

33  
2 es.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN.**

**"ILUMINACION E INSTALACIONES ELECTRICAS  
CALCULO DEL SISTEMA DE TIERRA".**

**TRABAJO DE SEMINARIO  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A :  
ALFREDO CURIOCA NAHON**

**ASESOR: ING. BENJAMIN CONTRERAS SANTACRUZ**

26

**CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.**

**A 1998.**

**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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



## **AGRADECIMIENTOS:**

### **A MIS PADRES:**

**POR OFRECERME SU APOYO INCONDICIONAL Y CONFIANZA, POR SABER QUE EN LOS MOMENTOS DIFÍCILES SIEMPRE HAN ESTADO Y ESTARÁN CONMIGO.**

### **A MIS HERMANAS:**

**POR SER LAS MEJORES AMIGAS CON LAS QUE CONTARE SIEMPRE, POR CRECER CONMIGO PASO A PASO Y POR DESARROLLAR EN MI EL SENTIMIENTO DE SUPERACIÓN.**

### **A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO:**

**POR BRINDARME LA OPORTUNIDAD DE LOGRAR UNA FORMACIÓN PROFESIONAL Y HACERME UN PROFESIONISTA COMPROMETIDO CON EL DESARROLLO DE NUESTRO PAÍS. ¡GRACIAS!**

# INDICE

INTRODUCCION .....	1
--------------------	---

## CAPITULO 1

1.1. INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA. ....	3
1.2. FUNCIONES Y OBJETIVOS BASICOS DE UNA INSTALACION DE PUESTA A TIERRA. ....	3
1.3. NATURALEZA DE LA RESISTENCIA DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA. ....	5
1.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO. ....	6
1.5. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO. ....	8
1.5.1. METODOS DE MEDIDA. ....	8
1.5.2. METODO DE LA VARILLA DE TIERRA. ....	9
1.5.3. METODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS. ....	10
1.5.4. METODO DE WENNER. ....	13
1.6. MODELOS TECNICOS. ....	15
1.6.1. ELECTRODO HEMISFERICO EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA. ....	15
1.6.2. DOS HEMISFERIOS INCRUSTADOS EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA. ....	18
1.6.3. ESFERA SEPULTADA EN LA TIERRA. ....	20
1.6.4. OTROS SIMPLES SISTEMAS DE TIERRA. ....	22

## CAPITULO 2

2.1. NORMAS PARA CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA. ....	24
2.1.1. MATERIALES. ....	24
2.1.2. INSTALACION. ....	26

2.1.3. SECCION TRANSVERSAL DEL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA DE SISTEMAS DE CORRIENTE DIRECTA. ....	27
2.1.4. SECCION TRANSVERSAL DEL CONDUCTOR DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA DE SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA. ....	28
2.1.5. SECCION TRANSVERSAL DE LOS CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA DE EQUIPOS. ....	30
2.2. APARTARRAYOS (NORMAS). ....	33
2.3. LIMITES DE CORRIENTE TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO. ....	36
2.4. DISPOSICION BASICA DE LAS REDES DE TIERRA. ....	41
2.5. CORRIENTES MAXIMAS DE CONTACTO A TIERRA. ....	42
2.6. COMPONENTE SIMETRICA DE LA CORRIENTE A TIERRA. EN EL INSTANTE DE LA INICIACION DE LA FALLA. ....	42
2.7. FACTORES DE CORRECCION CONSIDERADOS EN EL CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CONTACTO. ....	44
2.8. FACTORES DE DECREMENTO D. ....	44
2.9. FACTORES DE SEGURIDAD POR CRECIMIENTO DE LA SUBESTACION. ....	46
2.10. EFECTO DE LA RESISTENCIA DE LA RED A TIERRA. ....	46
2.1 1. EFECTO DE LOS HILOS DE GUARDA. ....	47

### CAPITULO 3

3.1. METODOS DE CALCULO. ....	49
3.1.1. METODO CLASICO. ....	49
3.1.2. DISEÑO PRELIMINAR. ....	49
3.1.3. CALCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR DE LA RED	50
3.1.4. CALCULO DE LOS POTENCIALES DE PASO, DE CONTACTO Y DE MALLA DE LA RED DE TIERRA. ....	52

3.1.5. CALCULO DE LA LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR. ....	54
3.1.6. CALCULO DE LA ELEVACION MAXIMA DEL POTENCIAL DE LA RED Y CALCULO DE LOS POTENCIALES DE PASO EN LA PERIFERIA DE LA MALLA. ....	55
3.1.7. INVESTIGACION DE LOS POTENCIALES DE TRANSFERENCIA. ....	57
3.1.8. PROTECCION EN REDES CON NEUTRO A TIERRA. ....	59
3.1.9. RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE MAQUINAS EN REDES SIN NEUTRO A TIERRA. ....	60
3.1.10. REVISION DEL DISEÑO. ....	61
3.2. MECANIZACION POR COMPUTADORA. ....	62
3.2.1. NOMENCLATURA. ....	63
3.2.2. PROCEDIMIENTO DE CALCULO DEL PROGRAMA. ....	63

#### CAPITULO 4.

4.1. EJEMPLOS DE CALCULOS DE TIERRA. ....	67
4.2. CALCULOS CON COMPUTADORA. ....	79
4.3. FORMULAS PARA EL CALCULO DE RESISTENCIAS A TIERRA. ....	83
4.4. TABLA PARA DETERMINAR LOS COEFICIENTES $k_m$ y $k_i$ . ....	84
4.5. TIPOS DE CONECTORES DE TIERRA. ....	85
4.6. TABLA COMERCIAL CON RANGO DE CABLES Y MEDIDA DE LA VARILLA. ....	87
4.7. TABLA PARA ESTIMAR EL TAMAÑO DEL BUS DE PUESTA A TIERRA. ....	88

CONCLUSIONES. ....	90
--------------------	----

BIBLIOGRAFIA. ....	91
--------------------	----

## INTRODUCCION.

El concepto eléctrico de tierra se define como una conexión conductora, ya sea intencional o accidental entre un circuito eléctrico y la tierra o algún cuerpo conductor que sirva en lugar de la tierra. La palabra tierra de esta definición, concierne primordialmente con seguridad en estructuras y construcciones que descansan sobre la tierra. El hombre camina sobre la tierra, los edificios están colocados sobre la tierra, y las descargas de los rayos hacia la tierra algunas veces son mediante los edificios, por lo tanto tiene sentido usar la tierra como parte del sistema de seguridad para evitar riesgos eléctricos.

Se pueden suponer y diseñar múltiples conexiones a tierra, las cuales ocurren generalmente mediante acero estructural, tuberías y electrodos de tierra. Por diversas razones que se discutirán en el desarrollo del tema, dichos conductores acarrearán señales y corrientes potenciales; algunas de estas corrientes son indeseables aunque otras pueden ser ignoradas.

La idea de que la tierra es un medio eléctrico infinito con resistencia cero, la noción popular que la tierra es un lugar para disipar todo el ruido y que de alguna manera lo disipa y pierde no son tan simples. Toda corriente debe fluir en un circuito, por lo tanto si una corriente entra en la tierra, debe salir también de la tierra

Cada componente de la corriente de tierra resulta en una diferencia de potencial de tierra, estas diferencias de potencial son una fuente de dificultades para muchos diseñadores y usuarios de equipo electrónico. En algunas aplicaciones las diferencias de potencial de microvolts son un problema y en otros casos kilovolts dañan los equipos. Un amplio rango de situaciones pueden ocurrir y el diseñador debe considerar todos los aspectos del problema.

El aterrizamiento para las industrias de potencia significa una conexión a la tierra, dicha conexión puede ser por medio de acero estructural, tubería metálica, equipo eléctrico, vías de canalización, y conductores de tierra (varillas). La instalación de un sistema de tierra es un requerimiento para facilitar una operación segura en el funcionamiento de las industrias. Los conductores que canalizan la corriente de potencia deben ser enterrados en lugares específicos, los otros conductores forman una red que debe conectar eventualmente a los conductores de potencia. Todos estos conductores forman una red que es una parte integral de un sistema de tierra. El cuidadoso aterrizamiento de los sistemas de potencia provee: protección contra el fuego; evitar cortos eléctricos; protección del equipo contra fallas de tierra; protección contra rayos; protección eléctrica contra el ruido; y limitación del alto voltaje.

De acuerdo a su funcionalidad, los sistemas de tierra se distinguen de la siguiente manera:

Sistemas de tierra de protección, el cual tiene la misión u objeto de limitar el valor de la tensión contra tierra de aquellas partes del sistema eléctrico, que no deben ser mantenidas ni en tensión ni aisladas y con las cuales se puede poner en contacto el personal (por ejemplo la carcasa de una máquina eléctrica, herrajes o fierros de soporte de los aisladores, el secundario de los transformadores de medida, soportes de la línea eléctrica, etcétera.).

Sistemas de tierra de funcionamiento, que sirven para poner a tierra por necesidad de funcionamiento determinados puntos del circuito eléctrico (neutro de generadores y transformadores, aparatos para la conexión de la tensión contra tierra, apartarrayos, etc ).

Sistemas de tierra de trabajo, son sistemas de tierra de protección con carácter provisional, efectuado para poner a tierra parte de una instalación eléctrica, aún normalmente en tensión, el cual debe llegar para efectuar un trabajo o reparación.

## CAPITULO 1.

### 1.1. INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA.

La unión eléctrica con la tierra de una parte de un circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo, se efectúa mediante una instalación de puesta a tierra. Una instalación de puesta a tierra está constituida por uno o varios electrodos enterrados y por las líneas de tierra que conecten dichos electrodos a los elementos que deban quedar puestos a tierra de una instalación eléctrica; además deberán existir los suficientes puntos de puesta a tierra que faciliten las medidas de comprobaciones del estado de los electrodos y la conexión a tierra de la instalación. Debe considerarse que, según esté aislada o no del terreno, la parte de la línea de tierra comprendida entre un punto de puesta a tierra y el electrodo de la puesta a tierra, constituirá la línea de enlace o pasará a formar parte del mismo.

### 1.2 FUNCIONES Y OBJETIVOS BASICOS DE UNA INSTALACION DE PUESTA A TIERRA

La función de puesta a tierra de una instalación eléctrica es la de forzar la derivación, al terreno, de las intensidades de corriente de cualquier naturaleza que se puedan originar, ya se trate de corrientes de defecto, bajo frecuencia industrial, o debidas a descargas atmosféricas de carácter impulsional.

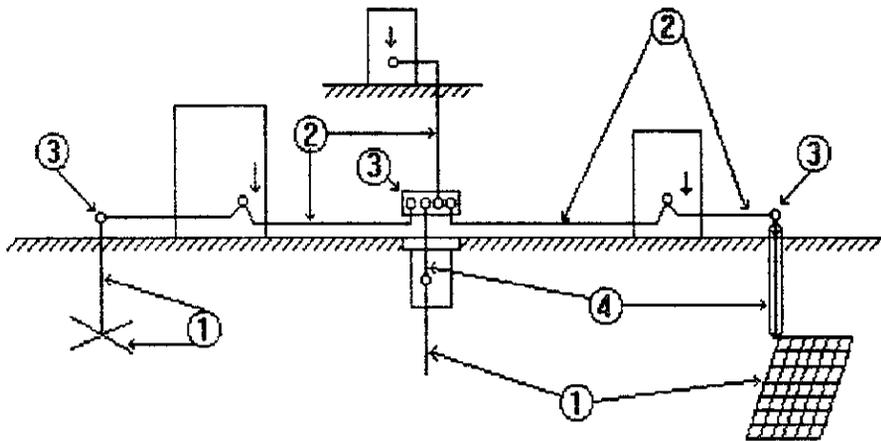


Figura 1.1. Esquema de una instalación de puesta a tierra.

1. Electrodo de tierra.
2. Línea de tierra.
3. Punto de puesta a tierra.
4. Línea de enlace con el electrodo de tierra.

Una instalación de puesta a tierra:

-Limita la diferencia de potencial que, en un momento dado puede presentarse en estructuras metálicas y tierra.

-Posibilita la detección de defectos a tierra y asegura la actuación y coordinación de las protecciones, eliminando o disminuyendo así, el riesgo que supone una avería para el material utilizado y las personas.

-Limita las sobretensiones internas (de maniobra, transitorias y temporales) que puedan aparecer en la red eléctrica, en determinadas condiciones de explotación

-Evitar que las tensiones que originan las descargas de los rayos provoquen cebados inversos, en el caso de instalaciones de exterior y, particularmente en líneas aéreas.

La circulación de las intensidades mencionadas por la instalación de puesta a tierra, puede originar la aparición de diferencias de potencial entre ciertos puntos, por lo que también debe considerarse en la instalación, incluso con dichas diferencias de potencial, se cubran los siguientes objetivos:

- Seguridad de las personas.
- Protección de las instalaciones.
- Mejora de la calidad del servicio.
- Establecimiento y permanencia de un potencial de referencia.

### 1.3 NATURALEZA DE LA RESISTENCIA DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA.

Normalmente, la resistencia total que presenta una instalación de puesta a tierra está constituida por la suma de las siguientes partes:

- La resistencia del conductor (línea de tierra y línea de enlace con el electrodo) que conecta el electrodo de tierra al sistema que debe ponerse a tierra.
- La resistencia del contacto entre la superficie del electrodo y el terreno
- La resistencia del suelo en el que está enterrado el electrodo.

## 1.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La composición de la tierra, incluso en lugares determinados, es muy heterogénea, tanto vertical como horizontalmente, además están afectadas fuertemente por los cambios climatológicos; todo ello hace que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro, de esta forma se deben considerar los siguientes factores del terreno:

- La composición. La variación de la resistividad según la composición del terreno es muy acusada, tropezándose con la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están delimitadas, como para saber de antemano, el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la toma de tierra. Sucede incluso que, para una misma clase de terreno situada en distintos parajes, la resistividad puede ser sensiblemente diferente, los valores extremos que se encuentran en la práctica pueden variar de algunas decenas de  $\Omega\cdot m$ . para terrenos orgánicos y húmedos, a una decena de miles de  $\Omega\cdot m$  para granitos secos.

- Las sales solubles y su concentración. Al ser aislantes los principales componentes del terreno, la conductividad del suelo es esencialmente de naturaleza electrolítica, es decir, la conducción de corriente tiene lugar principalmente, a través del electrolito formado por las sales y el agua habitualmente contenida en el terreno.

- El estado higrométrico. El contenido de agua o grado de humedad del terreno influye de forma apreciable sobre su resistividad. Su valor no es constante, ya que varía con el clima, época del año, naturaleza del subsuelo, la profundidad considerada y la situación del nivel freático, pero rara vez es nulo, incluso al referirse a zonas desérticas. A medida que el grado de humedad aumenta, cuyo principal efecto es disolver las sales solubles, la resistividad disminuye con rapidez, pero a partir de cifras del orden del 15% en peso, esta disminución es mucho menos acusada, a causa de la práctica saturación del terreno. Ante el efecto de

variación de la humedad del terreno, se podrán usar recubrimientos de grava como ayuda para conservar dicha humedad.

- La temperatura. La resistividad del terreno aumenta a medida que desciende la temperatura y ese aumento se acusa mucho de alcanzarse los 0°C, hasta el punto que a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos. Por ello, en zonas con peligro de heladas los electrodos se enterrarán a una profundidad que no alcance dicha temperatura o se tendrá en cuenta esta circunstancia en el cálculo.

- La granulometría. Es un elemento importante que influye a la vez sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad, y también sobre la calidad del contacto con los electrodos, incrementándose la resistividad con el mayor tamaño de los granos. Esta es la razón de que el valor de la resistividad de la grava sea superior al correspondiente a la arena y que el de ésta supere al de la arcilla. Los suelos de grano grueso (gravas, guijarros, etc.) se prestan mal al establecimiento de buenas redes de tierra, circunstancia que se puede solucionar rodeando la superficie de los electrodos de un cierto espesor de tierra fina o de otro material relativamente conductor.

- La compactación. La resistividad se ve también afectada por el grado de compactación del terreno, disminuyendo al aumentar éste. Por lo tanto, se procurará utilizar las capas de tierra más conductoras, haciéndose la colocación de electrodos con el mayor cuidado posible en cuanto a compactación del terreno.

- La estratigrafía. La resistividad total de un terreno es la resultante a las diversas capas que la constituyan. Puede suceder que una sola capa presente una resistividad tan baja que la influencia de las demás sea imperceptible, tal como cuando se alcanzan zonas de agua o el nivel freático. Será por tanto prudente tener

en cuenta estas variaciones de resistividad en el establecimiento de una red de tierras enterrada a una profundidad del orden de 1 metro.

Valores típicos de resistividad del terreno	
Tipo de terreno	Resistividad ohm-m.
Agua de mar	1
Tierra orgánica húmeda	10
Suelo húmedo	$10^2$
Suelo seco	$10^3$
Concreto	$10^5$
Cama rocosa	$10^4$
Granito	$10^7$
Roca arsenica	$10^8$

Tabla 1.1. Características del terreno.

## 1.5 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

La realización de una instalación de puesta a tierra requiere conocer previamente el perfil de la resistividad del terreno, según la profundidad, para de esta forma facilitar la elección de la disposición de los electrodos de tierra que mejores resultados técnico-económicos proporcione y poder prever las características eléctricas de la red de tierras.

### 1.5.1. METODOS DE MEDIDA.

Existen diversos métodos para determinar la resistividad de un terreno pudiendo citarse en primer lugar, el basado en la toma de muestras y el de los dos electrodos,

pero que sólo proporcionan indicaciones muy locales y, consecuentemente, insuficientes o engañosas para la concepción de las tomas de tierra.

### 1.5.2. METODO DE LA VARILLA CONDUCTORA

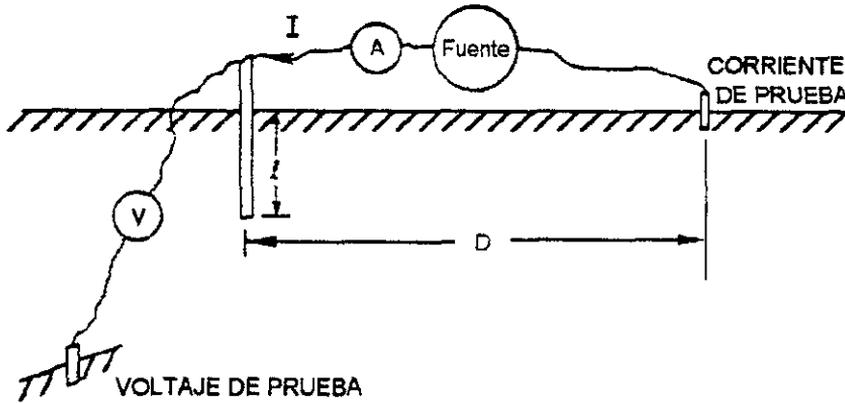


Figura 1.2. Método de la varilla conductora

El método de la varilla conductora como su nombre lo indica, consiste en insertar una varilla de tierra en el suelo. Si la longitud  $l$  de la varilla de tierra es conducida dentro del suelo, la resistencia de la varilla de tierra con respecto a la tierra lejana es medida. Para este propósito, se emplea una fuente, la cual es conectada entre la varilla conductora y un electrodo auxiliar (corriente de prueba) Localizado a una distancia  $D$  afuera de la varilla conductora como se ilustra en la figura 1.2. Esta conexión ocasiona una corriente eléctrica  $I$  que será inyectada en la tierra desde la varilla conductora la cual es conectada por el electrodo auxiliar. Otro electrodo auxiliar se usa para medir el voltaje de la varilla conductora. Ese electrodo (voltaje de prueba) es colocado afuera de la varilla conductora y afuera de la corriente de prueba para minimizar interferencias. La resistencia de la varilla conductora con respecto a la tierra lejana es aproximadamente  $R = V/I$  esta resistencia es

relacionada a la resistividad del suelo. Una expresión aproximada de una resistencia de la varilla de tierra lejana, se puede obtener por la siguiente expresión.

$$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \ln \frac{2\ell}{a} \quad \text{ecuación 1.1}$$

Despejando de la ecuación anterior, se tiene que la resistividad del suelo está dada por:

$$\rho = \frac{2\pi\ell R}{\ln\left(\frac{2\ell}{a}\right)} \quad \text{ecuación 1.2}$$

Si el suelo es uniforme (considerando la resistividad constante), el método de la varilla conductora provee la misma resistividad del suelo independientemente de la longitud  $L$  de la varilla conductora en contacto con el suelo. Si el método de la varilla conductora se aplica a suelos no uniformes, este proveerá una resistividad del suelo aparente la cual variará con la longitud de la varilla conductora que esta en contacto con el suelo.

En la aplicación del método de la varilla conductora, la posición de la corriente y el voltaje de pruebas es importante. Específicamente la corriente de prueba deberá colocarse afuera de la varilla conductora de manera que el campo eléctrico alrededor de la varilla de tierra no sea afectado por la presencia de la corriente de prueba. Similarmente, el voltaje de prueba deberá colocarse en un punto de aproximadamente voltaje cero, que es un punto en el cual el voltaje no es afectado por la presencia de la varilla de tierra y la corriente de prueba.

### 1.5.3 METODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS.

En este procedimiento, se establece la resistividad, en función de la profundidad en la vertical de un punto  $O$ , haciendo circular una corriente  $I$ , con ayuda de un generador  $G$ , entre dos electrodos puntuales de pequeñas dimensiones, enterrados en el suelo,  $A$  y  $B$ .

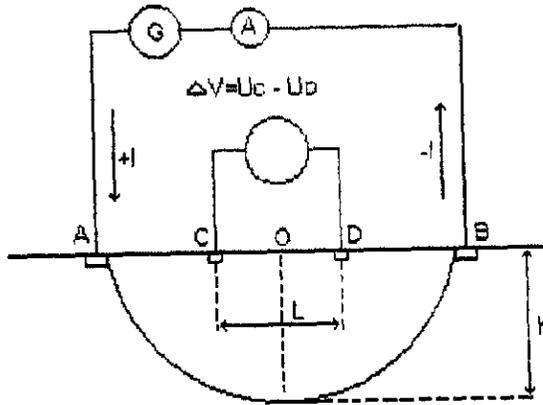


Figura 1.3. Método de los 4 electrodos.

En un terreno homogéneo, de resistividad  $\rho$ , el valor del campo eléctrico  $E$ , en el punto  $O$ , debido a la presencia de cargas eléctricas de signos contrarios procedentes de  $A$  y  $B$ , tiene por valor:

$$E = \frac{\rho}{2\pi} \left[ \frac{(+I)}{(AO)^2} - \frac{(-I)}{(OB)^2} \right] \quad \text{ecuación 1.3}$$

Si el punto  $O$  está situado en la mitad de  $AB$ , de tal forma que  $AO = OB = x$ , queda:

$$E = \frac{\rho}{\pi x^2} \quad \text{ecuación 1.4}$$

de donde se deduce la fórmula siguiente de la resistividad del suelo bajo el punto  $O$ :

$$\rho = \pi x^2 \frac{E}{I} \quad \text{ecuación 1.5}$$

Puesto que el suelo raramente es homogéneo, realmente la fórmula expresa la resistividad aparente de las capas existentes en el suelo bajo el punto O, justo hasta la profundidad alcanzada por el filete de intensidad de corriente media que circula entre los electrodos A y B.

Prácticamente, el campo eléctrico E, se determina por el cociente entre la diferencia de potencial  $U_C - U_D$  que existe entre dos sondas de tierra, C y D, dispuestas simétricamente con relación a O y su separación L.

$$E = \frac{U_C - U_D}{L} \quad \text{ecuación 1.6}$$

Expresando la diferencia de potencial en función de las distancia respecto de los puntos C y D con respecto a las corrientes +I y -I, se tiene:

$$U_C - U_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} \right) - \left( \frac{1}{AD} - \frac{1}{DB} \right) \right] \quad \text{ecuación 1.7}$$

y, por tanto la resistividad aparente  $\rho$ , de las capas acumuladas del terreno debajo del punto O será:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} - \frac{1}{AD} + \frac{1}{DB}} \cdot \frac{U_C - U_D}{I} \quad \text{ecuación 1.8}$$

que es la fórmula general para la medida de la resistividad aparente del terreno, cualquiera que sean las longitudes existentes entre los electrodos despreciando la profundidad de enterramiento de las picas de medida.

El término  $(U_c - U_D) / I$  es la resistencia,  $R$  en  $\Omega$ , que proporcionan directamente los instrumentos de 4 bornes comúnmente utilizados, cuyo circuito voltimétrico se conecta a las tomas C y D, y el amperímetro a las tomas A y B. En el caso de que el suelo sea homogéneo, la resistividad aparente es idéntica a la resistividad real.

#### 1.5.4. METODO DE WENNER.

Es un caso particular del método de los 4 electrodos, que se disponen en línea recta y equidistantes, simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del suelo, no siendo necesario que la profundidad de las piquetas, que para ello se utilizan, sobrepase los 30 cm.

El aparato de medida es un telurómetro clásico, siendo los dos electrodos extremos los de inyección de la corriente de medida  $I$ , y los dos centrales, los electrodos de medida del potencial.

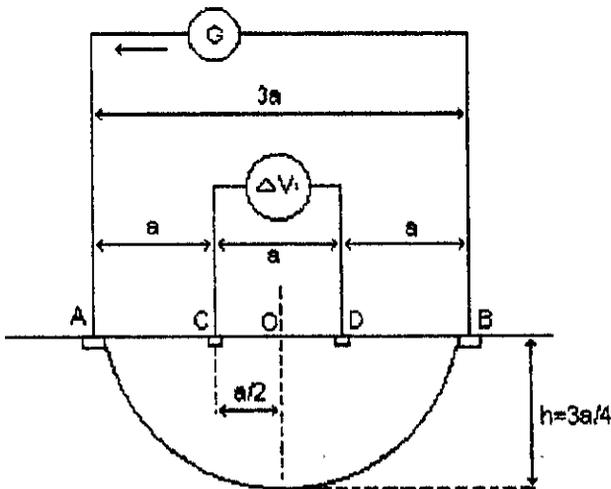


Figura 1.4 Método de Wenner.

El punto O, de medida de la resistividad se encuentra en el medio de un sistema simétrico, entre los electrodos de potencial, llamándose base de medida a la distancia "a" entre dos electrodos adyacentes y línea de emisión a la distancia entre los electrodos extremos (igual a 3a en este método)

En estas condiciones, la fórmula general anterior queda simplificada en:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a}} R = 2\pi a R \quad \text{ecuación 1.9}$$

En relación con este método, deben de tenerse presente los siguientes aspectos:

- Noción de la profundidad de investigación.

La densidad de la corriente en el suelo decrece regularmente cuando aumenta la profundidad en la vertical de los dos electrodos centrales de medida del potencial ya que la corriente penetra tanto más profundamente en el suelo cuanto más alejados estén los electrodos de inyección.

En la práctica, se puede admitir que la resistividad aparente es, básicamente la de las capas comprendidas entre la superficie del suelo y la profundidad a la cual la densidad de corriente se ha reducido a la mitad de su valor en la superficie, siendo esta profundidad de investigación, h, del orden de magnitud de la distancia "a" que separa dos picas adyacentes, en suelo homogéneo (h está comprendida entre "a" y "0.75a").

- Elección de la profundidad de investigación

Cuanto mayor extensión ocupe el electrodo de tierra, mayor será la profundidad del suelo de cuyas características depende la de la red de tierra.

Por otro lado, el reparto de potencial en la superficie es función, principalmente de la resistividad de las capas de terreno superficial, mientras que la resistencia de tierra no depende tanto.

1.6. ANALISIS DE SISTEMAS DE TIERRA SIMPLES.

1.6.1. ELECTRODO HEMISFERICO EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA.

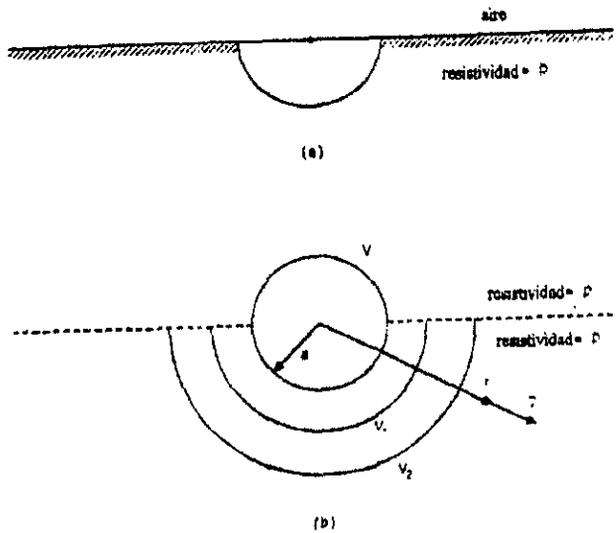


Figura 1.4 Electrodo hemisférico enterrado. (a) Sistema actual, (b) Sistema equivalente para propósitos de análisis

El más simple sistema de tierras desde el punto de vista analítico es un electrodo enterrado de resistividad  $\rho$  como se muestra en la figura 1.4 a.

El centro del electrodo hemisférico está colocado sobre la superficie de la tierra. Asumiendo que el potencial del hemisferio es  $V$ , en este caso la corriente eléctrica fluirá de la superficie de el electrodo hacia adentro de la tierra. Porque por simetría el flujo de la corriente eléctrica en la semi infinita tierra será la misma que en el sistema de la figura 1.4 b, la cual ilustra una esfera enterrada en un medio infinito de resistividad  $\rho$ . En otras palabras el flujo de la corriente será tal que las superficies equipotenciales generadas, serán superficies esféricas concéntricas. Si la corriente total  $I$ , fluye de la superficie del hemisferio hacia adentro de la tierra, la corriente total  $2I$ , fluirá de la esfera hacia adentro de la tierra. La densidad de corriente  $J(r)$  en un punto localizado a una distancia  $r$  del centro del electrodo será :

$$\underline{J}(r) = \frac{2I}{4\pi r^2} r \quad \text{amperes / m}^2 \quad r \geq a \quad \text{ecuación 1.10}$$

Donde  $a$  es el radio de el hemisferio y  $r$  es un vector unitario en la dirección radial. Por la ley de Ohm, la intensidad del campo eléctrico en un punto localizado a una distancia  $r$  del centro del hemisferio será

$$E(r) = \rho J(r) r \quad r \geq a \quad \text{ecuación 1.11}$$

El potencial de el hemisferio con respecto a un punto  $x$  localizado a una distancia  $r = r_1$  de el centro del hemisferio será dado por la ecuación:

$$V(r_1) = \int_{r=a}^{r_1} J(r) \rho dr \quad \text{ecuación 1.12}$$

Sustituyendo y evaluando la integral, tenemos:

$$V(r_1) = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{r_1} \right) \quad \text{ecuación 1.13}$$

El potencial de la esfera con respecto a la tierra lejana,  $V_\infty$ , es obtenida por sustitución de  $r_1 \rightarrow \infty$ .

$$V_\infty = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad \text{ecuación 1.14}$$

El potencial sobre la superficie de la tierra a lo largo de una línea pasa a través del centro de el hemisferio como se ilustra en la figura 1.5. La resistencia de el hemisferio a la tierra lejana es:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi a} \quad \text{ecuación 1.15}$$

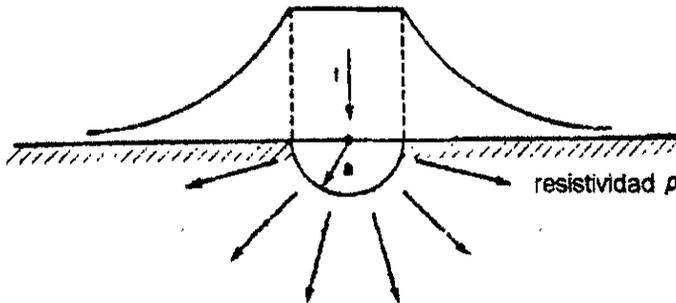


Figura 1.5. Distribución potencial sobre la superficie de la tierra generada por un hemisferio.

## 1.6.2 DOS HEMISFERIOS INCRUSTADOS EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

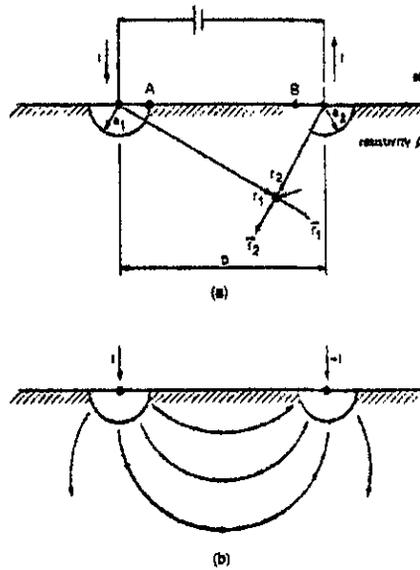


Figura 1.6. Dos electrodos hemisfericos a) configuración b) líneas de flujo de corriente

La anterior simple configuración comprende dos hemisferios incrustados en la superficie de la tierra como en la figura 1.6 a. Una fuente de corriente eléctrica es conectada entre los dos hemisferios, lo cual causará una corriente eléctrica total  $I$  para fluir a través de la tierra. Para propósitos de análisis puede asumirse que la presencia de un hemisferio no afecta la distribución de corriente sobre el otro hemisferio. Esta suposición es valida asumiendo que la distancia entre los dos hemisferios es más grande que su radio. En este caso los resultados del análisis anterior pueden ser empleados directamente. La solución para este caso es obtenida por superposición. Especificamente la densidad de corriente eléctrica  $J(x, y)$  en un punto  $(x, y)$  ilustrado en la figura 1.6 a es la siguiente:

$$J(x, y) = \frac{2I}{4\pi r_1^2} \underline{r}_1 + \frac{-2I}{4\pi r_2^2} \underline{r}_2 \text{ amperes/m}^2 \text{ ecuación 1.16}$$

Donde  $r_1, r_2$ , son distancias ilustradas en la fig.1.6 a y  $\underline{r}_1, \underline{r}_2$  son vectores unitarios ilustrados en la misma figura. El primer término es la contribución de la densidad de corriente eléctrica del primer hemisferio, el segundo término es la contribución del segundo hemisferio. Similarmente, la intensidad del campo eléctrico  $\underline{E}(x, y)$  es calculada para resultar

$$\underline{E}(x, y) = \rho \frac{2I}{4\pi r_1^2} \underline{r}_1 - \rho \frac{2I}{4\pi r_2^2} \underline{r}_2 \text{ volts/metro ecuación 1.17}$$

El voltaje entre los electrodos es calculado de la ecuación:

$$V = \int \underline{E}(x, y) d\underline{r} \text{ ecuación 1.18}$$

Seleccionando una Integración a través de la línea AB y sacando fuera de la integral las constantes tenemos:

$$V = \rho \frac{I}{2\pi} \left( \frac{1}{a_1} - \frac{1}{D - a_2} + \frac{1}{a_2} - \frac{1}{D - a_1} \right) \text{ ecuación 1.19}$$

Si ambos hemisferios son idénticos  $a_1 = a_2$ , entonces se tiene que:

$$V = \frac{\rho I}{\pi} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{D - a} \right) \text{ ecuación 1.20}$$

La resistencia entre los dos hemisferios es:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{\pi} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{D-a} \right) \quad \text{ecuación 1.21}$$

Las líneas de flujo de corriente eléctrica son ilustradas en la figura 1.6 b

### 1.6.3 ESFERA SEPULTADA EN LA TIERRA

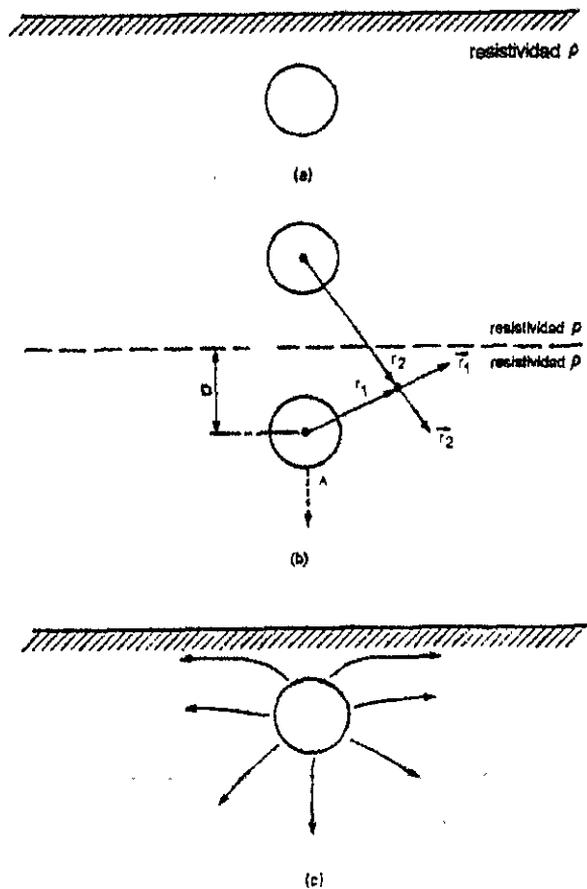


Figura 1.7. Electrodo esférico enterrado. a) configuración actual, b) configuración del análisis equivalente, c) líneas del flujo de corriente

Otra simple configuración es una esfera enterrada a una profundidad  $D$ , como se ilustra en la figura 1.7 b. Específicamente, la teoría de las imágenes garantiza que el flujo de la corriente eléctrica en la semi-infinita conductividad media será la misma que para el sistema de la figura 1.7 b, la cual comprende la esfera original y su imagen con respecto a la interface en un medio infinito de resistividad  $\rho$ . Si la esfera original introduce una corriente total  $I$  dentro del suelo, su imagen introducirá también una corriente  $I$ .

En general, la distribución de corriente eléctrica sobre la superficie de la esfera no será uniforme. La solución exacta es muy compleja. Una simple, pero aproximada solución es obtenida observando que si la distancia  $D$  es mucho más grande que el radio de la esfera, la corriente  $I$  será aproximadamente uniformemente distribuida sobre la superficie de la esfera. En este caso la densidad de corriente, la intensidad de campo eléctrico, y el voltaje en la semi-infinita región bajo la interface son dadas por:

$$\underline{J}(x, y) = \frac{I}{4\pi_1^2} \underline{r}_1 + \frac{I}{4\pi_2^2} \underline{r}_2 \quad \text{amperes / m}^2 \quad \text{ecuación 1.22}$$

$$\underline{E}(x, y) = \rho \frac{I}{4\pi_1^2} \underline{r}_1 + \rho \frac{I}{4\pi_2^2} \underline{r}_2 \quad \text{volts/metro} \quad \text{ecuación 1.23}$$

$$V = \int \underline{E}(x, y) \cdot d\underline{r} \quad \text{ecuación 1.24}$$

donde  $r_1, r_2$  son las distancias de el punto de interés desde el centro de la esfera y su imagen, respectivamente, y  $\underline{r}_1, \underline{r}_2$  son vectores unitarios mostrados en la figura 1.7 b. El voltaje de la esfera es obtenido de la fórmula anterior si la integración es calculada a lo largo de la línea comenzando sobre la superficie de la esfera y terminando en el infinito, semejante a una línea como se muestra empezando en el punto A. Evaluando la integral a lo largo de esta línea, obtenemos:

$$V = \rho \frac{1}{4\pi} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{2D+a} \right) \quad \text{ecuación 1.25}$$

El voltaje en un punto  $x$  localizado a una distancia  $r_1$  de la esfera y  $r_2$  de la imagen es:

$$V(x) = \rho \frac{l}{4\pi} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{ecuación 1.26}$$

#### 1.6.4 OTROS SIMPLES SISTEMAS DE TIERRA.

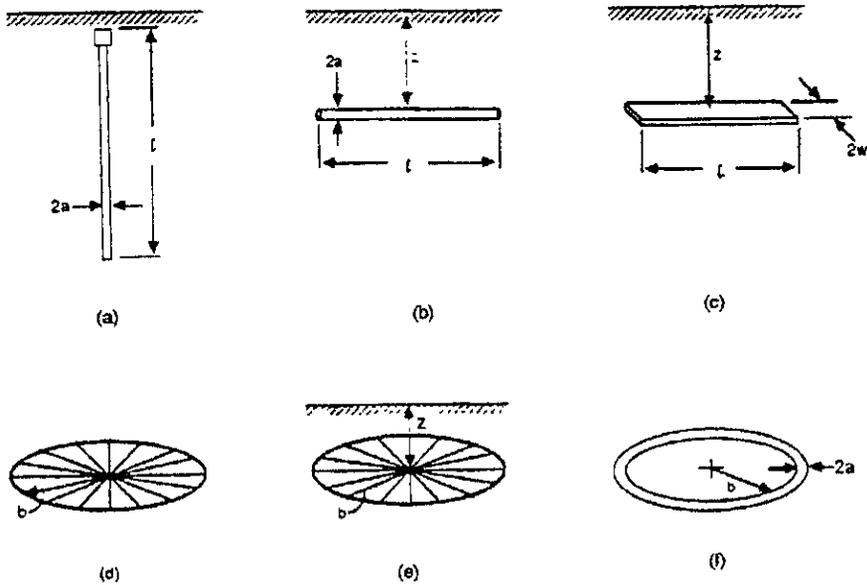


Figura 1.8. Sistemas simples de tierras, a) varilla de tierra, b) alambre enterrado, c) placa enterrada, d) disco en un medio infinito, e) disco cercano a la superficie del suelo f) anillo en un medio infinito

Mientras los electrodos de tierra considerados anteriormente son simples de analizar, son imprácticos para usar en sistemas de potencia. Prácticas estructuras de tierra consisten en varillas de tierra, cables desnudos, anillos, marcos de tierra, etc. Algunos de los más simples electrodos de tierra son ilustrados en la figura 1.8. Análisis exactos de los sistemas de tierra de esta figura requieren técnicas numéricas. A menudo es necesario estimar la resistencia de tierra de un sistema de tierras con fórmulas simplificadas. Tales fórmulas para los sistemas de tierras de la figura 1.8 son las siguientes:

$$\text{Varilla de tierra } R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \ln \frac{2\ell}{a} \quad \text{ecuación 1.27}$$

$$\text{Alambre enterrado } R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left( \ln \frac{\ell}{a} + \ln \frac{\ell}{2z} \right) \quad z \geq 6a \quad \text{ecuación 1.28}$$

$$\text{Placa enterrada } R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left( \ln \frac{2\ell}{w} + \ln \frac{\ell}{2z} \right) \quad z \geq 3w \quad \text{ecuación 1.29}$$

$$\text{Disco en un medio infinito } R = \frac{\rho}{8b} \quad \text{ecuación 1.30}$$

$$\text{Disco cercano a la superficie del suelo } R = \frac{\rho}{4b} \quad \text{ecuación 1.31}$$

$$\text{Anillo en un medio infinito } R = \frac{\rho}{a\pi^2 b} \ln \frac{8b}{a} \quad \text{ecuación 1.32}$$

## CAPITULO 2.

### 2.1. NORMAS PARA CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA

#### 2.1.1. MATERIALES.

El material de los conductores de puesta a tierra será como se indica a continuación:

a) Conductor del electrodo de puesta a tierra. Debe ser de cobre, aluminio, o aluminio revestido de cobre, de tal manera que sea resistente a toda condición de corrosión, dicho conductor puede ser sólido o cableado con cubierta o desnudo y debe ser instalado en un solo tramo, sin uniones ni empalmes.

Excepciones:

- Se permitirán empalmes en barras.

- Cuando una acometida está compuesta por más de una cubierta, se permitirá conectar con derivaciones al conductor del electrodo de puesta a tierra. Cada una de las derivaciones se extenderá al lado interior de la correspondiente cubierta.

- Se permitirá un empalme o unión del conductor de puesta a tierra sólo si es efectuado por medios irreversibles como el conector del tipo compresión o un proceso de soldadura exotérmica.

b) Tipos de conductores de puesta a tierra de equipos. El conductor de puesta a tierra de equipo instalado con los conductores del circuito será una o más de las siguientes opciones o una combinación de ellas: 1) un conductor de cobre u otro material resistente a la corrosión ( sólido o cableado, aislado, recubierto o desnudo, y en forma de alambre o de barra de cualquier forma); 2) tubería rígida metálica;

3) tubería metálica intermedia; 4) tubería eléctrica metálica; 5) tubería metálica flexible cuando ésta y sus accesorios estén aprobados para la puesta a tierra; 6) la armadura de los cables tipo AC; 7) cable de cubierta mineral aislada y de cubierta metálica; 8) la cubierta metálica de los cables tipo MC o la combinación de esta cubierta con el conductor de puesta a tierra; 9) charolas para cables aprobadas; 10) otras canalizaciones metálicas eléctricamente continuas, específicamente para el propósito de puesta a tierra; 11) una solera o barra según sea permitida.

Excepciones:

-Los tubos y ductos metálicos flexibles se utilizan para la puesta a tierra cumpliendo las siguientes condiciones:

a) Que la longitud de los tubos y los ductos metálicos no sea mayor que 1.80 m (6 pies) o menor para cualquier trayectoria de retorno a tierra.

b) Que los conductores de circuitos contenidos estén protegidos por dispositivos contra sobrecorriente de capacidad nominal de 20 A o menor.

c) Que el tubo o conducto termine con accesorios aprobados para la puesta a tierra.

-Los tubos flexibles herméticos a los líquidos pueden usarse para la puesta a tierra, en los tamaños comerciales de  $1\frac{1}{4}$  y menores, si la longitud total es de 1.80 m o menor para cualquier trayectoria de tierra y si terminan con accesorios aprobados para puesta a tierra y los conductores de circuitos contenidos estén protegidos por dispositivos de sobrecorriente de una capacidad de 20 A o menos para tamaños comerciales de 9 mm ( $\frac{3}{8}$  pulg.) a 12 mm ( $1\frac{1}{2}$  pulg.) y para dispositivos de 60 A o menos, 19 mm ( $\frac{3}{4}$  pulg.) a 32 mm ( $1\frac{1}{4}$  pulg.)

- Solamente para circuitos de corriente directa, el conductor de puesta a tierra del equipo puede instalarse separado de los conductores del circuito

## 2.1.2. INSTALACIÓN.

Los conductores de puesta a tierra deben instalarse como se especifica a continuación:

a) Conductor del electrodo de puesta a tierra. Un conductor de puesta a tierra o su cubierta debe estar fijado de manera segura a la superficie que lo soporta. Un conductor de cobre o aluminio de sección transversal de  $21.15 \text{ mm}^2$  (4 AWG) o mayor estará protegido si está expuesto a fuertes daños materiales. Un conductor de puesta a tierra de sección transversal de  $13.30 \text{ mm}^2$  (6 AWG) que esté libre de daños mecánicos puede correr a lo largo de una superficie de un inmueble, sin cubierta metálica o protección, donde esté rigidamente fijado por grapas a la construcción; en cualquier otro caso debe colocarse un tubo metálico rígido, tubería metálica eléctrica, tubo metálico intermedio, tubo no metálico rígido, o armadura de cable. Los conductores de puesta a tierra de aluminio con cubierta de cobre o aluminio no se deberán usar cuando estén en contacto directo con obras de albañilería, con la tierra o cuando estén sujetos a condiciones corrosivas. Cuando se usen en el exterior, los conductores de cobre o de aluminio cubierto con cobre no se instalarán a una altura menor de 457 mm (18 pulgadas) de la tierra.

b) Cubierta para los conductores de puesta a tierra. La cubierta metálica de los conductores de puesta a tierra deberá ser eléctricamente continua desde el punto de fijación a los gabinetes o equipos hasta el electrodo de puesta a tierra y deberá estar firmemente fijada a la grapa o accesorios de tierra. Las cubiertas metálicas que no sean físicamente continuas desde el gabinete o equipo hasta el electrodo de puesta a tierra deberán hacerse eléctricamente continuas uniendo cada terminación al conductor de puesta a tierra. Cuando el tubo metálico intermedio es usado como protección de un conductor de puesta a tierra, la instalación debe cumplir con los requisitos para canalizaciones.

c) **Conductores de puesta a tierra del equipo.** El conductor de puesta a tierra se instalará de la manera siguiente:

-Cuando consiste de una canalización, charola para cable, armadura de cable o cubierta metálica de cables o de un alambre dentro de una canalización, debe ser instalado de acuerdo a las especificaciones aplicables de esta norma, utilizando accesorios para empalmes y terminales aprobados para ser usados con las canalizaciones. Todas las conexiones, uniones y accesorios deben ser apretados utilizando las herramientas adecuadas.

-Cuando es un conductor de puesta a tierra separado de acuerdo a las excepciones, debe ser instalado conforme a las restricciones en el uso de aluminio y también contra daños mecánicos.

**Excepción:** Los conductores de sección transversal menores de  $13.30 \text{ mm}^2$  no necesitan ser colocados dentro de una canalización o armadura cuando estén colocados en espacios huecos dentro de paredes o tabiques o donde estén instalados de otra manera, pero siempre que no estén expuestos a ningún daño mecánico.

### 2.1.3. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA DE SISTEMAS DE CORRIENTE DIRECTA.

La sección transversal para estos conductores se hará de la siguiente manera:

a) No debe ser menor que el conductor neutro. Cuando un sistema de corriente directa consiste de una unidad de equilibrio de 3 hilos balanceado, o de un devanado balanceado con protección contra sobrecorriente, la sección transversal del conductor de puesta a tierra no debe ser menor que el conductor neutro.

b) No debe ser menor que el conductor más grande. Cuando un sistema de corriente directa es distinto del indicado en el inciso anterior, el conductor de puesta a tierra no debe ser de sección transversal menor que el conductor de mayor sección transversal alimentado por el sistema.

c) No menor que la sección transversal de 8.37 mm<sup>2</sup> (8 AWG). El conductor de puesta a tierra no debe ser en ningún caso, menor de sección transversal de 8.37 mm<sup>2</sup> de cobre o de 13.30 mm<sup>2</sup> (6 AWG) de aluminio.

#### 2.1.4. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CONDUCTOR DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA DE SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA.

El tamaño del conductor del electrodo de puesta a tierra de un sistema puesto o no a tierra de corriente alterna no debe ser menor que el indicado en la siguiente tabla:

Area de la sección transversal del conductor más grande de acometida o su equivalente para conductores en paralelo		Area de la sección transversal del conductor para electrodo de puesta a tierra	
Cobre mm <sup>2</sup>	Aluminio mm <sup>2</sup>	Cobre mm <sup>2</sup>	Aluminio mm <sup>2</sup>
Hasta 33.62	Hasta 53.48	8.367	13.30
más de 33.62 hasta 53.48	más de 53.48 hasta 85.01	13.30	21.15
más de 53.48 hasta 85.01	más de 85.01 hasta 126.7	21.15	33.62
más de 85.01 hasta 177.3	más de 126.7 hasta 253.4	33.62	53.48
más de 177.3 hasta 304.0	más de 253.4 hasta 456.0	53.48	85.01
más de 304.0 hasta 557.4	más de 456.0 hasta 886.5	67.43	107.2
más de 557.4	más de 886.5	85.01	126.7

Tabla 2.1 Conductor para electrodo de puesta a tierra en sistemas de c.a.

**Excepción 1. Sistemas puestos a tierra.**

a) Conectados a electrodos artificiales, la parte del conductor del electrodo de puesta a tierra y el conductor de puesta a tierra del sistema no necesita ser de sección transversal mayor de  $13.30 \text{ mm}^2$  de cobre o de sección transversal de  $21.15 \text{ mm}^2$  de aluminio.

b) Cuando se conecta a un electrodo empotrado en concreto, la parte del conductor de puesta a tierra, que es la única conexión al electrodo de puesta a tierra, no se requiere que sea mayor que la sección transversal de  $21.15 \text{ mm}^2$  de cobre.

c) Cuando se conecta un anillo de tierra, aquella parte del conductor del electrodo que es la única conexión al electrodo de puesta a tierra, no se requiere que sea mayor que el conductor usado para el anillo de tierra.

**Excepción 2. Sistemas no puestos a tierra.**

a) Cuando está conectado a electrodos artificiales, la parte del conductor del electrodo de puesta a tierra que es la única conexión entre el electrodo de tierra y el equipo de acometida no necesita ser mayor que la sección transversal  $13.30 \text{ mm}^2$  de cobre o de sección transversal de  $21.15 \text{ mm}^2$  de aluminio.

b) Cuando es conectado a un anillo de tierra, la parte del conductor del electrodo de puesta a tierra, no se requiere que sea mayor que el conductor del anillo de tierra.

c) Cuando está conectado a un electrodo cubierto con concreto, la parte del conductor de puesta a tierra y que es la única conexión al electrodo de tierra no requiere sea mayor de la sección transversal de  $21.15 \text{ mm}^2$  de cobre.

Nota: Donde se usan múltiples conductores de acometida, el calibre equivalente de acometida más grande se determina por la suma de las áreas de los conductores correspondientes. Cuando no hayan conductores de entrada de acometida, el tamaño del conductor del electrodo de puesta a tierra será determinado por equivalencia con el tamaño del conductor de entrada de acometida que sería necesario para la carga por alimentar.

### 2.1.5 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA DE EQUIPOS.

El calibre de los conductores de cobre, aluminio con recubrimiento de cobre, para la puesta a tierra de equipos, no deberá ser menor que lo indicado en la tabla siguiente.

Capacidad de conducción nominal o ajuste del dispositivo automático de sobrecorriente ubicado antes del equipo, tubería, etc. No mayor en amperes	Sección transversal Cobre		Sección transversal Aluminio	
	mm <sup>2</sup>	AWG KMC	mm <sup>2</sup>	AWG KMC
15	2.082	14	3.307	12
20	3.307	12	5.260	10
30	5.260	10	8.367	8
40	5.260	10	8.367	8
60	5.260	10	8.367	8
100	8.367	8	13.30	6
200	13.30	6	21.15	4
300	21.15	4	33.62	2

Tabla 2.2 Sección transversal mínima de los conductores de puesta a tierra para canalizaciones y equipos.

Capacidad de conducción nominal o ajuste del dispositivo automático de sobrecorriente ubicado antes del equipo, tubería, etc. No mayor en amperes	Sección transversal Cobre		Sección transversal Aluminio	
	mm <sup>2</sup>	AWG KMC	mm <sup>2</sup>	AWG KMC
400	27.67	3	42.41	1
500	33.62	2	53.48	1/0
600	42.41	1	67.43	2/0
800	53.48	1/0	85.01	3/0
1000	67.43	2/0	107.2	4/0
1200	85.01	3/0	126.7	250
1600	107.2	4/0	177.3	350
2000	126.7	250	202.7	400
2500	177.3	350	304	600
3000	202.7	400	304	600
4000	253.4	500	405.4	800
5000	354.7	700	612	1200
6000	405.4	800	612	1200

Tabla 2.2 (continuación) Sección transversal mínima de los conductores de puesta a tierra para canalizaciones y equipos.

Quando los conductores están en paralelo y en canalización múltiple, el conductor de puesta a tierra del equipo, cuando se usa, deben ir juntos. El tamaño de cada uno de los conductores de puesta a tierra del equipo que están en paralelo debe estar basado en la capacidad nominal de corriente de los dispositivos contra sobrecorriente que protegen los conductores de circuito en la canalización y deben estar de acuerdo con la tabla 2.2.

Cuando las secciones transversales de conductores se dimensionan para la compensación de caída de tensión, los conductores de puesta a tierra de equipo, cuando son requeridos, deberán ajustarse proporcionalmente de acuerdo con la escala de medidas de las secciones transversales( AWG).

Cuando se instale un solo conductor de puesta a tierra de equipos para varios circuitos en la misma canalización, se le dimensionará de acuerdo con el mayor de los dispositivos de protección contra sobrecorriente de los circuitos dentro de la canalización.

Cuando los dispositivos de protección contra sobrecorriente consisten de un interruptor con circuito de disparo instantáneo o un motor protector de cortocircuito, el calibre del conductor de puesta a tierra de un equipo se debe basar en el dispositivo de protección de sobrecarga del motor pero no debe ser menor que la sección transversal que se menciona en la tabla 2.2.

Excepción 1. El conductor de puesta a tierra en los equipos no deberá ser menor que la sección transversal de  $0.823 \text{ mm}^2$  (18 AWG) de cobre y no menor que el conductor del circuito, cuando forma parte integral de un conjunto de conductores.

Excepción 2. El conductor de puesta a tierra del equipo no requiere ser mayor que la sección transversal de los conductores de circuito que alimentan al equipo.

Excepción 3. Cuando una canalización o armadura de cable se usa como conductor de puesta a tierra según indica la norma.

## 2.2. APARTARRAYOS

Un apartarrayo es un dispositivo de protección que limita sobretensiones transitorias, mediante la descarga de la onda de sobretensión, luego de lo cual también impide que continúe el flujo de la corriente, permaneciendo hábil para repetir estas funciones.

Cuando se usa en un punto de un circuito, el apartarrayos se debe conectar a los conductores no puestos a tierra. Una instalación sencilla de algunos apartarrayos, permite proteger a un número de circuitos interconectados, hay que tener la precaución de que estos circuitos al desconectarse no queden fuera de la protección del apartarrayos.

Selección de apartarrayos:

a) En circuitos de menos de 1000 V. La tensión del apartarrayos será igual o mayor que la máxima tensión de fase a tierra interrumpida a frecuencia nominal, que se puede tener en el punto de aplicación.

b) En circuitos de 1 kV o más, tipo Carburo de Silicio. La capacidad nominal de un apartarrayos de tipo carburo de silicio no será menor que el 125% de la máxima tensión de fase a tierra que se pueda tener en el punto de aplicació.

Nota: las capacidades nominales de los apartarrayos de óxido metálico se basan en la máxima tensión de operación continua y la magnitud de duración de las sobretensiones en el apartarrayos, cuando es afectado por fallas de fase a tierra, técnicas del sistema de puesta a tierra, ondas por maniobras de interruptores y otras causas, cambios de fuentes de potencia y otras causas.

## Instalación:

Los apartarrayos se podrán instalar en interiores o exteriores y estarán o se harán inaccesibles a personas no calificadas. Los conductores utilizados para conectar el apartarrayos a la línea o barra, con respecto a tierra, no serán más grandes que lo necesario y deberán evitarse curvas innecesarias.

## Conexión:

Instalados en acometidas de menos de 1000 V.

Los conductores de conexión de línea y tierra no serán menores a la sección transversal de  $2.08 \text{ mm}^2$  (14 AWG) de cobre o la sección transversal de  $3.31 \text{ mm}^2$  (12 AWG) de aluminio. El conductor de puesta a tierra se conectará a uno de los siguientes puntos:

- 1) El conductor de puesta a tierra de la acometida.
- 2) El conductor del electrodo de puesta a tierra.
- 3) El electrodo de puesta a tierra para la acometida.
- 4) La terminal de puesta a tierra del equipo en el equipo de la acometida.

Instalado en el lado de la carga de acometida de menos de 1000 V.

Los conductores de conexión de línea y tierra no serán menores que la sección transversal de  $2.08 \text{ mm}^2$  de cobre o de la sección transversal de  $3.31 \text{ mm}^2$  de aluminio. Se permitirá conectar un apartarrayos entre cualquier pareja de conductores (sin conexión a tierra, conductor puesto a tierra, conductor de puesta a tierra). El conductor puesto a tierra y el conductor puesto a tierra solo quedarán conectados por el funcionamiento normal del apartarrayos durante la sobretensión.

Conductores del apartarrayos en circuitos de 1 kV y más. Los conductores entre la línea del apartarrayos y tierra y la conexión de puesta a tierra no serán menores a la sección transversal de 13.30 mm<sup>2</sup> (6 AWG) de cobre o a la sección transversal de 21.15 mm<sup>2</sup> (4 AWG) de aluminio.

Interconexiones en circuitos de 1 kV y más.

El conductor de puesta a tierra de apartarrayos que proteja un transformador que alimenta un sistema secundario de distribución podrá interconectarse como se indica a continuación:

a) Interconexiones metálicas. Se permitirá hacer una interconexión metálica al conductor del circuito secundario puesto a tierra, siempre que adicionalmente a la conexión de puesta a tierra directa al apartarrayos se cumpla lo siguiente:

1. El conductor de puesta a tierra del secundario tenga una conexión a una tubería subterránea de agua. Sin embargo, en áreas con sistemas de tubería de agua urbanos, donde haya al menos cuatro conexiones del neutro a la tubería de agua y no menos de una conexión en cada 400 m (1333.3 pies) de neutro, se permitirá hacer la interconexión metálica al neutro del secundario omitiendo la conexión directa de puesta a tierra del apartarrayos.

2. El conductor puesto a tierra del sistema secundario pertenezca a un sistema neutro de múltiples puestas a tierra, cuyo primario neutro, tenga al menos una conexión a tierra por cada 400 m de líneas, además de la puesta a tierra en cada acometida.

b) A través de un entrehierro o dispositivo. Cuando el conductor de puesta a tierra del apartarrayos no está conectado como se especifica en el inciso anterior o cuando el secundario no está aterrizado como se especifica, pero está aterrizado de

otra forma, la interconexión debe ser hecha a través de un entrehierro o dispositivo aprobado como sigue:

1. Para sistemas primarios no aterrizados o con una tierra, el entrehierro o dispositivo aprobado debe tener una tensión de ruptura de 60 Hz de por lo menos dos veces la tensión del circuito primario pero no necesariamente mayor a 10 kV, y adicionalmente habrá al menos otra puesta a tierra en el conductor puesto a tierra del secundario a no menos de 6 m (20 pies) de distancia del electrodo de puesta a tierra del apartarrayos.

2. Para sistemas primarios de neutro multiaterrizado. La apertura de exposición o el dispositivo aprobado debe tener una ruptura de 60 Hz o más de 3 kV, y deberá haber por lo menos otra tierra más en el conductor de puesta a tierra de secundario, a no menos de 6 m de distancia del electrodo de puesta a tierra del apartarrayos.

c) Permiso especial. Cualquier interconexión entre la tierra, el apartarrayos y el neutro del secundario distinta a la especificada en los incisos anteriores, sólo se permitirá por permiso especial.

### 2.3. LIMITES DE CORRIENTE TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO.

El propósito de los sistemas de tierra es proveer una baja impedancia eléctrica de contacto entre el neutro de un sistema eléctrico y la tierra. Idealmente, el potencial de el neutro de un sistema de tres fases debería ser el mismo que el de la tierra, en este caso seres humanos y animales estarán seguros cuando ellos toquen estructuras metálicas conectadas a los sistemas neutros. Desafortunadamente, la impedancia de los sistemas de tierras hacia la tierra es siempre un número finito. Así el potencial de las estructuras aterrizadas puede ser diferente que el potencial en varios puntos sobre la tierra durante operaciones

anormales. Una operación anormal incluye altas condiciones de operación desbalanceada o condiciones de falla.

Dependiendo de el nivel de diferencia de potencial entre puntos de la tierra y estructuras aterrizadas, pueden ser generadas condiciones peligrosas para seres humanos. Esta condición puede resultar de dos distintas posibilidades:

1. Una persona que toca una estructura aterrizada, la cual tiene un potencial que es diferente al del punto de tierra en el cual la persona estaba parada. En este caso, la persona es expuesta a un voltaje que generará una corriente eléctrica a través de su cuerpo. El voltaje al cual el cuerpo humano es sometido, es llamado voltaje de contacto.
2. Una persona que camina sobre la tierra experimentará un voltaje entre sus pies. Este voltaje generará corrientes eléctricas corporales. En este caso el voltaje al cual la persona es sometida es llamado voltaje de paso.

El flujo de corrientes eléctricas a través del cuerpo humano es una fuente de peligro. Estándares definen límites sobre las corrientes corporales que pueden ser causadas por contacto con estructuras aterrizadas bajo previsible condiciones desfavorables. Por consiguiente, los sistemas de tierra deben ser diseñados de tal manera que la posible corriente eléctrica corporal en un operador o espectador no exceda estos límites bajo cualquier condición desfavorable.

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas debidas a disturbios atmosféricos o fallas del equipo, obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezcan peligro a los operadores o, en general al personal que labora en el recinto. Intensidades del orden de miles de amperes producen gradientes de potencial elevados en la vecindad del punto o puntos de contacto a tierra y, si además se da la circunstancia de que algún ser viviente se apoye en dos puntos, entre los cuales existe una

diferencia de potencial debida al gradiente mencionado, puede sufrir una descarga de tal magnitud que sobrepase el límite de su contractilidad muscular y provoque su caída. En tal situación, la corriente que circula por su cuerpo aumenta y si por desgracia ésta pasa por un órgano vital como el corazón, puede originar fibrilación ventricular y sobrevenir la muerte.

El umbral de percepción se acepta generalmente aproximadamente de 1 millianpere; si el camino de la corriente incluye la mano y el antebrazo, las contracciones musculares, el malestar y el dolor aumentan al crecer la corriente y bastan intensidades de unos cuantos miliamperes para evitar que el sujeto pueda soltar el electrodo agarrado con la palma de la mano, que es la condición de contractilidad mencionada.

Se pueden tolerar intensidades de corrientes superiores, sin originar fibrilación, si la duración es muy corta. La ecuación que liga los parámetros de la intensidad de corriente tolerable y el tiempo que pueda tolerar un organismo es:

$$I_k^2 t = 0.0135 \quad \text{ecuación 2.1}$$

$$I_k = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad \text{ecuación 2.2}$$

en donde  $I$  es el valor efectivo de la corriente que circula por el cuerpo, en amperes y  $t$  es el tiempo de duración del choque eléctrico en segundos, 0.0135 es una constante de energía, derivada empíricamente. Es necesario para una buena comprensión, tomar en cuenta los diversos casos que pueden presentarse al hacer contacto con superficies a diferente potencial. Las diferencias de potencial tolerables se determinan de acuerdo con los conceptos de tensiones de paso, de contacto y de transferencia.

El valor de la resistencia del cuerpo humano  $R_c$  es variable, recomendándose tomar 1000 ohms para la resistencia entre los dos pies y entre pies y manos.

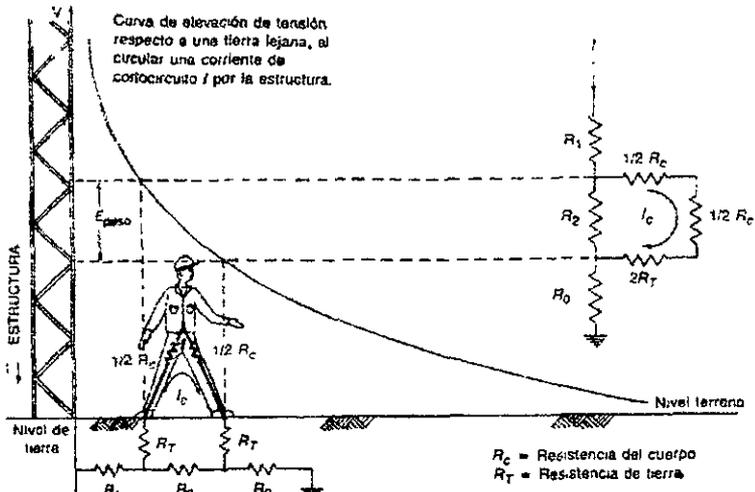


Figura 2.1. Tensión de paso cerca de una estructura conectada a tierra.

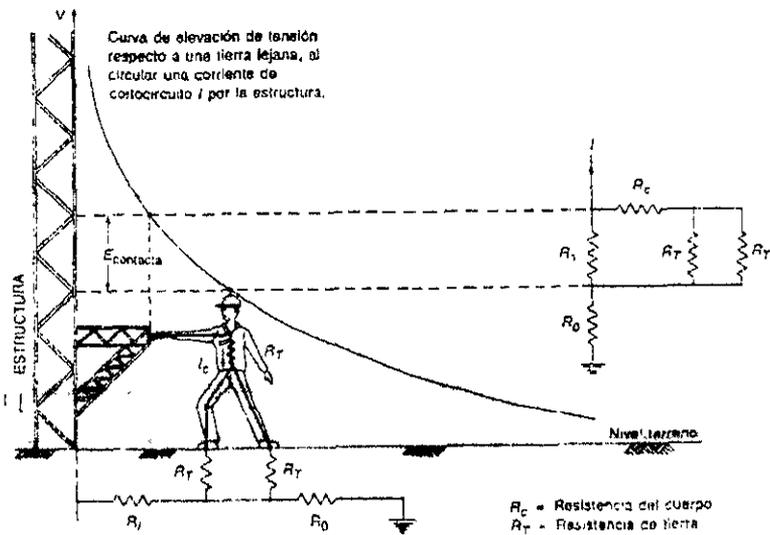


Figura 2.2 Tensión de contacto a una estructura conectada a tierra.

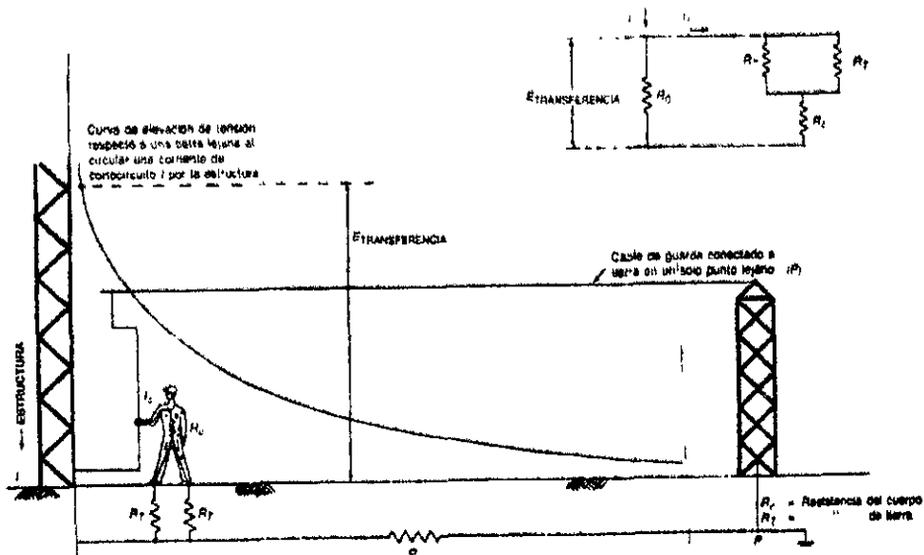


Figura 2.3 Tensión de transferencia

Sustituyendo las constantes apropiadas de los circuitos en cada caso y los valores tolerables de corriente, de la ecuación 2.2 se obtiene:

$$E_{\text{paso}} = (R_C + 2R_T)I_C = (1000 + 6\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad \text{ecuación 2.3}$$

$$E_{\text{paso}} = \frac{116 + 0.7r_s}{\sqrt{t}} \text{ volts} \quad \text{ecuación 2.4}$$

$$E_{\text{contacto}} = \left(R_C + \frac{R_T}{2}\right)I_C = (1000 + 1.5\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad \text{ecuación 2.5}$$

$$E_{\text{contacto}} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{t}} \text{ volts} \quad \text{ecuación 2.6}$$

Como norma, se ha tomado como valor máximo de tensión que puede soportar el cuerpo humano durante un tiempo de 1.2 seg. el valor de 150 V.

#### 2.4. DISPOSICIONES BASICAS DE LAS REDES DE TIERRA

Para las redes de tierra, se han considerado básicamente 3 sistemas:

- Sistema radial
- Sistema de anillo
- Sistema de red

El sistema radial es el más barato pero el menos satisfactorio ya que al producirse una falla en un aparato, se producen grandes gradientes de potencial. Este sistema consiste en uno o varios electrodos a los cuales se conectan las derivaciones de un aparato.

El sistema de anillo se obtiene colocando en forma de anillo un cable de cobre de suficiente calibre (aprox. 1000 MCM) alrededor de la superficie ocupada por el equipo de la subestación y conectando derivaciones a cada aparato, mediante un cable más delgado (500 MCM ó 4/0 AWG). Es un sistema económico y eficiente y en él se eliminan las grandes distancias de descarga a tierra del sistema radial. Los potenciales peligrosos disminuyen al disipar la corriente de falla por varios caminos en paralelo.

El sistema de red es el más usado actualmente en nuestro sistema eléctrico y consiste en una malla formada por cable de cobre (aproximadamente 4/0 AWG)

conectada a través de electrodos de varillas copperweld a partes más profundas para buscar zonas de menor resistividad. Este sistema es el más eficiente, pero también el de mayor costo.

## 2.5. CORRIENTES MAXIMAS DE CORTOCIRCUITO A TIERRA

Para determinar el valor correcto de la corriente de falla a tierra, utilizada en el cálculo del sistemas de tierras, se necesita:

-Determinar el tipo de falla posible a tierra que produzca el máximo flujo de corriente entre la malla del sistema de tierras y la tierra adyacente, y por lo tanto su mayor elevación de potencial y los mayores gradientes locales en el área de la sibestación. Los dos tipos de falla principalmente son:

-Falla monofásica a tierra

-Falla polifásica a tierra

-Determinar por cómputo o por analizadores, el máximo valor efectivo de la corriente simétrica de falla a tierra  $I''$  entre la malla de tierras y la tierra circundante en el instante de iniciarse la falla.

## 2.6. COMPONENTE SIMETRICA DE LA CORRIENTE A TIERRA EN EL INSTANTE DE LA INICIACION DE LA FALLA.

El máximo valor efectivo de la corriente simétrica de falla a tierra  $I''$  se calcula por:

$$I'' = \frac{3E}{3R + 3R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X''_1 + X_2 + X_0)} \text{ amperes ecuación 2.7}$$

En la mayoría de los casos, cuando la resistencia sea despreciable se usa

$$I'' = \frac{3E}{X''_1 + X_2 + X_0} \text{ amperes} \quad \text{ecuación 2.8}$$

donde:

$I''$  = Valor efectivo de la corriente simétrica en el instante en que se indica la falla a tierra, en amperes

$E$  = Tensión de fase a neutro, en volts.

$R$  = Resistencia a tierra estimada del sistema de tierra local de la subestación en ohms.

$R_f$  = Resistencia mínima de la falla en ohms.

$R_1$  = Resistencia de secuencia positiva, en ohms por fase.

$R_2$  = Resistencia de secuencia negativa, en ohms por fase.

$R_0$  = Resistencia de secuencia cero, en ohms por fase.

$X''_1$  = Reactancia subtransitoria de secuencia positiva, en ohms por fase.

$X_2$  = Reactancia de secuencia negativa, en ohms por fase.

$X_0$  = Reactancia de secuencia cero, en ohms por fase.

Los valores de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_0$ ,  $X''_1$ ,  $X_2$  y  $X_0$  son los correspondientes del sistema visto desde el punto de la falla. Los cálculos se efectúan excluyendo las corrientes que no circulan entre el sistema local de tierras y la tierra.

## 2.7. FACTORES DE CORRECCION CONSIDERADOS EN EL CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO.

En el cálculo anterior se usan factores de corrección para la determinación de la corriente de falla a tierra que se considera para el cálculo de sistema de tierras, dichos factores se usan en los siguientes casos:

- Cuando sea necesario tomar en cuenta el efecto del desplazamiento de la onda de corriente por corriente continua y los derechos en las componentes transitorias de corrientes directa y alterna de la corriente de falla.
- Cuando sea pertinente tomar en cuenta los aumentos de las corrientes de falla a tierra debidos al crecimiento del sistema eléctrico.

## 2.8. FACTOR DE DECREMENTO D.

El factor se produce por el desplazamiento de corriente directa y por la atenuación de las componenetes transitorias de corriente alterna y directa de la corriente de falla. Debido a que los cortocircuitos suceden en forma aleatoria con respecto a la onda de tensión y, como el contacto puede existir en el momento en que se inicia la falla, se hace necesario suponer una onda de corriente de falla a tierra asimétrica desplazada 100 % durante el tiempo del choque eléctrico. Como las experiencias para fijar el umbral de fibrilación están basadas en corrientes senoidales simétricas de amplitud constante, es necesario determinar la magnitud efectiva  $I$  de una corriente senoidal equivalente a la onda de falla asimétrica. El valor de  $I$  se determina por la siguiente expresión.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_F^2 dt} = DI'' \quad \text{ecuación 2.9}$$

donde:

$$D = \frac{1}{I} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_F^2 dt} \quad \text{ecuación 2.10}$$

$I$  = Valor efectivo ajustado de la corriente de falla a tierra, en amperes para usarse en los cálculos.

$T$  = Duración de la falla y por lo tanto del choque eléctrico en segundos.

$t$  = Tiempo a partir de la iniciación de la falla.

$i_F$  = Valor efectivo de la corriente de falla a tierra, al tiempo  $t$ .

$D$  = Factor de decremento que toma en cuenta el efecto del desplazamiento de la corriente directa y a la atenuación de las componentes transitorias de corriente alterna y directa de la corriente de falla.

Al aplicar la ecuación anterior, resultan para el factor de decremento  $D$  los valores que se indican en la siguiente tabla:

Factores de decremento	
Duración de la falla y del choque eléctrico $T_{seg}$	Factor de decremento $D$
0.08	1.65
0.10	1.25
0.20	1.20
0.25	1.10
0.50 ó más	1.00

Tabla 2.3 Factores de decremento

Para otros valores de duración intermedia pueden interpolarse linealmente los valores del factor  $D$ .

## 2.9. FACTOR DE SEGURIDAD POR CRECIMIENTO DE LA SUBESTACION.

Se debe tomar un margen adecuado para estimar los aumentos futuros de las corrientes de falla por aumento de la capacidad del sistema eléctrico o por interconexiones posteriores, debido a que las modificaciones posteriores de a la red de tierra resultan costosas y generalmente se omiten dando motivo a introducir inseguridad en el sistema. Este efecto puede tomarse en cuenta disminuyendo la impedancia del sistema o aplicando un factor de seguridad al valor calculado de la corriente de falla.

## 2.10. EFECTO DE LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRA.

En la mayoría de los casos basta con calcular la corriente de falla a tierra despreciando las resistencias. Sin embargo pueden presentarse casos en donde la resistencia predicha del sistema de tierras sea muy alta comparada con la reactancia del sistema que obligue a tomarla en cuenta. Esto implica un problema, pues mientras no esté diseñado el sistema no puede conocerse su resistencia. Este círculo vicioso se puede romper, ya que una vez determinada la resistividad el terreno, la resistencia depende del área del sistema de tierra que normalmente ya se conoce. La resistencia puede estimarse por:

$$R = \frac{\rho}{4r} \quad \text{ecuación 2.11}$$

O con mayor precisión:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad \text{ecuación 2.12}$$

En donde:

$R$  = Resistencia del sistema de tierras de la subestación, en ohms.

$\rho$  = Resistividad media del terreno, en ohms-metro.

$r$  = Radio del círculo que tenga la misma área ocupada por el sistema de tierras, en metros.

$L$  = Longitud total de los conductores del sistema de tierras, en metros.

Esta resistencia es de una fracción de ohm.

## 2.11. EFECTO DE LOS HILOS DE GUARDA

Cuando los hilos de guarda de las líneas aéreas quieran conectarse a la malla de tierra de la subestación, debe tomarse en cuenta que éstos desvían una pequeña porción de la corriente de falla restándosela al sistema de tierras. En vista de que la corriente a tierra se divide en proporción inversa a las resistencias de malla y de los hilos aéreos, es necesario establecer sus valores aunque sea de manera aproximada.

Un hilo de guarda de una línea que esté conectado a tierra en muchos puntos se comporta como un conductor con una impedancia longitudinal  $Z_1$  y con una conductancia transversal  $1/R_2$  y si la línea es de una longitud suficientemente grande, la impedancia equivalente es independiente de la longitud y puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$Z = \sqrt{Z_1 R_2} \quad \text{ecuación 2.13}$$

Por ejemplo, un hilo de guarda de acero, de 70 mm<sup>2</sup> de sección tiene una impedancia longitudinal de aproximadamente 4 ohms/km; si se suponen 3 conexiones a tierra por km de 30 ohms cada una, la resistencia transversal es de

unos 10 ohm/km. El hilo visto desde la fuente aparece como una impedancia de 6.3 ohms, ligeramente inductiva que queda en paralelo con la resistencia propia de la subestación, si se conecta a su estructura. Se observa que  $6.3 > R$  y se puede despreciar en la mayoría de los casos la corriente de tierra que se desvía por los hilos de guarda.

## CAPITULO 3.

### 3.1. METODOS DE CALCULO

#### 3.1.1. METODO CLASICO.

Este método de cálculo está encaminado a dar una solución práctica al diseño de sistemas de tierra basado en establecer límites seguros de diferencias de potencial que pueden existir en una subestación, bajo condiciones de falla, entre puntos que pueden ser tocados por algún ser humano. Sin embargo, es recomendable usar métodos de prueba para verificar la seguridad del sistema de tierras una vez construido.

En el cálculo del sistema de tierra que aquí se presenta, se considera que el sistema está formado por una malla de conductores enterrados horizontalmente.

#### 3.1.2. DISEÑO PRELIMINAR.

Antes de hacer el diseño, es conveniente empezar por la inspección del proyecto de la subestación, referente a la disposición del equipo y de las estructuras. Un cable continuo debe bordear el perímetro de la malla para evitar concentraciones de corriente y por lo tanto gradientes altos en los extremos de los cables. Para formar la malla se colocan cables paralelos, en lo posible, a distancias razonablemente uniformes y a lo largo de las estructuras o alineamiento del equipo, para facilitar las conexiones.

El diseño preliminar debe ajustarse de tal manera que la longitud total de los conductores enterrados, incluyendo las varillas, sea cuando menos igual a la calculada con la ecuación del efecto de resistencia de la red de tierra, para que las diferencias de potencial locales permanezcan dentro de los límites tolerables.

Los conductores de las mallas deben reforzarse en los casos que lo ameriten, para que puedan llevar las corrientes de fallas máximas. Se supone el sistema formado por mallas de cable de cobre enterrado a una profundidad de 0.3 a 0.5 m debajo de la superficie, aproximadamente. En algunas subestaciones instalan varillas verticales de cooperweld de aproximadamente 5/8" de diámetro y de unos 3 metros de longitud, principalmente cuando la resistividad del terreno es alta en la superficie.

### 3.1.3. CALCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR DE LA RED

Cada uno de los elementos del sistema de tierra, incluyendo los conductores de la propia malla, las conexiones y los electrodos, deberá diseñarse de tal manera que:

- Las uniones eléctricas no se fundan o deterioren en las condiciones más desfavorables de magnitud y duración de la corriente de falla a que queden expuestas.
- Los elementos sean mecánicamente resistentes en alto grado, especialmente en aquellos lugares en que queden expuestos a un daño físico.
- Tengan suficiente conductividad para que no contribuyan apreciablemente a producir diferencias de potencial locales.

La ecuación de Onderdonk permite seleccionar el conductor de cobre y la unión adecuados para evitar la fusión, de tal manera que:

$$I = A \sqrt{\frac{\log_{10} \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1}{33S}}$$

ecuación 3.1

en donde:

$I$  = Corriente en amperes.

$A$  = Sección de cobre, en circular mils

$S$  = Tiempo durante el cual circula la corriente  $I$ , en segundos.

$T_m$  = Temperatura máxima permisible, en grados centígrados.

$T_a$  = Temperatura ambiente en grados centígrados.

Pueden suponerse normalmente los siguientes valores:

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

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

$T_m = 450\text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura permisible para la soldadura de latón.

$T_m = 250\text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura permisible para las uniones con conectores.

La siguiente tabla permite seleccionar en forma rápida la sección de cobre necesaria, a partir del tiempo de duración del a falla, basándose en la ecuación anterior.

Tiempo de duración de la falla (seg)	Circular mils por ampere		
	Cable solo	Con uniones de soldadura de latón	Con uniones de conectores
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0.5	5	6.5	8.5

Tabla 3.1. Selección rápida de la sección de cobre

### 3.1.4. CALCULO DE LOS POTENCIALES DE PASO, DE CONTACTO Y DE MALLA DE LA RED DE TIERRA.

Como paso previo para determinar la longitud adecuada del conductor que forma la malla, se hace uso de la ecuación que limita la tensión de contacto ya que las tensiones de paso que se obtienen en instalaciones apropiadas son generalmente menores, y además las resistencias en serie con los pies limitan la corriente a través cuerpo y éste tolera corrientes de magnitud superior a través de las extremidades inferiores.

Las tensiones de transferencia son más difíciles de limitar y generalmente obligan a aislar las partes, o a tratar en forma especial el problema.

Se escogen generalmente las tensiones de contacto a estructuras conectadas a tierra al centro del rectángulo de una malla en vez de las tensiones de contacto de puntos a 1 metro de distancia horizontal al conductor, ya que existen muchas posibilidades de que el objeto tocado a distancias superiores a un metro, esté conectado directa o indirectamente a la malla. Este caso especial de tensión de contacto se llamará tensión de malla. Generalmente es de un valor superior que las tensiones de contacto, a un metro del conductor de la malla.

Para instalaciones con tamaño de conductores, profundidad de enterramiento y espaciamientos dentro de los límites usuales, los valores de las diferencias de tensiones son de las siguientes magnitudes:

$$E_{\text{paso}} = 0.1 \text{ a } 0.15 \rho_1.$$

$$E_{\text{contacto}} = 0.6 \text{ a } 0.8 \rho_1.$$

$$E_{\text{malla}} = \rho_1.$$

$E_{\text{paso}}$  = tensión de un paso, de una distancia horizontal de un metro, en volts.

$E_{\text{contacto}}$  = tensión de contacto a una distancia horizontal de un metro del conductor de la malla de tierra, en volts.

$E_{\text{malla}}$  = diferencia de potencial, en volts del conductor de la malla y la superficie del terreno al centro del rectángulo de la malla.

$\rho$  = resistividad eléctrica del terreno en ohm-metros.

$i$  = corriente, en amperes por cada metro de conductor enterrado, que fluye a tierra.

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

$$E_{\text{malla}} = K_m K_i \frac{i}{L} \rho \quad \text{ecuación 3.2}$$

donde:

$K_m$  = es un coeficiente que toma en cuenta el efecto del número de conductores paralelos  $n$ , el espaciamiento  $D$ , el diámetro  $d$  y la profundidad de enterramiento  $h$  de los conductores que forman la red.

Su valor se calcula como sigue:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \log_e \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \log_e \left[ \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdots \text{etc.} \right] \quad \text{ecuación 3.3}$$

el número de factores en el segundo término es de dos menos que el número de conductores paralelos en la red básica, excluyendo las conexiones transversales.

$K_i$  = es un factor de corrección por irregularidades para tomar en cuenta el flujo de corriente no uniforme de partes diversas de la red.

$\rho$  = es la resistividad media del terreno, en ohm-metros.

$I$  = es la corriente total efectiva máxima, en amperes, que fluye entre la red de tierra y la tierra, ajustada por decremento y crecimiento futuro del sistema.

$L$  = es la longitud total del conductor enterrado, en metros.

Por lo que corresponde al factor de irregularidad  $K_i$ , éste fluctúa entre 1.0 y algo más de 2 como se observa en la figura y depende de la geometría de la red. En la misma figura siguiente están anotados los valores del producto  $K_m * K_i$ . Nótese que los valores más altos resultan en las esquinas de la red, debiéndose al hecho de que la corriente se concentra más en los lados y en las esquinas.

Una vez calculadas las tensiones de paso, de contacto y de malla, y utilizando la longitud aproximada del diseño preliminar, se comparan dichas tensiones con los valores tolerables del cuerpo humano, y en esta forma se sabe si el diseño queda dentro de los límites de seguridad requeridos. En caso de no ser así, se procede a calcular la longitud total del conductor necesaria para caer dentro de los límites de seguridad.

### 3.1.5. CALCULO DE LA LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR.

Igualando el valor de  $E_{malla}$  al máximo valor tolerable del voltaje de contacto, se obtiene:

$$\frac{K_m K_i \rho I}{L} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad \text{ecuación 3.4}$$

De aquí se deduce el valor de  $L$ , o sea, la longitud del conductor enterrado necesaria para mantener la tensión de malla dentro de los límites de seguridad:

$$L = \frac{K_m K_I \rho_i \sqrt{t}}{116 + 0.17 \rho_s}$$

ecuación 3.5

donde:

$\rho_s$  = resistividad del terreno inmediato bajo los pies, en ohms-metro. Toma en cuenta el tratamiento de la superficie que puede tener una resistividad diferente a la del terreno natural.

t = duración máxima de la falla en segundos.

Se dan casos en los que la longitud calculada por la ecuación anterior es demasiado grande, como para ser económicamente realizable, en estos casos es recomendable tomar en cuenta todos los conductores que deriven la corriente de falla, como son: electrodos enterrados, tuberías de agua o cualquier otra tubería de hierro enterrada, así como cimentaciones o redes de tierra que no se habían considerado por ser pequeñas.

En los casos donde los valores de la resistividad del terreno y la corriente de falla sean bajos, la longitud calculada resulta tan pequeña, que se hace difícil hacer las conexiones del equipo a la malla. En estos casos se necesita más conductor que el necesario para el control de los gradientes de potencial en la malla.

### 3.1.6. CALCULO DE LA ELEVACION MAXIMA DEL POTENCIAL DE LA RED Y CALCULO DE LOS POTENCIALES DE PASO EN LA PERIFERIA DE LA MALLA.

El aumento máximo de potencial e la red de tierra sobre un punto remoto de la tierra, se obtiene multiplicando el valor de R de toda la malla, por la corriente total de la falla.

$$E = RI$$

ecuación 3.6

donde  $I$  es la corriente máxima de cortocircuito. De esta ecuación se comprende que para los valores bajos de  $R$  o  $I$ , la elevación de la tensión  $E$ , puede resultar dentro de los valores de seguridad. Si así resultará, no habría necesidad de cálculos adicionales. Generalmente no sucede así y se hace necesario hacer una comprobación de los potenciales locales.

Dentro de la malla, es posible reducir los potenciales de contacto y de paso a cualquier valor deseado, haciendo las erogaciones correspondientes, aún llegando al extremo de reducir los valores de tensión a cero, utilizando una placa sólida. Pero el problema de los potenciales peligrosos fuera de la malla, puede existir aún cuando se utilice una placa sólida.

La ecuación más exacta, para calcular los potenciales de paso fuera de la malla es la siguiente:

$$E_{\text{paso}} = K_s K_i \rho L \quad \text{ecuación 3.7}$$

donde:

$K_s$  = es un coeficiente que toma en cuenta el efecto de número de conductores  $n$  de la malla, el espaciamiento  $D$  y la profundidad de enterramiento  $h$  de los mismos.

Su valor se calcula como sigue:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right] \quad \text{ecuación 3.8}$$

El número total de términos dentro del paréntesis es igual al número total de conductores transversales (los de menor longitud)  $K_i$ ,  $\rho$ ,  $I$  y  $L$  son los parámetros definidos anteriormente.

Generalmente cuando las resistividades de la superficie tanto dentro como fuera de la malla son semejantes, los potenciales de la periferia no resultan peligrosos. Pero cuando la seguridad dentro de la malla se consigue utilizando roca triturada de alta resistividad, colocada en la superficie, colocada en la superficie y si dicha roca no se prolonga fuera del sistema de tierra, los potenciales de paso fuera de la malla pueden resultar peligrosos, esto se puede evitar prolongando fuera de la malla la capa de roca triturada o eliminando esquinas o proyecciones agudas en la malla propiamente.

### 3.1.7. INVESTIGACION DE LOS POTENCIALES DE TRANSFERENCIA

Entre las áreas de la red de tierra y puntos externos existe el peligro de producirse potenciales de transferencia a través de los conductores de los circuitos de comunicación o de señales de los hilos neutros de los circuitos de baja tensión, de los conduits, tuberías, rieles, rejas metálicas etc. El peligro reside generalmente en los potenciales de contacto. La importancia del problema se encuentra en las muy altas diferencias de potencial que pueden resultar, acercándose al valor máximo de elevación de la tensión de la red de tierra durante los cortocircuitos, en contraste con la porción relativamente baja de ella que se observa normalmente de las tensiones de paso y de contacto dentro del área de la malla de tierra. Para estos casos se han diseñado aparatos de protección, como son los transformadores de aislamiento y de neutralización, o se dan recomendaciones de como conectar ciertos elementos de la subestación para evitar estas condiciones peligrosas. Las recomendaciones básicas son las siguientes:

Rieles. Los rieles que entran a una estación no deben conectarse a la red de tierra de la subestación porque transfiere un aumento de potencial a un punto lejano durante un corto circuito. Por el contrario, si la puesta a tierra es un punto lejano, se introduce el mismo peligro pero en el área de la estación. Para eliminar estos

riesgos se aísla uno o más pares de juntas de los rieles, donde éstos salen del área de la red de tierras.

Neutros de los alimentadores o circuitos secundarios de baja tensión. No deben conectarse a la red de tierra de la estación los neutros de los alimentadores o circuitos secundarios de baja tensión, pues al elevarse la tensión de la red durante un cortocircuito, toda la elevación de potencial de la red se transfiere a puntos lejanos como una tensión peligrosa en este hilo conectado a tierra de la estación y la tierra propia del lugar de que se trata. Para eliminar este peligro se aísla de tierra el hilo neutro de baja tensión procurando no reducir el tiempo de libranza de las fallas de baja tensión. Pero al aislar de la estación entre neutro se pueden introducir potenciales remotos a la estación, por lo que debe considerarse este hilo neutro como un conductor vivo, aislado de la red de tierra y además se debe evitar que pueda ser tocado por el personal.

Tuberías de agua. Las tuberías de agua deben conectarse a la red de tierra, preferiblemente en varios puntos. La misma regla debe seguirse con tuberías de gas y con las chaquetas metálicas de los cables que estén en contacto con el terreno. Si la red de tuberías es extensa, contribuye a reducir la resistencia de tierra de la red de tierra.

Edificios. Los edificios construidos dentro del área de la subestación se consideran como parte de la misma, sobre todo si están unidos directamente al edificio de la subestación por tuberías, cables, teléfonos, etc. Si éstos están alejados y no hay estabones conductores, se pueden considerar los edificios con sus propias redes de seguridad locales. Si están alimentados eléctricamente desde la subestación, deben poseer sus propios transformadores de distribución, cuyos neutros secundarios deberán conectarse solamente a la tierra de los edificios considerados.

Bardas metálicas. En las bardas aparecen las tensiones de contacto más peligrosas, ya que por estar en la periferia de la red de tierra aparecen los máximos gradientes de potenciales superficiales. Se recomienda que el perímetro de la malla de tierra se extienda más allá de la reja, a 1 ó 1.5 m fuera de ella para evitar tensiones de contacto peligrosas a personas ajenas a la subestación.

### 3.1.8. PROTECCION EN REDES CON NEUTRO A TIERRA.

Un medio para evitar las tensiones de contacto consiste en la puesta a tierra de la armazón de los aparatos eléctricos o la carcasa de las máquinas eléctricas. En este caso, cuando exista una derivación a tierra, debe desconectarse automáticamente el elemento afectado.

Para que la protección con puesta a tierra sea eficaz, debe procurarse que la tensión de descarga no sea superior a 65 V. Esta condición se logra si se cumplen las siguientes premisas:

a) Resistencia de puesta a tierra en las máquinas conectadas a redes con neutro a tierra:

$$R_T \leq \text{mitad de la tensión a tierra/intensidad de desconexión.}$$

b) Resistencia de puesta a tierra (neutro a tierra) en la subestación transformadora:

$$R_o \leq 65 \text{ V / int. de desconexión del mayor elemento consumidor puesto a tierra.}$$

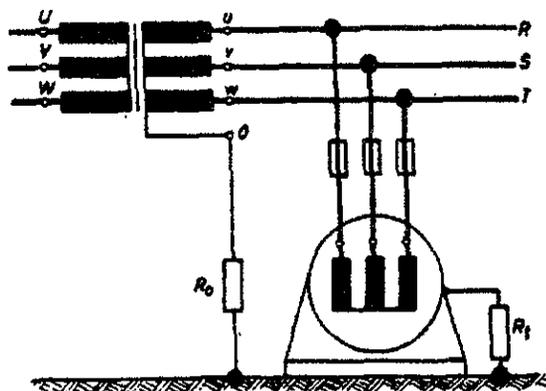


Figura 3.1. Protección en redes con neutro a tierra.

### 3.1.9. RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE MAQUINAS, EN REDES SIN NEUTRO A TIERRA.

Para el cálculo de la resistencia a tierra en las máquinas conectadas a redes sin neutro a tierra, se fija en primer lugar la tensión considerada no peligrosa (65 V) y la intensidad de desconexión. La siguiente fórmula nos permite calcular dicha resistencia:

$$R_T \leq 65 \text{ V} / \text{Intensidad de desconexión.}$$

La intensidad de desconexión no es, como pudiera parecer, la intensidad nominal de la máquina sino la intensidad máxima que puede atravesar la máquina en un momento dado y que viene fijada por la intensidad para la que están calibrados los fusibles. Pero como tiene que evitarse una persistencia de la corriente, superior a 0.2 segundos, se tomará como intensidad la desconexión aquella que haga responder al fusible en el plazo de 0.2 segundos. Para fusibles normales o rápidos, y para intensidades nominales entre 6 A y 25 A, se considera que una corriente 2.5 veces la nominal ya hace funcionar el fusible en 0.2 segundos. En el caso de

fusibles lentos, la respuesta en 0.2 segundos se consigue con una corriente de unas 6 veces la intensidad nominal y será este el valor que tomaremos como intensidad de desconexión.

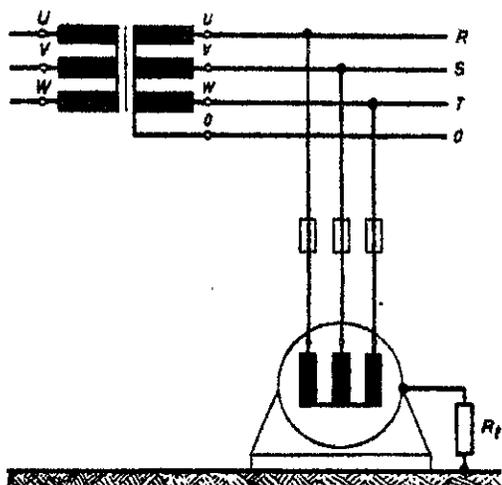


Figura 3.2. Protección en redes sin neutro a tierra.

### 3.1.10. REVISION DEL DISEÑO

En caso de haber hecho el cálculo total para el diseño preliminar y encontrar que la malla puede resultar peligrosa, se hace un nuevo diseño, ajustándose a la longitud calculada por la ecuación correspondiente para caer dentro de los límites de seguridad. En este caso se hacen otra vez todos los cálculos, para revisar si el nuevo diseño resulta seguro. Además de lo anterior, para mejorar la operación de la red de tierra pueden seguirse las siguientes indicaciones:

- a) Reducir la resistencia total de la red reduciendo el aumento de potencial máximo y, por lo tanto, el potencial máximo de transferencia. Hay dos formas de reducirla

que son: aumentar el área de la red, o cuando el área está confinada, usar varillas enterradas y conectar la red a tubos de pozo profundos.

- b) Reducir el espaciamiento de los conductores que forman las mallas acercándose en el límite de la condición de placa metálica. Esto permite eliminar los potenciales peligrosos.
- c) Agregar capas de roca triturada de alta resistividad en la superficie del terreno para aumentar la resistencia en serie con el cuerpo (reduce la corriente por el cuerpo de 10 a 20:1).
- d) Proveer pasos adicionales a las corrientes de falla a tierra por medio de los cables de guarda de las líneas de transmisión, conectándolos a la red de tierra.
- e) Limitar cuando sea posible las corrientes de falla a tierra sin aumentar los tiempos de interrupción, ya que en general este hecho tiene un efecto adverso a la seguridad.
- f) Prohibir el paso a ciertas áreas limitadas, donde sea poco práctico eliminar la posibilidad de que aparezcan diferencias de potenciales excesivas durante las fallas a tierra.

### 3.2. MECANIZACION POR COMPUTADORA.

El cálculo de la red de tierra se puede efectuar también por medio de una computadora. Por medio de este método es posible desarrollar los cálculos de diseño que, aunque no abarcan la totalidad de las consideraciones, sí permite llegar a resultados satisfactorios con mucha mayor rapidez que haciéndolo en forma normal.

### 3.2.1 NOMENCLATURA

Los datos que requiere el programa son:

M = Número de conductores transversales (lado corto).

N = Número de conductores paralelos (lado largo)

X = Longitud de la red, en metros.

Y = Ancho de la red en metros.

I = Corriente de cortocircuito primaria, en amperes

$\rho_s$  = Resistividad de la superficie, en ohm-metro

$\rho_b$  = Resistividad del terreno, en ohm-metro

H = Profundidad de enterramiento, en metros

B = Longitud de conductor adicional, en metros

A = Area ocupada por el terreno de la S:E en metros cuadrados

L = Longitud total del cable de la malla

t = Tiempo de duración del cortocircuito, en segundos.

### 3.2.2 PROCEDIMIENTO DE CALCULO DEL PROGRAMA

El programa funciona de la siguiente manera:

1. Imprime el nombre de la planta o subestación.
2. Lee los datos de la entrada y los imprime.
3. Determina el área del conductor requerida, en circular-mils = (corriente máxima de cortocircuito)  $\sqrt{(82.9)(S)}$ .
4. Compara esta área con las áreas de las secciones de los conductores 2/0, 4/0 AWG, 250 MCM y 500MCM, y determina el calibre del conductor recomendado.

5. Si el calibre del conductor requerido es mayor de 500 MCM imprime el letrero "El calibre del conductor calculado es mayor que 500 MCM" pero usa el diámetro del cable de 500 MCM en el resto de los cálculos.
6. Calcula el potencial tolerable, con el valor inicial de

$$\rho_s = 0. E_{tol} = \frac{116 + 0.17\rho_s}{\sqrt{t}}$$

7. Calcula:

Longitud de la red  $L_r = NX + MY + B + L$  (empezando con  $N = 3$ ).

$$\text{Espaciamiento de la malla} = D = \frac{Y}{N - 1}$$

$$K_m = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{D^2}{16H(\text{Diam. cond.})} \right] + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdots \frac{(2N - 3)}{(2N - 2)} \right]$$

$$K_s = 0.65 + (0.172)N$$

$$E_{\text{malla}} = \frac{[K_m K_i \rho_e I]}{\text{Long. de la red} = L_r}$$

8. Compara  $E_{\text{malla}}$  con  $E_{\text{tolerable}}$ .

Si  $E_{\text{malla}} \geq E_{\text{tolerable}}$ , incrementa  $N$  en uno y regresa al paso (7) para calcular un nuevo valor de  $E_{\text{malla}}$  y continúa hasta que  $E_{\text{malla}} \leq E_{\text{tolerable}}$ .

9.  $E_{\text{malla}} \leq E_{\text{tolerable}}$ , el programa calcula:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2H} + \frac{1}{D+H} + \frac{1}{2D} + \dots + \frac{1}{(N-1)D} \right]$$

$$r_p = \sqrt{\frac{XY}{3.1416}}$$

$$r_s = \sqrt{\frac{A}{3.1416}}$$

$$\text{Resistencia de la malla de la planta} = R_p = \frac{\rho_e}{4r_p} + \frac{\rho_e}{L_r - L}$$

(Cuando hay planta generadora)

$$\text{Resistencia de la red de tierra} = R_s = \frac{\rho_e}{4r_s} + \frac{\rho_e}{L}$$

(De la subestación cuando hay planta generadora).

$$\text{Resistencia total de la red} = R_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_p}} = \frac{R_s \cdot R_p}{R_s + R_p}$$

$$E_{\text{transit}} = R_{\text{eq}} \cdot I$$

10. Imprime los valores de:

Longitud de la red, en ohms.

Resistencia de la red, en ohms.

Número de conductores paralelos.

Espaciamiento de los conductores de la red, en metros.

Potencial tolerable ( $E_{tol}$ ), en volts.

Potencial de la malla ( $E_{malla}$ ), en volts.

Potencial de paso ( $E_{paso}$ ), en volts.

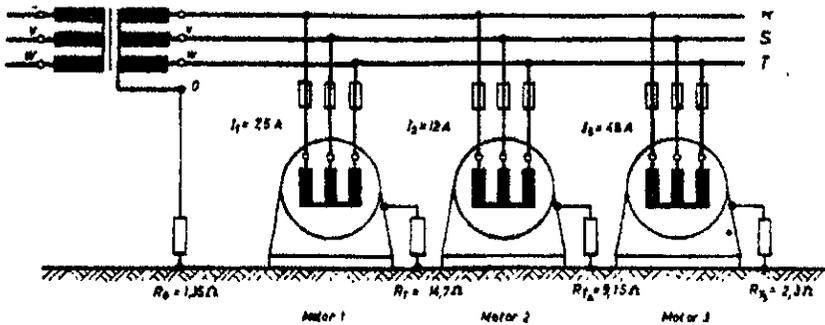
Potencia de transferencia ( $E_{trans}$ ), en volts.

11. Fija los valores de  $\rho_s = 50, 100, 500, 1000, 3000$  y para cada  $\rho_s$  repite los cálculos anteriores empezando desde el paso (6).

## CAPITULO 4.

### 4.1. EJEMPLOS DE CALCULOS DE TIERRAS.

4.1.1. Ejemplo de cálculo de puesta a tierra de tres motores conectados a una red de 380 V. con el neutro puesto a tierra, y cuyas intensidades nominales son, respectivamente 3A, 5A y 8A. El último de los motores lleva fusibles lentos, los otros dos llevan fusibles rápidos.



Solución:

Motor 1. Intensidad de desconexión:  $I_1 = 2,5 \times 3 = 7,5\text{ A}$

$$\text{Valor de la resistencia de puesta a tierra: } R_{T1} \leq \frac{110}{7,5} = 14,7\ \Omega$$

Motor 2. Intensidad de desconexión:  $I_2 = 2,5 \times 5 = 12,5\text{ A}$

$$\text{Valor de la resistencia de puesta a tierra: } R_{T2} \leq \frac{110}{12,5} = 8,8\ \Omega$$

Motor 3. Intensidad de desconexión:  $I_3 = 6 \times 8 = 48\text{ A}$

$$\text{Valor de la resistencia de puesta a tierra: } R_{T3} \leq \frac{110}{48} = 2,3\ \Omega$$

Resistencia de puesta a tierra del neutro de la subestación transformadora:

$$R_{To} \leq \frac{65}{48} = 1.35 \Omega$$

De esta manera, en caso de un defecto a masa del primer motor, la corriente resultante sería:

$$I = \frac{220}{14.7 + 1.35} = 13.8 \text{ A}$$

Si el defecto se produce en el segundo motor:

$$I = \frac{220}{8.8 + 1.35} = 21.6 \text{ A}$$

Si el defecto se produce en el tercer motor:

$$I = \frac{220}{2.3 + 1.35} = 60 \text{ A}$$

Como la caída de tensión en el neutro es de 65 V, y en cada una de las resistencias de 110 V (175 V en total), la caída de tensión para la línea y para el terreno será entonces de:  $220 - 175 = 45 \text{ V}$

4.1.2. Se tienen dos generadores con capacidad de 60 MVA y 10 kV cada uno en conexión en bloque. Los transformadores son de 63 MVA - 10/220 kV cada uno, conexión delta-estrella con la estrella conectada a tierra. La corriente máxima a tierra es de 4000 amperes. La resistividad del suelo es 350 ohm/m, se requiere que la tensión de paso y la de contacto no supere 125 volts. El perímetro de la instalación es un rectángulo de 90 a 210 m.

Solución:

$$P = (2xA \times 2 \times L) = (2 \times 90 \times 2 \times 210) = 600 \text{ m.}$$

Considerando para la malla un 55% de la corriente total de dispersión para el electrodo que está en posición vertical se tiene:

Corriente de dispersión para la malla =  $0.55 \times 4000 = 2200 \text{ A.}$

Corriente de dispersión para el electrodo =  $0.45 \times 4000 = 1800 \text{ A.}$

Cálculo de la longitud de cable conductor que constituye la malla.

De la ecuación  $V_c = 0.7 \frac{\rho I}{L}$        $L = \frac{0.7 \rho I}{V_c}$       donde  $V_c = 125 \text{ volts}$

$I =$  corriente de dispersión

$$L = \frac{0.7 \times 350 \times 200}{125} = 4300 \text{ m}$$

Si consideramos que la profundidad del conductor es 0.50 m, la tensión de paso es:

$$V_p = 0.16 \frac{\rho I}{hL} = \frac{0.16 \times 350 \times 200}{0.50 \times 4300} = 60 \text{ volts}$$

Como se ve este resultado es inferior a 125 volts de tensión de paso considerada como condición del problema.

Cálculo de la resistencia de la malla:

$$R = \frac{2\rho}{\text{perimetro}} = \frac{2 \times 350}{600} = 1.2 \text{ ohms}$$

Los electrodos se entierran en toda la periferia de la malla y deben disipar un 45% de la corriente total a tierra, tienen una resistencia aproximada de :

$$R_{\text{electrodo}} = (\%I_{\text{malla}} / \%I_{\text{electrodo}}) \times R_{\text{malla}}$$

$$R_{\text{electrodo}} = (1.2 \times 55) / 45 = 1.5$$

que se puede lograr empleando de 15 a 16 electrodos tubulares en forma vertical de 13 a 15 cm.

Para reducir el gradiente de tensión en la superficie, el electrodo para esta porción tendrá una profundidad de aproximadamente 2 m. de la superficie del terreno y unido a toda la malla con la terminal del conductor desnudo y conectado debajo de la porción aislada. Por lo tanto, el gradiente de tensión para toda la periferia es de:

$$G_p = \frac{4_p \rho l}{d^2} = \frac{4 \times 350 \times 4000}{52200} = 110 \text{ volts / metro}$$

donde d es la diagonal de la superficie interesada  $d^2 = 90^2 + 210^2 = 52200$ .

4.1.3. Ejemplo de los pasos seguidos en el diseño de la red de tierras de la S.E. Santa Cruz de 400/230 kV.

Se toma como área básica, la ocupada únicamente por el equipo, con la cual se diseña la red de tierras.

a) Diseño preliminar.

El área cubierta por la red de tierras es de 510 m de largo por 240 m de ancho.

Los conductores transversales (los de menor longitud) están espaciados cada 34 m. Los conductores paralelos (los de mayor longitud) estarán espaciados cada 24 m.

$$\text{Superficie } F = 240 \times 510 = 122\,400 \text{ m}^2.$$

Radio equivalente de la superficie total.

$$r_s = \sqrt{\frac{122400}{3.1416}} = 197 \text{ m}$$

Longitud del cable:

Resultan 11 conductores transversales y 7 conductores paralelos.

$$16 \text{ cond. de } 240 \text{ m} = 3\,840 \text{ m}$$

$$10 \text{ cond. de } 510 \text{ m} = 5\,100 \text{ m}$$

$$L = 8\,940 \text{ m}$$

Tiempo de duración de la falla:

Se toma como tiempo de apertura de los interruptores 3 ciclos y un tiempo total de duración de la falla entre 0.1 s y 0.2 s.  $t = 0.2$  s.

Corriente de cortocircuito a tierra:

La potencia de cortocircuito calculada hasta 1990 es de:

$$MVA_{cc} = 7\,500 \text{ MVA (Trifásica y a tierra)}$$

y el voltaje crítico de la subestación  $V = 230$  kV:

$$I_{cc} = 18\,827 \text{ amperes}$$

que es la corriente máxima de cortocircuito que se tiene en la subestación.

Factores:

Se utiliza como factor de decremento  $D$  para  $t = 0.2$  seg. De la tabla se tiene que  $D = 1.20$ .

Factor de crecimiento del sistema = 1.50.

La corriente de cortocircuito para el diseño de la red es:

$$I'' = D \times fc \times I_{cc} = 1.20 \times 1.50 \times 18\,827 = 33\,889 \text{ amperes.}$$

Areas de los conductores:

Area del conductor para duración de la falla de 0.5 s. con uniones con abrazadera = 8.5 amperes.

Area del conductor =  $8.5 \times 33\ 889 = 288\ 000$  circular mils (milésimas de pulgadas circulares = CM). Para los conductores de conexión al equipo se utiliza un calibre de 300 000 CM.

Para los conductores de la malla, haciendo las conexiones en los nodos, se utiliza cable de cobre desnudo (211 600 CM) o No. 4/0 AWG.

Diámetro del cable de 4/0 AWG.  $d = 13.4$  mm.

Resistencia de la red:

Resistividad del terreno (medida)  $\rho_t = 35 \Omega\text{-m}$ .

Si se coloca roca triturada en la superficie,  $\rho_s = 3\ 000 \Omega\text{-m}$ .

Se supone inicialmente una longitud de la red de  $L = 8\ 940$  m.

$$R = \frac{\rho_t}{4r_s} + \frac{\rho_t}{L} = \frac{35}{4 \times 197} + \frac{25}{8940} = 0.044 + 0.0039 = 0.048$$

$R = 0.048$  ohms.

Efecto de los hilos de guarda:

El número de los hilos de guarda que llegan a la subestación son 10, pero conservadoramente se toman 8, por considerar que dos circuitos se puedan encontrar en mantenimiento.

Si el hilo de guarda es de acero de 3/8", su resistencia es:  $Z_1 = 1.8 \Omega/\text{km}$ .

Resistencia equivalente de los hilos de guarda:

$$\text{Base de las torres} = 8 \times 8 = 64 \text{ m}^2.$$

$$\text{Radio equivalente: } B = \sqrt{\frac{64}{3.1416}} = 4.51 \text{ m}$$

Resistencia aproximada de la torre:

$$R_{\text{torre}} = \frac{\rho}{2\pi B} = \frac{35(\text{medida})}{6.28 \times 4.51} \cong 1.23 \Omega$$

Habiendo 3 torres/km

$$R_2 = \frac{1.23}{3} = 0.41 \Omega$$

La impedancia equivalente (hilos de guarda-torres).

$$Z = \sqrt{Z_1 R_2} = \sqrt{1.8 \times 0.41} = 0.86 \Omega$$

8 hilos de guarda representan:

$$Z = \frac{0.86}{8} = 0.11 \Omega$$

Porción de corriente que circulará por la red de tierra:

$$\frac{0.11}{0.11 + 0.048} = 0.696 = 69.6\% \text{ de } I''.$$

En base a lo anterior:

$$I_{\text{red}} = 0.696 \times 33\,889 = 23\,587 \text{ amperes}$$

Elevación de tensión de la red:

$$E = 23\,587 \times 0.048 = 1\,132 \text{ volts}$$

b) Cálculo del potencial de la malla de la red:

Con el diseño original, usando 11 conductores transversales, espaciamiento  $D=34$  m y profundidad de enterramiento  $h=0.50$  m resulta una longitud  $L = 8940$  m.

Potencia de malla:

$$E_{\text{malla}} = K_m K_L \rho_L$$

$$\text{donde } K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdots \frac{27}{28} \cdot \frac{29}{30} \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(34)^2}{16 \times 0.50 \times 0.0134} + \frac{1}{\pi} \ln 0.352$$

$$K_m = 1.083$$

Con un factor de  $K_i = 2.00$

$$E_{\text{malla}} = 1.083 \times 2.00 \times 35 \times \frac{23587}{8940} = 199 \text{ volts}$$

c) Potenciales tolerables al cuerpo humano.

$$E_{\text{paso/tercera}} = \frac{116 \times 0.7 \times 35}{\sqrt{0.2}} = \frac{140}{\sqrt{0.2}} = 314 \text{ volts}$$

$$E_{\text{paso/roca}} = \frac{116 \times 0.7 \times 3000}{\sqrt{0.2}} = \frac{2216}{\sqrt{0.2}} = 4957 \text{ volts}$$

$$E_{\text{contacto/tercera}} = \frac{116 \times 0.17 \times 35}{\sqrt{0.2}} = \frac{122}{\sqrt{0.2}} = 273 \text{ volts}$$

$$E_{\text{contacto/roca}} = \frac{116 \times 0.17 \times 3000}{\sqrt{0.2}} = \frac{626}{\sqrt{0.2}} = 1400 \text{ volts}$$

d) Cálculo de la longitud de cable necesario para tener seguridad dentro de la subestación.

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

Utilizando roca en la superficie:

$$L_{roca} = \frac{1.08 \times 2.0 \times 35 \times 23587 \times \sqrt{0.2}}{116 + 0.17 \times 3000} = 1273m$$

Sin utilizar roca en la superficie:

$$L_{c/terra} = \frac{1.08 \times 2.0 \times 35 \times 23587 \times \sqrt{0.2}}{116 + 0.17 \times 35} = 6533m$$

e) Cálculo del potencial de paso fuera del perímetro de la malla.

$$E_{paso} = K_s K_i \rho_L$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \dots + \frac{1}{10D} \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \times 0.5} + \frac{1}{50 + 0.5} + \frac{1}{2 \times 34} + \frac{1}{3 \times 34} + \dots + \frac{1}{15 \times 34} \right]$$

$$K_s = 0.349 \text{ con } K_i = 2$$

$$E_{paso} = 0.349 \times 2 \times 35 \times \frac{23587}{8940} = 64 \text{ volts}$$

## f) Conclusiones

De los resultados anteriormente obtenidos, comparando la máxima elevación de potencial de la red ( $E_{\text{malla}}$ ) con el potencial mínimo tolerable al cuerpo humano ( $E_{\text{con tierra}}$ ).

$$E_{\text{malla}} = 199 \text{ v} < E_{\text{cont. tierra}} = 273 \text{ v.}$$

Se aprecia que la red de tierras es segura.

Además, se deduce que la malla es segura, al comprobar que la longitud necesaria para estar dentro de la seguridad es menor que la longitud del diseño original.

$$L_{\text{seg.}} = 6533 \text{ m.} < L_{\text{malla}} = 8940 \text{ m.}$$

Al comprobar también que la elevación del potencial de paso fuera de la malla ( $E_{\text{paso tierra}} = 314 \text{ volts}$ ) es menor que el tolerable por el cuerpo humano, con tierra natural ( $E_{\text{paso tierra}} = 314 \text{ volts}$ ) se deduce que hay seguridad y no es necesario adoptar medidas especiales para reducir las elevaciones de tensión.

Con relación a los potenciales transferidos, se deberán tomar las precauciones necesarias para no tener elevaciones de potencial altas, ya que la elevación total de la red es de :

$$E = 1132 \text{ volts}$$

Para que la corriente de soltar quede dentro del límite de 9 miliamperes, se necesita que la corriente permanente satisfaga:

$$K_m K_i \rho_L \left( (1000 + 1.5 \rho_s) \cdot \frac{9}{1000} \right)$$

$$I < \frac{\left( 1 + 1.5 \frac{\rho_s}{1000} 9L \right)}{K_m K_i \rho}$$

$$I < \left[ \frac{1 + 1.5 \frac{35}{1000} 9 \times 8940}{1.08 \times 2 \times 35} \right]$$

$$I < 1120 \text{ amperes}$$

que indica el valor del ajuste mínimo necesario para la operación correcta de los relevadores de tierra.

#### 4.2. CALCULOS CON COMPUTADORA.

El siguiente calculo se hizo para la subestación Sta. Cruz utilizando el programa para computadora descrito anteriormente, en el cual se usó una resistividad del terreno de 13.3 ohm-metro, que es más cercana a la realidad, y se dan como datos 5 conductores transversales

El resultado del programa es el siguiente:

a) Datos

No. de conductores transversales	5.000
Longitud de la malla	510.000 metros
Ancho de la malla	240.000 metros
Long. total de varillas de tierra	0.000 metros
Corriente máx. de corto circuito	35400.007 amperes
Tiempo de duración del cortocircuito	0.200 segundos
Resistividad del terreno	13.300 ohm- metros
Resistividad de la superficie	0.000 ohm- metros
Area total adicional a la red	0.000 metros cuadrad.
Profundidad de ent. de la malla	0.500 metros
Corriente principal de cortocircuito	35400.007 amperes
Long. total adicional a la red	0.000 metros

b) Resultados

Area del conductor calculada	144143.656 Circ-mils
Calibre del cond. recomendado	4/0 AWG
Long. de cond. de la malla	2730.000 metros
Resistencia de la red	0.021 ohms
No de conds. paralelos	3
Espaciamiento de los conds.	120.000 metros
Potencial tolerable...	368.951 volts
Potencial de la malla	359.495 volts
Potencial de paso	64.806 volts
Potencial de transferencia	768.781 volts

Resistividad de la superficie	50.000 ohm- metros
Long. de cond. de la malla	2730.000 metros
Resistencia de la red	0.021 ohms
No. de conds. paralelos	3
Espaciamiento de los conductores	120.000 metros
Potencial tolerable	396.902 volts
Potencial de la malla	359.495 volts
Potencial de paso	64.806 volts
Potencial de transferencia	768.781 volts

Resistividad de la superficie	100.000 ohm- metros
Long. de cond. de la malla	2730.000 metros
Resistencia de la red	0.021 ohms
No. de conds. paralelos	3
Espaciamiento de los conductores	120.000 metros
Potencial tolerable	424.853 volts
Potencial de la malla	359.495 volts
Potencial de paso	64.806 volts
Potencial de transferencia	768.781 volts

Resistividad de la superficie	500.000 ohm- metros
Long. de cond. de la malla	2730.000 metros
Resistencia de la red	0.021 ohms
No. de conds. paralelos	3
Espaciamiento de los conductores	120.000 metros
Potencial tolerable	648.459 volts
Potencial de la malla	359.495 volts
Potencial de paso	64.806 volts
Potencial de transferencia	768.781 volts
Resistividad de la superficie	1000.000 ohm- metros

Long. de cond. de la malla	2730.000 metros
Resistencia de la red	0.021 ohms
No. de conds. paralelos	3
Espaciamiento de los conductores	120.000 metros
Potencial tolerable	927.968 volts
Potencial de la malla	359.495 volts
Potencial de paso	64.806 volts
Potencial de transferencia	768.781 volts
Resistividad de la superficie	3000.000 ohm- metros
Long. de cond. de la malla	2730.000 metros
Resistencia de la red	0.021 ohms
No. de conds. paralelos	3
Espaciamiento de los conductores	120.000 metros
Potencial tolerable	2046.002 volts
Potencial de la malla	359.495 volts
Potencial de paso	64.806 volts
Potencial de transferencia	768.781 volts

**c) Conclusiones:**

Como el programa no toma en cuenta todas las consideraciones del cálculo clásico descrito anteriormente, de los resultados, se ve que la red queda bastante segura con 3 conductores paralelos (los de mayor longitud) y los 5 conductores transversales dados como dato. La longitud mínima que resulta es de 2730 metros, que es inferior al diseño que se hace mención en el ejemplo anterior.

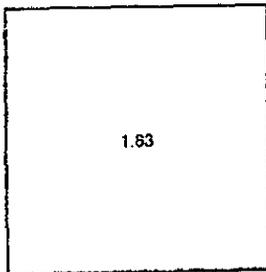
### 4.3. Fórmulas para el cálculo de resistencias a tierra.

(Fórmulas aproximadas incluyendo los efectos de imágenes. Las dimensiones deberán estar en centímetros para obtener la resistencia en ohms).

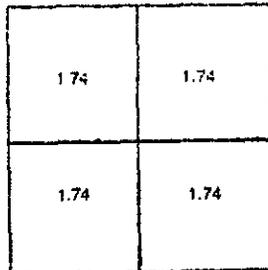
$\rho$  = resistencia específica de la tierra en ohms por cm<sup>2</sup>  
 $a$  = radio  
 $L$  = longitud.  
 $s$  = espaciamiento.

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	FÓRMULA
	Hemisfera, Radio $a$	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
	Una varilla a tierra Longitud $L$ , radio $a$	$R = \frac{\rho}{2\pi L} (\log_e \frac{4L}{a} - 1)$
	2 varillas a tierra $s >$ espaciamiento $s$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{4L}{a} - 1) + \frac{\rho}{4\pi s} (1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots)$
	2 varillas a tierra $s <$ $L$ , espaciamiento $s$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{4L}{a} + \log_e \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots)$
	Alambre enterrado horizontalmente longitud $2L$ profundidad $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{4L}{a} + \log_e \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots)$
	Curva en ángulo recto de alambre longitud de un lado $L$ , prof $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2148 \frac{s}{L} + 0.1035 \frac{s^2}{L^2} - 0.0424 \frac{s^4}{L^4} \dots)$
	Estrella de 3 puntas Longitud de un lado $L$ , prof $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} (\log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209 \frac{s}{L} + 0.238 \frac{s^2}{L^2} - 0.064 \frac{s^4}{L^4} \dots)$
	Estrella de 4 puntas Longitud de un lado $L$ , prof $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} (\log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s}{L} + 0.645 \frac{s^2}{L^2} - 0.145 \frac{s^4}{L^4} \dots)$
	Estrella de 6 puntas Longitud de un lado $L$ , prof. $s/2$	$R = \frac{\rho}{12\pi L} (\log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{s} + 6.851 - 3.128 \frac{s}{L} + 1.758 \frac{s^2}{L^2} - 0.490 \frac{s^4}{L^4} \dots)$
	Estrella de 8 puntas Longitud de un lado $L$ , prof $s/2$	$R = \frac{\rho}{16\pi L} (\log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{s} + 10.98 - 5.51 \frac{s}{L} + 3.26 \frac{s^2}{L^2} - 1.17 \frac{s^4}{L^4} \dots)$
	Anillo de alambre Diám. del anillo, $D$ Diám. del alambre $d$ , prof $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} (\log_e \frac{8D}{d} + \log_e \frac{4D}{s})$
	Placa enterrada horizontalmente Longitud $2L$ , sección $a$ por $b$ , prof. $s/2$ , $b < a < 8$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - s b}{2(a+b)^2} + \log_e \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots)$
	Placa redonda enterrada horizontalmente Radio $a$ , prof $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} (1 - \frac{7a^2}{12s^2} + \frac{33a^4}{40s^4} \dots)$
	Placa redonda enterrada verticalmente Radio $a$ , prof. $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} (1 + \frac{7a^2}{24s^2} + \frac{99a^4}{320s^4} \dots)$

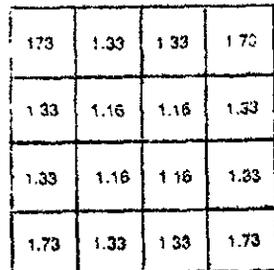
#### 4.4. Tabla para determinar los coeficientes $k_m$ y $k_i$ .



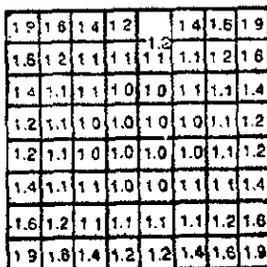
MALLA A



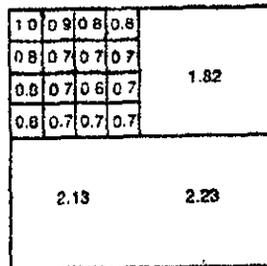
MALLA B



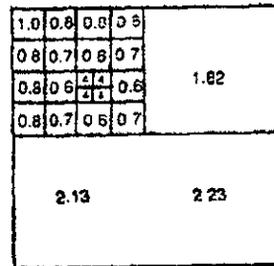
MALLA C



MALLA D



MALLA E



MALLA F

Las cifras en los diagramas son los productos de los coeficientes  $K_m \times K_i$  determinados en datos experimentales obtenidos por Koch.

MALLA	A	B	C	D	E	F
VALOR MÁXIMO DE $K_m \times K_i$	1.83	1.74	1.73	1.80	2.23	2.23
COEFICIENTE $K_M$ CALCULADO POR EL MÉTODO DESCRITO	1.82	1.50	1.18	0.85	1.50	1.50
COEF. $K_i = \frac{K_M \times K_i}{K_M}$ (Experim)	1.00	1.16	1.47	2.21	1.49	1.49

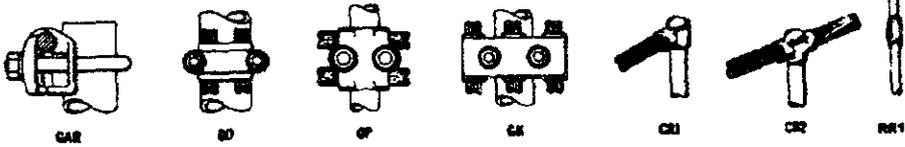
Nótese que los valores de  $K_i$  para las Mallas A, B, C y D pueden calcularse muy aproximadamente por  $K_i = 0.550 + 0.172/n$  en donde "n" es el número de conductores paralelos en una dirección.

Determinación de los coeficientes  $K_m$  y  $K_i$  de la ecuación.

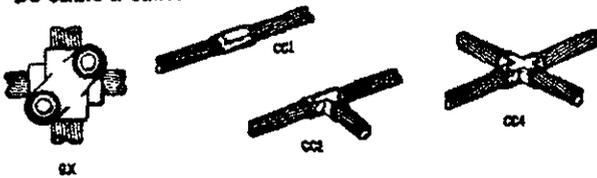
$$E_{malla} = K_m \cdot K_i \rho \frac{l}{L}$$

## 4.5. Conectores de tierra.

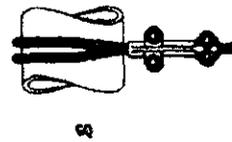
### De cable a varilla o tubería



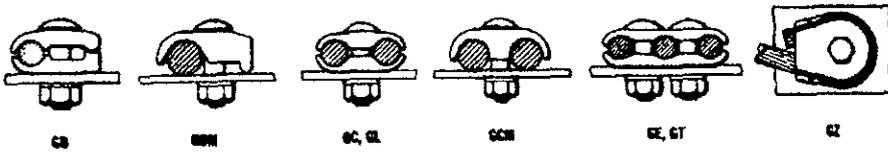
### De cable a cable



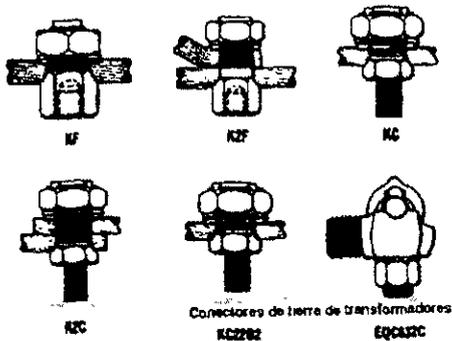
### De cable a tubo



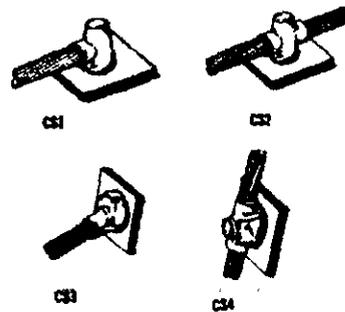
### De cable a barra



### De cable a plano



### De cable a superficie de acero



## Conectores de tierra (continuación).

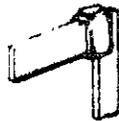
De cable a soporte o  
de bus a bus.



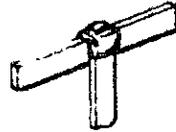
CB1



BB1

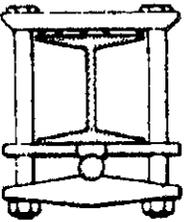


BB2 page 15

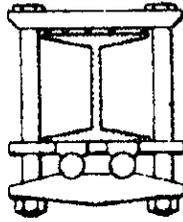


BB3

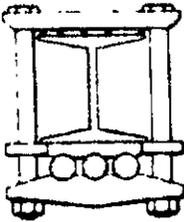
De cable a viga "H"



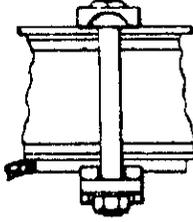
GA-H



GB-H

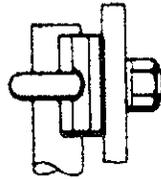


GK-H



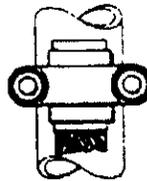
GC-H

De barra a varilla  
o tubo.



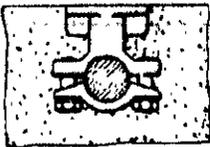
GJ

De brida a varilla  
o tubo.



GG

De barra a cable  
en concreto.



GFG

Aterrizamiento para  
vehículos



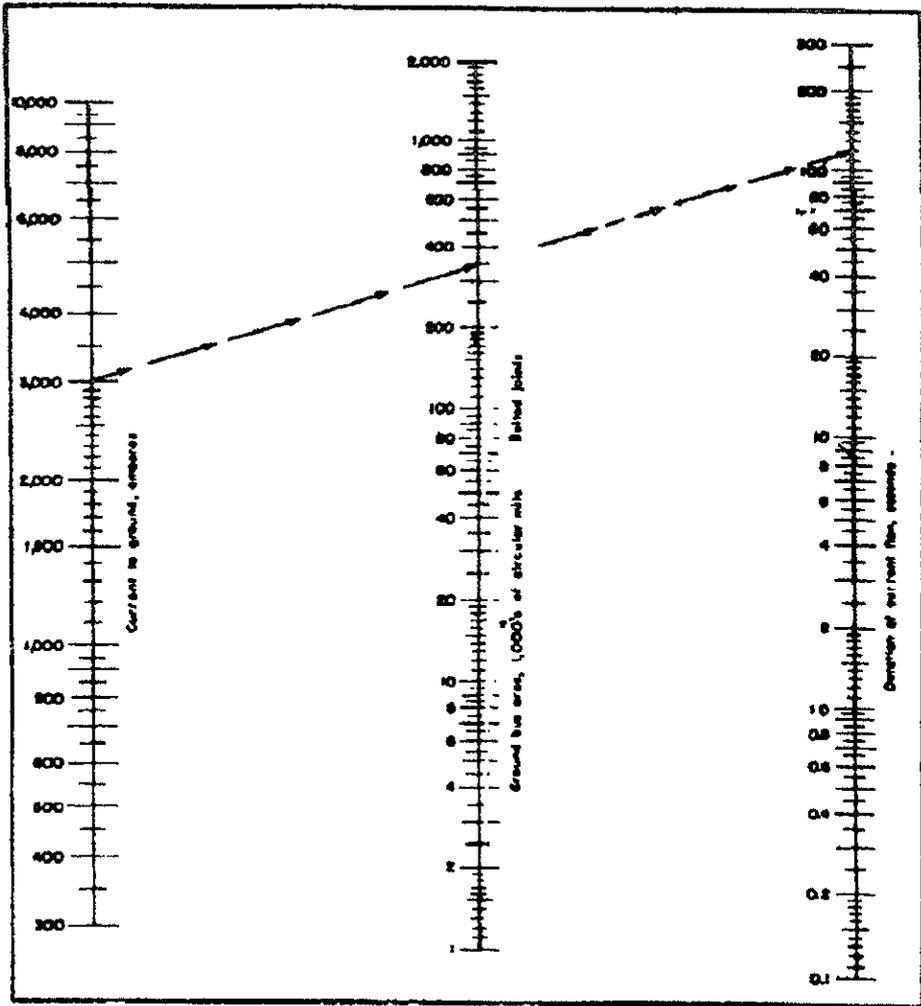
GGE-G

## 4.6. Tabla comercial con rango de cables y medida de la varilla.

Rango de los Cables y Medidas de la Varilla			Número de Parte (Cuerpo Pequeño)
125-150 mm <sup>2</sup>	ø	100-125 mm <sup>2</sup>	81228-1
120 mm <sup>2</sup>	ø	120 mm <sup>2</sup>	
95-120 mm <sup>2</sup>	ø	18 mm rod	81229-1
125-150 mm <sup>2</sup>	ø	13 mm rod	
150 mm <sup>2</sup>	ø	125-150 mm <sup>2</sup>	81230-1
125-150 mm <sup>2</sup>	ø	16 mm rod	
55-75 mm <sup>2</sup>	ø	120-125 mm <sup>2</sup>	81231-1
70-100 mm <sup>2</sup>	ø	100 mm <sup>2</sup>	
38-60 mm <sup>2</sup>	ø	16 mm rod	81232-1
75-100 mm <sup>2</sup>	ø	13 mm rod	
50-55 mm <sup>2</sup>	ø	70-75 mm <sup>2</sup>	81233-1
60-75 mm <sup>2</sup>	ø	60-75 mm <sup>2</sup>	
38 mm <sup>2</sup>	ø	95-125 mm <sup>2</sup>	81234-1
35 mm <sup>2</sup>	ø	100-125 mm <sup>2</sup>	
35-38 mm <sup>2</sup>	ø	13 mm rod	81235-1
25-38 mm <sup>2</sup>	ø	25-38 mm <sup>2</sup>	
18-25 mm <sup>2</sup>	ø	50-55 mm <sup>2</sup>	81240-1
35-38 mm <sup>2</sup>	ø	95-125 mm <sup>2</sup>	
35-38 mm <sup>2</sup>	ø	13 mm rod	81242-1
Rango de los Cables y Medidas de la Varilla			Número de Parte (Cuerpo Grande).
200-240 mm <sup>2</sup>	ø	200-240 mm <sup>2</sup>	81234-1
240 mm <sup>2</sup>	ø	18 mm rod	
150 mm <sup>2</sup>	ø	240 mm <sup>2</sup>	81235-1
180-200 mm <sup>2</sup>	ø	180-185 mm <sup>2</sup>	
180-185 mm <sup>2</sup>	ø	19 mm rod	81236-1
100 mm <sup>2</sup>	ø	240 mm <sup>2</sup>	
120-125 mm <sup>2</sup>	ø	200-240 mm <sup>2</sup>	81238-1
125-150 mm <sup>2</sup>	ø	180-200 mm <sup>2</sup>	
120-150 mm <sup>2</sup>	ø	19 mm rod	81242-1
180-200 mm <sup>2</sup>	ø	16 mm rod	
240 mm <sup>2</sup>	ø	13 mm rod	81242-1
55 mm <sup>2</sup>	ø	240 mm <sup>2</sup>	
80-75 mm <sup>2</sup>	ø	200-240 mm <sup>2</sup>	81242-1
70-75 mm <sup>2</sup>	ø	180 mm <sup>2</sup>	
70-75 mm <sup>2</sup>	ø	19 mm rod	

Torque nominal - 18.1 newton metro.

#### 4.7. Carta para estimación del tamaño del bus de tierra.



La carta permite estimar rápidamente el valor del área transversal requerida para buses de tierra de cobre con uniones mediante pernos o con soldadura de latón.

Ejemplo de uso de la carta.

**Problema:** Un resistor neutro se estima para 3000 amperes durante 2 minutos. Qué tamaño del bus de tierra debe usarse con uniones mediante pernos o pasadores y que tamaño debe usarse con uniones soldadas.

**Solución:** Se parte del valor de 3000 en la escala de corriente y se proyecta a  $(2 \times 60) = 120$  segundos sobre la escala de tiempo, y la intersección en la línea de la escala de área se lee 345 Mcm para uniones con pernos. Para uniones con soldadura de latón de acuerdo con la ecuación (a) se requiere  $(8.7 \times 100 / 10.5) = 83\%$  del área de las uniones con pernos, de aquí  $(0.83 \times 345000) = 286 \text{Mcm}$ . Elevación permitida =  $450^\circ\text{C}$ .

Cuando el valor de la corriente va más allá del rango de la carta, se divide dicho valor por algún número conveniente y se resuelve de la manera descrita anteriormente. Después se multiplica el resultado por el factor que se consideró. Por ejemplo, con un valor de 16000 amperes se divide por 2 y se parte de 8000 amperes para utilizar la tabla, y al final se multiplica el resultado por 2 para obtener el área de sección transversal para un flujo de 16000 amperes.

La carta está basada sobre un valor permitido de  $250^\circ\text{C}$ , por encima de la temperatura ambiente y fué construida específicamente para corrientes de falla de tierra. Las siguientes ecuaciones:

$$\text{a) Para } 250^\circ\text{C } A = 10.5 I \sqrt{S}$$

$$\text{b) Para } 450^\circ\text{C } A = 8.7 I \sqrt{S}$$

proporcionan el área de sección transversal requerida para uniones con pasadores o soldadas respectivamente. En donde  $A$  = área de la sección transversal en circular mils;  $I$  = corriente de falla a tierra, así como el valor del resistor está dado en amperes solo cuando un neutro es aterrizado;  $S$  = duración del flujo de corriente en segundos.

## CONCLUSIONES.

Los principales criterios de diseño para sistemas de tierra consisten en limitar el elevado potencial de tierra de la red de tierra de la subestación a un valor aceptable para alguna condición de falla, además de limitar los voltajes resultantes de paso, contacto y de transferencia, dentro y alrededor de la subestación a valores que estén dentro de los niveles de riesgo aceptables por el ser humano. Estos dos objetivos van interrelacionados, voltajes de contacto, paso y de transferencia son proporcionales al elevado potencial de tierra. En general, el desempeño de un sistema de tierra se determina de un gran número de parámetros tales como: resistividades del suelo en la cercanía de los conductores de tierra sepultados, área y geometría de las rejillas de tierra, estructura y parámetros de los sistemas de potencia interconectados incluyendo conexiones de transformadores, cables de tierra aéreos y tierras de transmisión, cables de contrapeso, etcétera.

Durante una falla de tierra, la corriente fluirá de las estructuras de tierra hacia adentro de la tierra, el nivel de corriente eléctrica hacia la tierra depende de las estructuras de tierra, resistividades del suelo, diseño de los sistemas de potencia, y localización y tipo de la falla. El flujo de la corriente eléctrica en la tierra causa el elevado potencial de tierra y la distribución potencial sobre la superficie de la tierra. La distribución potencial en la tierra determina los voltajes de contacto, paso y transferencia. Los sistemas de tierra son clasificados como seguros si el voltaje de contacto, paso y transferencia, satisfacen los criterios de seguridad postulados. De esta manera, los análisis de sistemas de tierra deben destinarse a los siguientes problemas: determinación de las resistividades del suelo; cálculo del máximo potencial elevado de tierra; cálculo de los voltajes de contacto, paso y transferencia; y la evaluación de seguridad.

## BIBLIOGRAFIA.

Manual de puesta a tierra de equipos eléctricos.

Francisco Ruiz Vasallo.

Ediciones C.E.A.C.

Barcelona, España, 1973.

*Subestaciones Eléctricas.*

Ing. Gilberto Enriquez Harper.

Editorial Harper.

México, D.F., 1971.

Estaciones de Transformación y Distribución.

Protección de Sistemas Eléctricos.

Enciclopedia C.E.A.C. de Electricidad.

Dr. José Ramírez Vázquez.

Ediciones C.E.A.C. S.A.

Barcelona, España, 1974.

Grounding and Shielding in Facilities.

Ralph Morrison, Warren H. Lewis.

Editorial John Wiley and sons.

New York, U.S.A., 1990.

Power System Grounding and Transients.

An Introduction.

A.D. Meliopoulos.

1976.

Norma Oficial Mexicana. 001. SEMP  
Instituto Politécnico Nacional.  
México, D.F., 1994.

Fundamental Considerations on Grounding Currents.  
R. Rudenberg.  
Electrical Engineering.  
1972.

National Electrical Handbook.  
1994.

La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas y el R.A.T.  
Rogelio García Márquez.  
Editorial Marcombo S.A.  
Barcelona, España, 1991.  
Manual Eléctrico Conelec.  
Ediciones Industrias Conelec.  
México, D.F., 1989.

Diseño de Subestaciones Eléctricas.  
José Raul Martín.  
Editorial Mc. Graw Hill.  
México, D.F., 1987.