 3/0                     | 250 MCM                    |
| 1600  | 4/0                     | 350 MCM                    |
| 2000  | 250 MCM                 | 400 MCM                    |
| 2500  | 350 MCM                 | 600 MCM                    |
| 3000  | 400 MCM                 | 600 MCM                    |

Basado en el NEC de 1973.

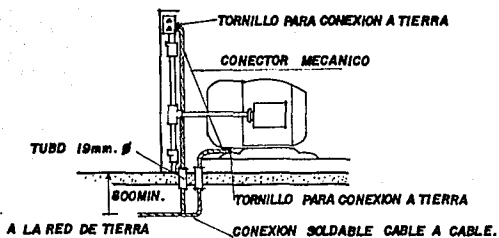


FIG. 6.8

CONEXION A TIERRA DE MOTORES Y EQUIPO ELECTRICO.

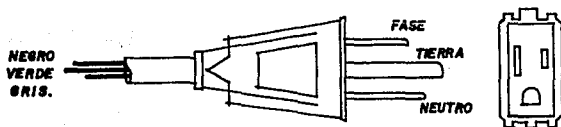


FIG. 6.9

CONTACTO Y CLAVIJA PARA CONEXION A TIERRA DE EQUIPO PORTATIL.

El tamaño de los conductores de unión a tierra para tubo conduit, cable armado y otro tipo de ductos o recubrimientos metálicos de conductores para la alimentación de equipo eléctrico no debe ser menor a lo indicado en la tabla 6.1

Todas las conexiones a tierra deben estar bien apretadas y tener superficies perfectamente limpias y todos los materiales aislantes de recubrimiento de protección, como esmaltes, óxido, incrustaciones, etc., deben ser removidos de los puntos en donde se conecta a tierra. Normalmente se utilizan conectores a presión, para ejecutar las conexiones sin soldadura.

#### Conexión a tierra de equipo portátil.

El equipo eléctrico portátil es aquel que puede transportarse de un sitio a otro para su operación y que se alimenta por medio de cable flexible. El cable puede estar conectado en forma permanente, o bien puede estar dotado de una clavija de conexión en un extremo o por otro dispositivo de desconexión instantáneo.

El equipo portátil que trabaja con voltajes de 600 volts o menos, se conectará a tierra mediante un cable con-

capacidad conductiva de corriente igual a la del mayor de los conductores del aparato. Si el cable no está conectado permanentemente en cada uno de los extremos, la conexión a tierra tendrá que hacerse por medio de contactos separados que se colocarán en la clavija y en el enchufe de toma de fuerza.

El equipo portátil que opera con voltajes arriba de 600 volts, debe estar dotado con cable para su conexión fija en ambos extremos de la línea, en estos casos se debe incluir un conductor que conecte a tierra las carcazas y estructuras y debe tener una capacidad de conducción de corriente equivalente a la del conductor de mayor calibre de la línea. el contacto de tierra de una clavija de conexión tiene que diseñarse en tal forma que nunca pueda enchufarse en alguno de los polos del contacto. Al enchufar la clavija en el contacto, la uñeta que corresponde al hilo de tierra debe hacer contacto antes que lo hagan los otros con las líneas de suministro, fig. 6.9.

#### Conexión de tanques y recipientes a la red de tierras.

Para ésto, el extremo superior del cable se conecta directamente al cuerpo del tanque o soporte del recipiente, mediante una conexión soldable cable-placa (es conveniente-



saber el contenido del recipiente antes de hacer la conexión), fig. 6.10. El cable se llevará por la base o soporte del tanque o recipiente, sujetándolo con abrazaderas adecuadas.

#### Conexión a tierra de autos tanque y carros tanque.

Las operaciones más peligrosas en el manejo de fluidos inflamables, es seguramente su carga y descarga. El accidente más frecuentemente se provoca por la descarga de electricidad estática acumulada en el cuerpo metálico del vehículo. Su conexión a tierra antes de comenzar las operaciones reduce el riesgo casi a la nada.

Los vehículos tanque se dotan de un cable apropiado, normalmente calibre número 2 AWG, perfectamente soldado al tanque con una pinza o una zapata para la conexión a tierra. Algunos llévan sólo una zapata y la estación de carga y descarga cuenta con el cable adecuado.

Las plataformas de carga y descarga se proveen de una barra de tierra entre cada dos carriles longitudinalmente.

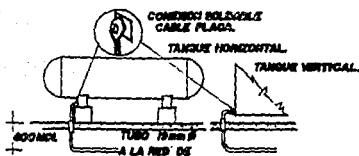


FIG. 6.10  
CONEXION A TIERRA DE  
TANQUES.

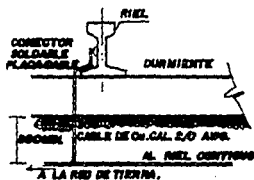


FIG. 6.11  
CONEXION A TIERRA DE VIAS DE EFC C

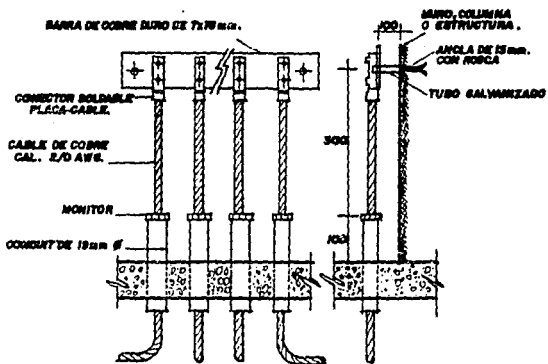


FIG. 6.12  
BARRA TERMINAL PARA CONEXION A  
TIERRA.

### Conexión de vías de ferrocarril a la red de tierras.

Los rieles de las vías de ferrocarril se conectan a la red de tierras con un cable conectado al patin de cada riel mediante una conexión soldable cable-placa. El otro extremo se llevará a la red de tierras. La fig. 6.11 muestra lo correspondiente a este caso.

Los tramos de riel deben ser conectados entre sí mediante cable de cobre desnudo similar al utilizado en la red de tierra, haciendo la conexión con el mismo sistema soldable cable-placa, en los dos extremos.

Se recomienda que el valor de la resistencia de contacto a tierra del sistema no exceda de 5 ohms.

### Conexión a tierra de apartarrayos autoválvulares.

El objetivo de esta instalación es proteger el equipo contra sobretensiones debidas a descargas atmosféricas y otras fallas que puedan desestabilizar al sistema. Esto se logra construyendo un camino de baja impedancia y fácil para su disipación a tierra.

Los apartarrayos autoválvulares forman parte de las -

subestaciones tipo compacto y se instalan siempre antes del interruptor principal de alta tensión.

Para su conexión a tierra se unen con cable de cobre desnudo calibre #2 AWG formando una tira, para salir a un solo conductor el cual se conectará directamente a un electrodo de tierra del tipo de varilla copperweld, la que se instalará independientemente, sin conexión a la red de tierra. Los conductores de los apartarrayos al electrodo deberán tener el mínimo de curvas posible y las que se ejecuten serán lo más abiertas que se pueda.

#### Conexión a tierra de tomas de corriente.

Todos los contactos con terminal para conexión a tierra que estén alimentados por tubería y pertenezcan al mismo tablero, serán interconectados en sus terminales de tierra con un conductor de cobre forrado o desnudo calibre 12-AWG como mínimo, el cual se conectará a la barra de tierra del tablero al que pertenecen.

En cada tablero se instalará una barra de cobre electrolítico de dimensiones similares a la de la barra neutra, para conectar los conductores de tierra; dicha barra se fija a la caja del tablero mediante tornillos. La barra de co

bre tendrá los tornillos necesarios para conectar los hilos de tierra.

### 6.3 PROTECCION CONTRA ELECTRICIDAD ESTATICA.

La acumulación de cargas de electricidad estática en equipos, materiales e inclusive en el personal mismo, constituye un serio peligro en la industria. Una descarga de electricidad estática en la inmediata cercanía de materiales inflamables o explosivos, o en ambientes con estas características, puede dar origen a incendios o explosiones.

En todas las instalaciones deben practicarse exámenes minuciosos para determinar si las cargas estáticas pueden significar un peligro en potencia, ya que la simple conexión a tierra no es necesariamente la solución al problema.

#### Causas de la formación de cargas estáticas.

El generarse electricidad estática es un fenómeno de superficie, asociado con el contacto y la separación de superficies disímiles. Básicamente una carga estática es originada por la diferencia de potencial entre dos cuerpos o sustancias.

Se dice que el potencial de un cuerpo cargado se puede incrementar de un volt hasta más de mil volts por la separación.

El contacto de superficies, la separación y el movimiento que involucra a materiales que son malos conductores, son cualidades intrínsecas de muchos procesos industriales tales como: el flujo de líquidos de alta resistencia, los productos del petróleo, la filtración de los líquidos, el movimiento de polvo en las operaciones de esmerilado, la mezcla, el tamizado, la transferencia neumática de polvos, el movimiento de la gente o de vehículos que atraviesan los aislados, y el movimiento de las bandas de transmisión o de otras formas de materiales laminados sobre poleas y rodillos. En estos y otros procesos similares puede ocurrir, y de hecho ocurre, la generación de electricidad estática. La tabla 6.2 muestra los valores de potencial que se pueden esperar en algunos procesos.

Tabla 6.2

RANGO DE VOLTAJES ESTATICOS EN ALGUNOS PROCESOS.

| <u>Tipo de equipo</u>         | <u>Rango de voltaje observado (Kv.)</u> |
|-------------------------------|---|
| Cintas en movimiento (bandas) | 60 - 100                                |
| Manufacturas manuales         | 15 - 80                                 |
| Máquinas de papel             | 5 - 100                                 |
| Carros tanque                 | arriba de 25                            |
| Bandas de grano               | arriba de 45                            |

La electricidad estática, por lo general es un fenómeno de baja corriente eléctrica y de alto voltaje. El riesgo de fuego se presenta cuando la carga generada se acumula sobre un objeto y aumenta su potencial a un valor mayor al de ruptura de la atmósfera circundante, causando esto una chispa eléctrica.

Condiciones que propician la generación de cargas estáticas.

El proceso de generación de electricidad estática y el valor de ella dependen generalmente de las siguientes variables:

### Características de los materiales.

A diferencia de un conductor, un no-conductor no es intrínsecamente una superficie con igual potencial, y la densidad de la carga eléctrica puede variar a través del mismo, los cuerpos conductores aislados de tierra pueden aumentar con rapidez potenciales de 10 a 20 Kv. y aún a potenciales de más de 50 Kv.

### Velocidad de separación.

Si la velocidad de separación de los materiales con cargas opuestas se aumenta, la carga que almacena cada material se incrementa lo que provoca un aumento en la diferencia de potencial entre ellos.

### Area de contacto.

El área de contacto entre materiales es directamente proporcional al grado de electrificación, ya que a mayor área de contacto, será mayor el grado de transmisión de iones positivos y negativos de un material a otro.

### Condiciones atmosféricas.

La temperatura y la humedad son factores que afectan



el comportamiento de las cargas eléctricas que pueden obtener los materiales.

A mayor humedad se tiene una menor cantidad de carga acumulada y a menor cantidad de calor, menor será la acumulación de carga.

Procesos que generan electricidad estática.

- 1.- Flujo en tuberías.
- 2.- Filtros y válvulas.
- 3.- Mezclas inmiscibles.
- 4.- Asentamiento del agua.
- 5.- Caída libre de los líquidos.
- 6.- Mezcla y agitación de líquidos.
- 7.- Polvos comunes y otros polvos.
- 8.- Explosivos.
- 9.- Gases.

Las industrias que más expuestas se encuentran a la generación de cargas electrostáticas son:

- 1.- La aviación..
- 2.- La industria del carbón.
- 3.- Las harineras y manejadoras de granos.

- 4.- Refinerías y petroquímicas.
- 5.- La industria de la pintura.
- 6.- Las imprentas y papelerías.
- 7.- La industria de la pólvora.
- 8.- La industria del hule.
- 9.- La industria textil.
- 10.- Hospitales, etc.

#### Equipos detectores de cargas electrostáticas.

Existen diferentes equipos utilizados para detectar y evaluar los potenciales presentes en sustancias y equipos.- Algunos de ellos.

- 1.- Electroscópio.
- 2.- Voltímetro electrostático
- 3.- Tubo de neón.
- 4.- Tubo de vacío-vóltmetro.
- 5.- Detector de tubo electrónico.
- 6.- Indicador de cargas estáticas.

#### Métodos y elementos de protección.

Una persona aislada del suelo por medio de zapatos o pisos no conductores, puede cargarse electrostáticamente y-

alcanzar potenciales de 10 a 20 Kv. Se puede cargar y generar electricidad estática sobre sí misma; por el movimiento en relación con sus ropas, por el proceso de participación de cargas cuando toma muestras de un producto que está cargado electrostáticamente, por inducción electrostática al detenerse cerca de un objeto cargado.

Las personas normalmente son buenos conductores eléctricos y se puede evitar el acumular niveles peligrosos de carga, empleando calzado de baja resistencia eléctrica o caminando sobre pisos de igual condición. El calzado y pisos antiestáticos tienden a evitar que se acumule una carga en la persona y darle protección contra fallas en la línea de suministro eléctrico, fig. 6.13.

Para proteger vidas humanas, equipos, materiales y edificios, de las cargas electrostáticas, no basta solo con realizar conexiones a tierra de todos y cada uno de los equipos que generan estas cargas, puesto que los materiales son en muchos casos aislantes y presentan un alto valor de resistividad, por lo que las cargas no serán condu-

cidas a tierra. Es por esto que se recomienda seguir algunos de los siguientes métodos para reducir o eliminar la acumulación de cargas electrostáticas.

#### Ionización atmosférica.

La carga electrostática se puede descargar del cuerpo incrementando la conductividad de la atmósfera circundante por medio de ionización. El aire se puede ionizar por medio de una descarga eléctrica de alto voltaje o por el uso de isótopos radioactivos, debe sin embargo, cuidarse la seguridad del personal.

Se han utilizado con éxito varias formas de eliminadores electrostáticos basados en la ionización eléctrica, empleados en la industria textil y del papel. Sólo se pueden emplear cuando puedan tomarse precauciones necesarias contra riesgo de radioactividad.

### Control de humedad:

Donde la humedad con valores entre 60% y 70%, o mayores de humedad relativa, no afecta los materiales y equipos, ésta se puede emplear para producir uno de los mejores caminos para controlar las cargas electrostáticas. El vapor inyectado en el área es especialmente necesario donde las cargas electrostáticas son acumulables, es tal vez el mejor camino para suplir la humidificación. Donde los procesos son afectados adversamente por la humedad, el uso de aire acondicionado puede ser un buen medio de control.

### Colector electrostático:

Esta forma de control consiste en peines; rastrillos o barras metálicas de oropel conectados a tierra y que están en contacto directo con los materiales en proceso, empleado mayormente en la industria del grano y lugares de agitación de sustancias.

### Piso conductivo;

El uso de pisos con alto grado de conductividad o de muy baja resistencia, el uso de zapatos conductivos por los operadores, reduce gradualmente el peligro de chisporroteos, fig. 6.13.

### Uso de materiales no metálicos;

Muchos materiales no metálicos, como los plásticos, el hule y la fibra de vidrio, son malos conductores de electricidad; éstos se cargan electrostáticamente y retienen la carga por un tiempo. Los procedimientos normales para conectar a tierra no evitan que se acumulen cargas en los materiales aislantes.

Las precauciones comunes consisten en el empleo de materiales no metálicos que se hayan convertido en conductores eléctricos por medio de aditivos. Se pueden emplear métodos normales de conexión a tierra para evitar que la electricidad estática se acumule en especies de conductores de materiales no metálicos, fig. 6.14. Lo mismo ocurre con el calzado y los pisos, por lo que es necesario verificar periódicamente y a intervalos razonables la resistencia de éstos durante todo el tiempo que se usen.

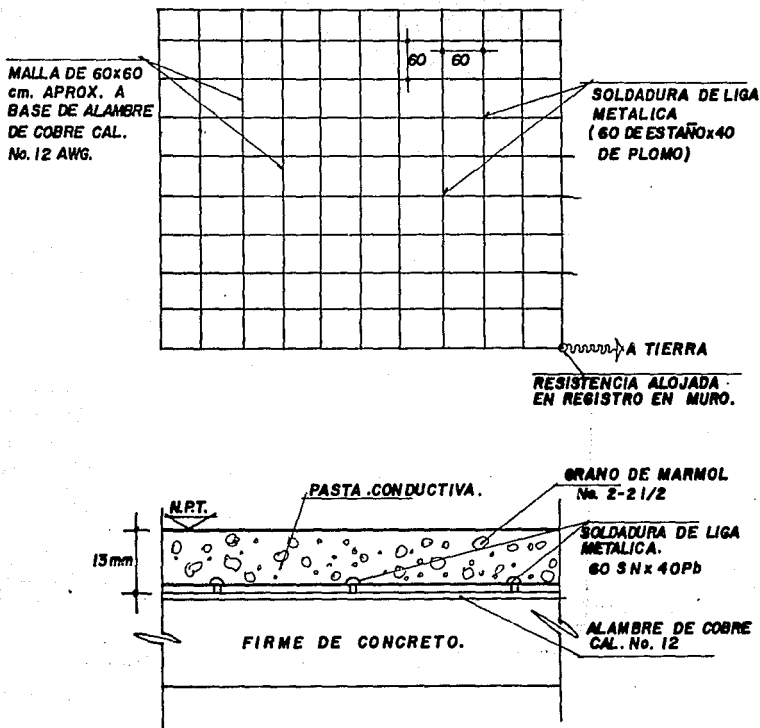


FIG. 6.13

DETALLE DE CONEXION A TIERRA DE  
GRANITO CONDUCTIVO.

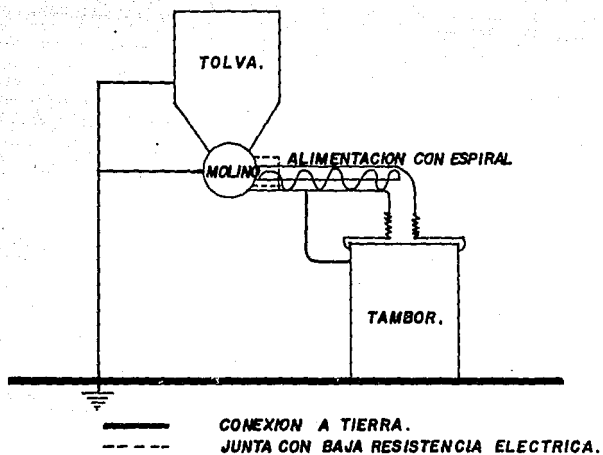


FIG. 6.14

DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL SISTEMA TIPICO DE CONEXION A TIERRA PARA UNA UNIDAD PARA MOLIENDA.



El recubrimiento o impregnación de ciertos materiales, particularmente bandas, es un medio efectivo para el control de la electricidad estática en muchos materiales.

#### 6.4 PARARRAYOS.

El rayo, también llamado descarga atmosférica, es una descarga eléctrica de origen estático que se ha concentrado en una nube, se manifiesta en forma luminosa como un relámpago y en forma sonora como trueno; es un suceso aleatorio que puede ocurrir durante una tormenta o bien, no ocurre cuando la carga eléctrica acumulada en la nube, no es suficiente para producirlo.

No todos los lugares tienen la misma probabilidad de que ocurra descarga, esta probabilidad se ha acentuado en los mapas de nivel isoceraúnico, que muestran la cantidad de descargas atmosféricas que suceden en un área determinada durante un cierto lapso de tiempo.

Según algunas estadísticas, el rayo tiene una ocurrencia promedio de 100 veces por segundo sobre la faz de la tierra y aunque se le conoce más por sus efectos dañinos, son más los beneficios que proporciona ya que las descargas atmosféricas son el principal abastecedor de nitrógeno pa-

ra la tierra y el rayo lo inyecta directamente. Según Peter sen W., también se forma ozono alrededor del canal del rayo el cual protege a la tierra de los rayos ultravioleta. Su efecto dañino a personas y a cosas se presenta en forma térmica ( $W = RI^2$ ) y en forma dinámica (campo magnético).

La energía liberada por un rayo no es elevada, sin embargo, al ser liberada en un tiempo muy corto (100 a 120-microsegundos) la potencia puesta en juego alcanza valores del orden de los miles de kilovatios, por lo que las consecuencias pueden ser de gran consideración.

El rayo que impacta en un objeto, produce efectos de naturaleza variada y a menudo caprichosa; los cuerpos no conductores, se rompen a menudo por ejemplo los árboles, mientras que los conductores se funden más o menos completamente con descargas de poca duración pero de alta intensidad.

La descarga de un rayo a través de un material buen conductor de energía y de sección suficiente, no desarrolla cantidades apreciables de calor, por el contrario, en materiales malos conductores atraviesa materiales con elevado contenido de agua, la elevada cantidad de calor generado provoca la evaporación instantánea del agua contenida, la cual se evapora o se disocia en sus elementos provocando un

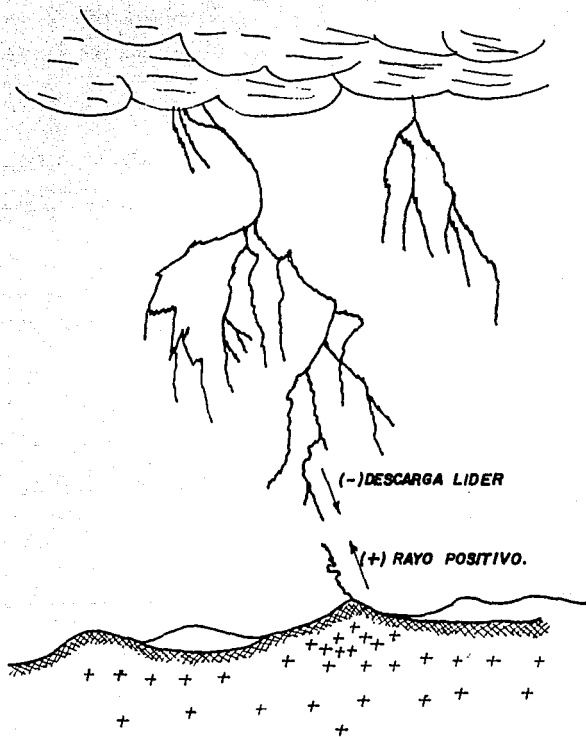


FIG. 6.15

INICIO DE UNA DESCARGA ATMOSFERICA.

fenómeno de explosión, como se ha observado en árboles, postes de madera y muros húmedos que son impactados por un rayo.

El campo magnético que se forma puede deformar estructuras y ventanas metálicas, además, el conductor de cable sufre una expansión por el campo que se forma entre hilo e hilo del cable.

#### Características promedio del rayo.

Según datos tomados del folleto de pararrayos de Electrostática Parres S.A., la velocidad que tiene un rayo en la atmósfera es de alrededor de 1 000 km/seg., en el pararrayos de 300,000 km/seg. y en el electrodo y la tierra su velocidad es inversamente proporcional a la resistencia a tierra.

El tiempo que dura en la atmósfera es de alrededor de 0.1 milisegundo, en el pararrayos de 50 microsegundos y en el electrodo y la tierra es directamente proporcional a la resistencia a tierra.

La cantidad de corriente que tiene un rayo es del orden de los kiloamperes, con un rango que abarca desde las -

decenas hasta las centenas y una diferencia de potencial de 100 a 600 kilovolts, según valores medidos en las líneas y subestaciones eléctricas.

La longitud de un rayo puede ser desde los 300 metros hasta 160 kilómetros, dato de mediciones hechas en los Estados Unidos de Norteamérica.

Dadas las condiciones anteriores, los pararrayos son pues, el resultado de una investigación de carácter probabilístico y sujetos por consiguiente a cierto grado de seguridad.

En el año 1760 Benjamín Franklin, a quien se le atribuye el invento del pararrayo, colocó en un edificio de Filadelfia su pararrayos, el cual días después fue impactado por un rayo sin causarle daño. Con esto se pensó que el hombre había dicho su última palabra para protegerse de este fenómeno, pero la realidad es que aún hoy, la ciencia sigue buscando una protección más eficaz contra el rayo.

#### Propósito de un sistema de pararrayos.

- a.- recibir seguramente la descarga, no la evita.
- b.- conducir seguramente la descarga a tierra.

c.- disipar la energía de la descarga en el terreno.

#### Elementos básicos de un sistema de pararrayos.

a.- Receptor;

Colocado en la parte más alta del edificio, puede estar constituido por puntas metálicas o conductores dispuestos según la geometría de la estructura.

b.- Conducto;

Formado por dos o más conductores que comunican el pararrayos con el elemento dispersor

c.- Dispersor;

Electrodo de tierra.

#### Clasificación de los pararrayos.

Activos:

Tratan de facilitar el camino del rayo positivo provocando un camino de baja resistencia, actúan con el gradiente electrostático de la atmósfera descargando el lugar donde está instalado, pertenecen a este grupo el pararrayos radioactivo, el de efecto de corona y el EP-D dipolo, entre otros.

## Pasivos:

Descargan el terreno donde estan instalados únicamente por efecto de puntas, esperan el rayo para disiparlo a tierra por lo que tienen mayor probabilidad de impacto por rayo, por ejemplo el pararrayos Franklin, el de jaula, el de Melsens y el telepararrayos.

### Pararrayos Franklin.

Formado por una barra metálica, cilíndrica, de tres metros de longitud y diámetro de 13 milímetros. El receptor colocado verticalmente termina en punta y se conecta a tierra mediante un conductor eléctrico y un electrodo disipador.

La eficiencia de este tipo de pararrayos disminuye con la altura, el ángulo del cono de protección que genera es de 45 grados hasta 18 metros de altura, pero conforme aumenta, actualmente su uso desaparece.

### Pararrayos de jaula.

Un edificio con revestimiento exterior completamente metálico y conectado firmemente a tierra, queda protegido contra descargas atmosféricas, otra forma es subsistir la

cubierta por una malla o red de conductores, por razones económicas la red no puede ser muy cerrada, además de que afecta la estética del edificio.

#### Pararrayos de Melsens.

Formado por una jaula de conductores (jaula de Faraday), en la parte superior de la construcción en la cual se dispersan numerosas puntas reunidas en un haz sobre una barra. Este es el sistema más común en México y esta basado en las Normas de NFPA y UL de Norteamérica, la gran cantidad de puntas, colocadas cada 3 a 6 metros, lo hacen poco económico, figs. 6.16 y 6.17.

Otro inconveniente en que la sujeción utilizada es por medio de grapas de presión y el cable conductor por efecto magnético o térmico, al conducir la energía de un rayo, sufre expansión provocando que el contacto entre grapa y conductor ya no sea tan firme, aumentando la impedancia del sistema, sobretodo en la reflexión de la onda y en las descargas sucesivas.

#### Telepararrayos.

Especie de hilo de guarda utilizado para protección -



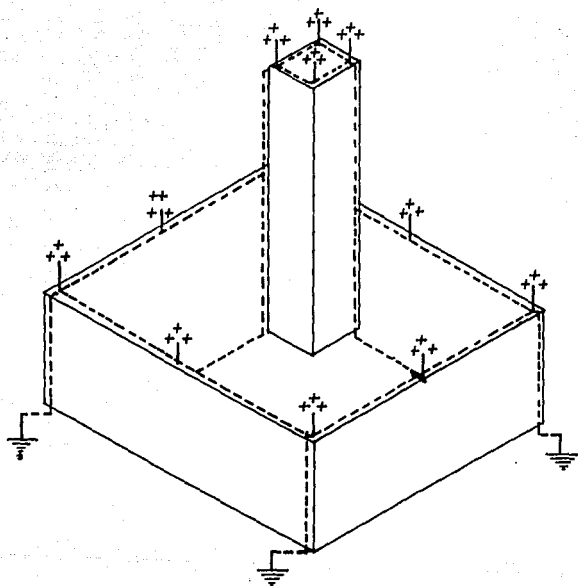


FIG. 6.16  
SISTEMA FARADAY.

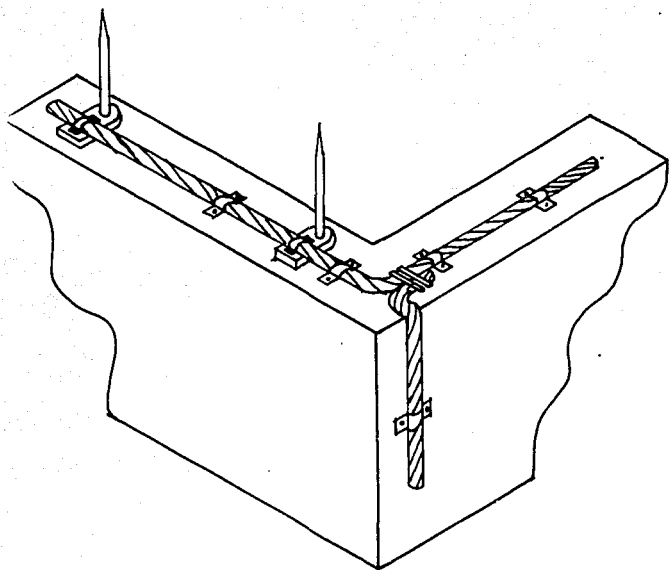


FIG. 6.17

PARARAYOS MELSENS.

de construcciones de poca altura y donde es posible suspender el conductor en la parte superior y cuando es difícil - colocar puntas sobre la construcción (polvorines). Su ángulo de protección se considera de 30 grados y después de los 18 metros de altura disminuye a 20 grados.

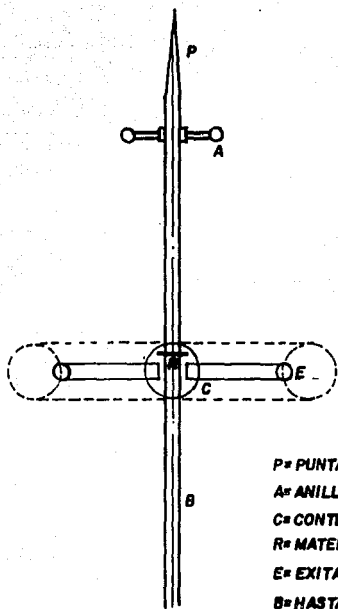
#### Pararrayos radioactivos.

Aplica material radioactivo, como el bromuro de radio para provocar una excitación artificial de la atmósfera y - una producción de iones con fines de protección contra los rayos, fig. 6.18.

Su función específica es la producción de un elevado número de iones y dirigirlos hacia arriba, evitando que se acumule carga en el terreno donde esta instalado con el fin de evitar el rayo positivo o la atracción del rayo negativo. Su uso fue prohibido en México por la Secretaría de Salud y Asistencia en 1968.

#### Pararrayos de efecto de corona.

Formado por un anillo equipotencial o acelerador atmosférico de sección recta en su parte interna, alrededor - de su núcleo, el cual suma el efecto del anillo equipoten -



**P= PUNTA DEL PARARRAYOS**  
**A= ANILLO DEFLECTOR.**  
**C= CONTENEDOR DE MATERIA RADIOACTIVO.**  
**R= MATERIAL RADIO ACTIVO.**  
**E= EXITADOR ATMOSFERICO.**  
**B= HASTA CENTRAL.**

**FIG. 618**  
**PARARRAYOS RADIOACTIVO**  
**TIPO DIPOLO.**

cial el campo electromagnético generado no es circular siendo mayor en la parte interna, logrando con ello mayor eficiencia en la emisión de iones cuando aumenta el gradiente electrostático de la atmósfera, creando un campo eléctrico en la dirección de la punta del parrarayos, logrando con esto guiar el rayo positivo que brota de la tierra.

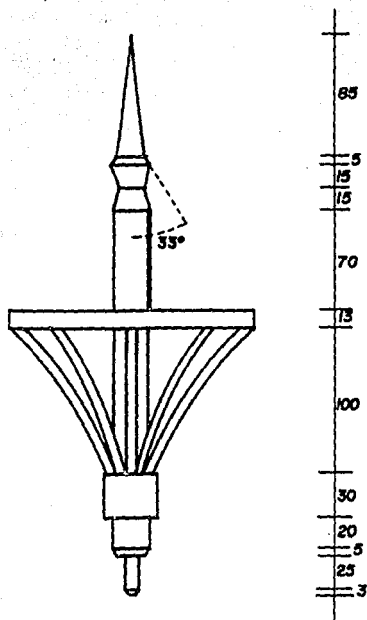
El ángulo de protección generado por el anillo equipotencial es de 60 grados, fig. 6.19.

Este tipo de parrarayos se puede utilizar solo o en combinación con la jaula de Faraday, como el Melsens, con una separación entre puntas de 30 metros, lo que ayuda a -- descargar en forma continua la jaula.

#### Pararrayos EP-D tipo dipolo.

Construido en cobre electrolítico aleación 110 e integrado por una barra de descarga de 16 milímetros de diámetro, un anillo equipotencial de 9 milímetros de diámetro, - excitador toroidal de 60 y 300 milímetros de diámetro, aislamiento en contenedor eléctrico de teflón y/o vidrio de 50 - milímetros de diámetro y 3.6 metros de longitud, fig. 6.20.

Según su fabricante, tiene un ángulo de protección de



ACOTACIONES EN mm.

FIG. 6.19

PARARRAYOS DE EFECTO CORONA.

71 grados, equivalente a un cono de protección cuyo radio es tres veces la altura de colocación del pararrayos, su corriente máxima de diseño es de 60,000 amperes.

Este pararrayos concentra el gradiente de potencial existente en la atmósfera por medio de su toroide exitador, que se descarga constantemente al potencial circundante definiendo de esa forma la incidencia sobre la punta de la barra conductora. El campo eléctrico entre el arillo y el toroide exitador permite regular la dirección de los iones existentes entre ellos y los originados por la radiación es tática natural, incrementando el canal original de ionización y por lo tanto el radio de alcance del pararrayos.

#### Dimensiones de los conductores.

El conductor de enlace entre el pararrayos y el electrodo de tierra debe tener las dimensiones adecuadas para soportar temperaturas que no excedan los 300 grados centígrados. Se tiene la ventaja de que el tiempo de descarga es del orden de los microsegundos, con lo que la temperatura total que se logra se reduce.

Bajo estas condiciones un conductor de cobre con 25 a 50 milímetros cuadrados de sección transversal (2 a 1/0 AWG),

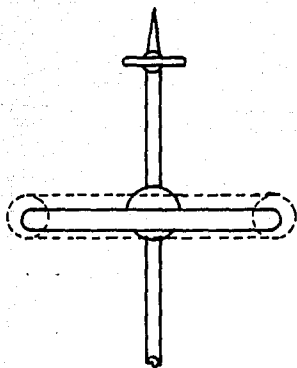


FIG. 6.20

PARARRAYOS EP - D.



podrían transportar de 870 a 3,500 kiloamperes respectivamente, por lo que recurrir a conductores de cobre con sección superior a los 50 milímetros cuadrados de sección, no es económico.

Se debe tener en cuenta el empleo adecuado del conductor para no interferir con la arquitectura de la edificación a proteger, pero las tensiones y corrientes a conducir no permiten que se coloque el conductor por ductos que no tengan salida para el vapor o gases que se forman, mucho menos el ponerlos debajo de impermeabilizantes o ahogados en las columnas de concreto que pueden afectarse fracturándose al existir la evaporación del agua contenida en las mismas.

De acuerdo con las Normas Técnicas para Instalaciones Eléctricas, las canalizaciones y cubiertas metálicas de cable y otras partes metálicas de equipos eléctricos que no lleven corrientes deben mantenerse por lo menos a dos metros de distancia de los conductores que interconectan los pararrayos de edificios con sus electrodos de tierra, o bien, sólo cuando esto no sea posible, dichas partes deben conectarse firmemente a los conductores mencionados.

Por otro lado, los electrodos y conductores de para -

rayos, no deben utilizarse para la puesta a tierra de equi  
pos eléctricos, tal como: medios de protección y desconec -  
ción, circuitos alimentadores, circuitos derivados, acome -  
tadas, etc., los cuales deben tener su propio sistema de -  
tierras, pero se recomienda interconectar entre si los elec -  
trodos de diferentes sistemas de tierras de una misma insta -  
lación.

## C O N C L U S I O N E S

En toda instalación eléctrica, la implantación de un sistema de tierras no es una inversión inútil que la encarece, puesto que en general representa menos del 5% de la inversión total para la obra eléctrica y en cambio trae consigo la seguridad para las personas y la instalación por sencilla que ésta sea. Por lo que más vale tenerlo y no requerirlo, que requerirlo y no tenerlo.

Este concepto es extensible desde casas habitación - hasta las más grandes instalaciones industriales, ya que para la correcta instalación y funcionamiento así como un seguro manipuleo de equipos electrodomésticos e industriales, es necesaria su correcta conexión a tierra.

El aumento de muertes por electrocución durante las épocas de lluvia, como se puede observar en los medios de información, se debe en gran parte al mal aterrizaje o a la falta de éste en las líneas de transmisión y distribución - así como a la carencia de protecciones contra descargas atmosféricas.

Se ha comprobado que durante la ocurrencia de una falla en una subestación eléctrica, pueden resultar diferen -

cias de tensión peligrosa entre estructuras o equipos conec  
tados firmemente a tierra; y la idea generalizada de que -  
puede ser tocado todo objeto conectado a tierra sin ningún-  
peligro durante la ocurrencia de una falla es falso, y ha -  
sido la causa de numerosos accidentes.

El dimensionamiento de una malla de tierra en gene -  
ral, no debe terminar con la obtención de un valor de la -  
resistencia de dispersión a tierra global, sino que deben -  
analizarse los valores de las tensiones de paso, de contac -  
to, de malla y en la periferia de la malla que pueden pre -  
sentarse dentro de su área en caso de falla.

La modificación del sistema de tierra en el citado -  
edificio de laboratorios es de mucha importancia dado que -  
la manipulación de aparatos y equipos, generalmente lo ha -  
cen los alumnos que por su inexperiencia están expuestos a -  
sufrir accidentes. Es importante además, para asegurar el -  
buen funcionamiento del equipamiento eléctrico, electrónico  
y de comunicaciones, pues un buen sistema de tierras dismi -  
nuye los errores en las mediciones y elimina ruidos e in -  
terferencias en los equipos electrónicos y de comunicacio -  
nes.

Es importante la sustitución del sistema de pararra -

yos actual para asegurar la protección del edificio y sus ocupantes con un menor número de pararrayos y bajadas a electrodos, de igual manera la construcción de registros que permitan su mantenimiento, que al mismo tiempo podran servir para la ejecución de prácticas para la medición de resistencia en sistemas de tierra, ya que este tema es tratado con poca seriedad a pesar de su importancia.

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

- 1.- Manual de Puesta a Tierra de Equipos Industriales  
Francisco Ruiz Vasallo.  
Edit. CEAC.
- 2.- Instalaciones de Puesta a Tierra.  
Vitorio Re.  
Edit. Morcambo.
- 3.- Equipos para Subestaciones Eléctricas  
Enriquez Harper.  
Edit. Limusa.
- 4.- Apuntes del Curso de Instalaciones Eléctricas Resi -  
denciales.  
Palacio de Minería (U.N.A.M.).
- 5.- Apuntes del Curso de Pararrayos y Sistemas de Puesta-  
a Tierra.  
Escuela Nacional de Telecomunicaciones.
- 6.- Manual de Diseño de Subestaciones.  
Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A.

- 7.- Recomendaciones para el Cálculo Preliminar de Redes -  
de Tierra de Plantas y subestaciones Eléctricas.  
Especificaciones, C.F.E.-00 JOO-1 y C.F.E.-D8CME-07
- 8.- Folleto sobre Diseño de Tierras para Subestaciones.  
Ings. Héctor Guerrero y Fernando Atistain.
- 9.- Manual Eléctrico.  
CONELEC, S.A.  
Edit. Proyectos Publicitarios.  
cuarta edición.
- 10.- Folleto sobre Pararrayos Reactivos.  
Proyección Electrónica, S.A. de C.V.
- 11.- Diferentes Tipos de Conexión a Tierra.  
Ing. Eusebio Fernández  
Folleto de la C.F.E.
- 12.- Especificaciones Generales de Construcción.  
Tomo 2; Instalaciones eléctricas, telefonía y sonido.  
Instituto Mexicano del Seguro Social.
- 13.- Normas Técnicas para Instalaciones Eléctricas  
SECOFI  
Edit. Libros Económicos.

14.- Manual de Diseño de Redes de Tierra para Subestaciones de Potencia.

T. Velázquez y H. Sarmiento.

Instituto de Investigaciones Eléctricas.

15.- Manual de Seguridad Industrial

William Handley

Primera Edición en Español.

Edit. Mc Graw Hill. 1980.

16.- Diseño de Subestaciones Eléctricas

José Raúl Martín

Edit. Mc. Graw Hill 1987.

17.- Manual de Instalaciones Eléctricas Residenciales e industriales.

Enriquez Harper

Edit. Limusa. 1977.