



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ARAGON”

“ELEMENTOS PARA EL DISEÑO DE  
REDES DE TIERRA EN SUBESTACIONES  
ELECTRICAS”

T E S I S  
Que para obtener el Título de:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P r e s e n t a :  
RAUL DE LUNA ZAMORA

FALLA DE ...

San Juan de Aragón Edo. Méx., Febrero de 1995



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ARAGÓN  
DIRECCIÓN

**RAUL DE LUNA ZAMORA  
P R E S E N T E .**

En contestación a su solicitud de fecha 29 de noviembre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. RAUL BARRON VERA pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado "ELEMENTOS PARA EL DISEÑO DE REDES DE TIERRA EN SUBESTACIONES ELECTRICAS", con fundamento en el punto 6 y siguientes del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, Edo. de Méx. Nov. 30 de 1934  
EL DIRECTOR

M. en C. CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO



- c c p Lic. Alberto Ibarra Rosas, Jefe de la Unidad Académica.
- c c p Ing. Raúl Barrón Vera, Jefe de Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- c c p Asesor de Tesis.

*[Firma manuscrita]*

*[Firma manuscrita]*

CCMCIAR/eva

**A Mi Madre: Que con su sacrificio y enormes abstenciones supo conducirme para la realización de una de nuestras metas.**

**Por brindarme su apoyo y fortaleza en todo momento.**

**Por enseñarme a caminar en el largo trayecto de la vida, superando y venciendo obstáculos.**

**Por su ejemplo de actitud frente a la vida.**

A Mi Padre: Que supo ser guía y modelo de  
esfuerzo y constancia para salir avante en  
los retos de la vida.

Por haberme brindado todo su apoyo y  
carifio, esperando se sienta orgulloso de su  
obra dondequiera que esté.

A Mis Hermanos Rebeca y Jorge: Por que gracias a su sacrificio y comprensión ha sido posible la realización de este su logro y de quienes sé que podré seguir contando con su apoyo de forma desinteresada y leal.

**A la C. Angélica Gómez: Que fue pilar importante en la realización del presente trabajo; porque con su consejo, apoyo e inestimable ayuda me ha permitido superar todo tipo de obstáculos y problemas.**

Al Ing. Raúl Barrón Vera : Por haber  
aceptado ser mi director de tesis y  
brindarme su apoyo en todo momento.

Al Ing. Jesús Morales Rosales: Por haberme  
brindado la oportunidad de colaborar a su  
lado y aprender un poco de su liderazgo.

A Todas Aquellas Personas que han hecho  
posible mi llegada hasta esta etapa de mi  
vida: Gracias por su Amistad, Consejos y  
Apoyo desinteresado en todo momento.

La natural inclinación a determinada actividad de la vida, acompañada de la aptitud para ejercerla, ha de seguirse y realizarse como un deber. Bienaventurado el que lleva a cabo su obra todo lo mejor que puede y cumple fielmente su deber de acuerdo con las obligaciones de su estado, porque si se satisface con el deber cumplido alcanzará la perfección.

Bhagavad Gita, Capítulo XVIII,  
Renuncia y Liberación.

# I N D I C E

<b>CAPITULO I</b>	<b>GENERALIDADES</b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUCCION	1
1.2	CONCEPTOS BASICOS	3
1.3	NATURALEZA Y CAUSA DE LAS FALLAS	9
1.3.1	SOBRETENSIONES DE ORIGEN ATMOSFERICO O POR RAYO	10
1.3.1.1	CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE UNA DESCARGA ATMOSFERICA	10
1.3.2	SOBRETENSIONES POR MANIOBRA DE INTE- RRUPTORES	15
1.3.3	SOBRETENSIONES TEMPORALES	15
1.4	PROTECCION DE PERSONAS Y ANIMALES DE LA CORRIENTE ELECTRICA	17
1.5	IMPORTANCIA DE LAS REDES DE TIERRA EN UNA SUBESTACION ELECTRICA	21
1.6	DIFERENCIA ENTRE UN HILO NEUTRO Y UN HILO DE TIERRA	22
<b>CAPITULO II</b>	<b>ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA SUBESTACION ELECTRICA</b>	<b>25</b>
2.1	INTRODUCCION	25
2.2	DEFINICION Y CLASIFICACION DE LAS SUBES- TACIONES ELECTRICAS	25
2.3	EL TRANSFORMADOR	28
2.3.1	ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UN TRANS- FORMADOR	28
2.3.2	CLASIFICACION DE LOS TRANSFORMADORES	31
2.3.3	CONEXION DE TRANSFORMADORES	34
2.4	INTERRUPTORES DE POTENCIA	37
2.5	RESTAURADORES	40
2.6	CUCHILLAS FUSIBLE	41
2.7	CUCHILLAS DESCONECTADORAS	41
2.8	FUSIBLES	44
2.9	APARTARRAYOS	44
2.10	INSTRUMENTOS ELECTRICOS DE MEDICION Y TABLEROS DE CONTROL	46
2.10.1	AMPERIMETRO	48
2.10.2	VOLTIMETRO	48
2.10.3	WATTMETROS Y VARMETROS	48
2.10.4	FASOMETRO	49

2.10.5	FREQUENCIMETRO	49
2.10.6	TABLEROS ELECTRICOS	49
2.11	TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO	52
2.11.1	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	53
2.11.2	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL	54
2.11.3	GRADO DE PRECISION DE UN TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO	54
2.12	RELACION DE LA SUBSTACION ELECTRICA CON LAS LINEAS DE TRANSMISION Y CENTRALES GENERADICAS	57
 <b>CAPITULO III ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA RED DE TIERRAS</b>		 60
3.1	INTRODUCCION	60
3.2	REDES DE TIERRA	60
3.2.1	REDES DE TIERRA PARA PROTECCION	61
3.2.2	REDES DE TIERRA PARA FUNCIONAMIENTO	61
3.2.3	REDES DE TIERRA PARA TRABAJO	61
3.3	EL TERRENO	62
3.3.1	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	63
3.3.1.1	NATURALEZA DEL TERRENO	63
3.3.1.2	HUMEDAD	66
3.3.1.3	TEMPERATURA	67
3.3.1.4	SALINIDAD	70
3.3.1.5	VARIACIONES ESTACIONALES	70
3.3.1.6	FACTORES DE NATURALEZA ELECTRICA	72
3.4	ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LAS REDES DE TIERRA	72
3.4.1	TOMAS DE TIERRA	72
3.4.1.1	ELECTRODOS O DISPERSORES	73
3.4.1.2	CALCULO DE LA RESISTENCIA DE DISPERSION A TIERRA	74
3.4.1.3	TIPOS DE ELECTRODOS	75
3.4.1.4	INFLUENCIA ELECTROQUIMICA DE LOS ELECTRODOS	88
3.4.1.5	CONDUCTORES Y CONECTORES	90
3.4.1.6	CONDUCTORES DE PROTECCION	93
 <b>CAPITULO IV MEDICION ELECTRICA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO Y PROCEDIMIENTOS UTILES PARA ABATIRLA</b>		 95

4.1	INTRODUCCION	95
4.2	MEDICION ELECTRICA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	95
4.2.1	METODO DE WENNER	95
4.2.2	METODO DE SCHLUMBERGER	98
4.2.3	METODO DE SHEPARD CANES	100
4.3	PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACION DE LOS METODOS ANTERIORES EN LA MEDICION DE LA RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL TERRENO	100
4.4	PROCEDIMIENTO UTILES PARA ABATIR LA RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL TERRENO	108
4.4.1	ELECTRODOS PROFUNDOS	
4.4.2	ELECTRODOS MULTIPLES EN PARALELO	109
4.4.3	TRATAMIENTOS QUIMICOS	109
4.4.3.1	AGREGADO DE SALES SIMPLES	110
4.4.3.2	AGREGADO DE SALES TIPO GEL	111
4.4.3.3	AGREGADO DE CARBON	113
4.4.3.4	AGREGADO DE BENTONITA	114
 <b>CAPITULO V</b>		
	<b>RECOMENDACIONES PARA EL CALCULO PRELIMINAR Y PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LAS REDES DE TIERRA EN SUBESTACIONES ELECTRICAS</b>	<b>116</b>
5.1	INTRODUCCION	116
5.2	DEFINICIONES	116
5.2.1	TENSION DE PASO	120
5.2.2	TENSION DE CONTACTO	122
5.2.3	TENSION DE TRANSFERENCIA	125
5.2.4	TENSIONES DE SEGURIDAD	125
5.3	DATOS PARA EL DISEÑO	127
5.4	PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO	129
5.4.1	CALCULO DE LA RESISTENCIA A TIERRA DESEADA	129
5.4.2	DETERMINACION DE LA MAXIMA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA	130
5.4.3	DISEÑO PRELIMINAR	133
5.4.4	CALCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR	135
5.4.5	CALCULO DE LA LONGITUD DEL CONDUCTOR NECESARIA PARA EL CONTROL DE LOS GRADIENTES	138
5.4.6	CALCULO DEL NUMERO DE VARILLAS A EMPLEAR	143
5.4.7	EFFECTOS DE LA RESISTENCIA DE LA RED	144
5.4.8	CALCULO DE LOS POTENCIALES DE CONTACTO Y DE PASO	147
5.4.9	CALCULO DE LA ELEVACION MAXIMA DE POTENCIAL EN LA RED	149
5.5	INDICACIONES PARA MEJORAR LA OPERACION DE LA RED	150

<b>CAPITULO VI</b>	<b>DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA RED DE TIERRAS EN LA SUBESTACION ELECTRICA DE UNA INDUSTRIA EMPACADORA DE ALIMENTOS</b>	<b>154</b>
6.1	INTRODUCCION	154
6.2	ANTECEDENTES GENERALES DE LA EMPRESA	155
6.3	OBJETIVO DEL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA RED	156
6.4	DATOS PARA EL DISEÑO Y PROCEDIMIENTO PARA EFECTUAR LOS CALCULOS	156
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>171</b>
<b>APENDICE A</b>	<b>ESTUDIO DEL CORTO - CIRCUITO</b>	<b>173</b>
<b>APENDICE B</b>	<b>TABLA DE FORMULAS APROXIMADAS PARA TOMAS DE TIERRA</b>	<b>186</b>
<b>GLOSARIO</b>		<b>187</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>193</b>

## PROLOGO

Después de haber permanecido durante 24 horas con la vista fija en un globo de vidrio, en cuyo interior un filamento incandescente emitía una luz amarillenta, Tomás Alva Edison decidió, hace más de 100 años, que había quedado demostrada la factibilidad técnica del alumbrado eléctrico.

Este acontecimiento dió vida a la industria eléctrica de servicio público, que ha crecido hasta convertirse en la industria que tiene la mayor inversión y sin cuyo producto no se puede concebir una sociedad moderna.

Las líneas de transmisión, subestaciones y redes de distribución conducen la energía eléctrica desde el lugar donde se genera al consumidor. El sistema requiere equipo adicional, destinado a protegerlo y proteger al personal de los riesgos que implica el manejo de volúmenes tan grandes de potencia. Dentro del amplio espectro de dicho equipo pueden mencionarse desde los fusibles caseros, hasta contactos que dan paso o cortan automáticamente el flujo en cables con tensiones cercanas al millón de voltios.

Tal es el caso de la red de tierras en una subestación eléctrica, buscando proteger: al personal operativo contra fallas en el sistema, que puedan provocar un accidente; al equipo constitutivo de la subestación; y la continuidad en el servicio y suministro de la energía eléctrica.

El capítulo I de la presente tesis contiene las definiciones básicas de electricidad.

El capítulo II presenta, en forma clara y sencilla, los distintos elementos que conforman a la subestación eléctrica y su importancia dentro del sistema eléctrico de **Generación - transmisión - consumo**. El capítulo III muestra, a grandes rasgos y en forma precisa, los elementos que conforman una red de tierras. El capítulo IV habla sobre la resistividad eléctrica del terreno y el procedimiento para la medición de la misma, así como algunos métodos para abatirla. El capítulo V sintetiza de forma clara y precisa, el método para el diseño de redes de tierras en subestaciones eléctricas. El capítulo VI, es la aplicación en forma práctica y real del método.

## CAPITULO I

### " GENERALIDADES "

#### 1.1 INTRODUCCION.

Durante algunos años a futuro no se vislumbran cambios notables en las formas convencionales de generación, transformación y utilización de la energía eléctrica; se seguirá generando por los métodos conocidos, incluyendo a las plantas nucleoelectricas.

La transmisión y distribución de la energía eléctrica probablemente no sufrirá cambios sustanciales, y para llevar a cabo esto, no se puede prescindir de la subestación eléctrica.

El transporte de la energía eléctrica a largas distancias se efectúa con pérdidas por efecto joule (  $RI^2$  ). Si la intensidad de la corriente es muy grande, éstas pérdidas son elevadas. La resistencia no puede disminuirse tan fácilmente, por que ello equivaldría a aumentar la sección de los hilos de la línea, lo que resulta extremadamente costoso: se está entonces obligado a disminuir la intensidad de la corriente.

Además, para transmitir la potencia  $P = VI$ , siendo  $V$  la diferencia de potencial en los bornes del generador, hace falta aumentar  $V$  al mismo tiempo que se disminuye  $I$ , a una misma frecuencia de operación.

De ahí la importancia de la subestación eléctrica, ya que tiene la función de modificar los parámetros de la potencia

( tensión y corriente ) suministrados por los generadores para lograr la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias, además de proveer un medio de interconexión y despacho entre las diferentes líneas de un sistema. También, una subestación eléctrica reduce la tensión a valores menores de transmisión para la alimentación de sistemas de subtransmisión, para la distribución de la energía eléctrica en centros industriales y residenciales.

Como se ha visto, una subestación es una parte primordial que interviene en el proceso de **GENERACION-CONSUMO** de energía eléctrica, por lo que es necesario conocer los elementos y conceptos que nos permitan tener una referencia para garantizar: una protección suficiente contra los peligros de la electricidad ( contactos accidentales de las personas con partes normalmente en tensión o con partes normalmente aisladas, pero que puedan quedar con tensión por fallas en el aislamiento); una suficiente continuidad en el suministro de la energía eléctrica y; la duración en la vida útil del equipo desde el punto de vista técnico.

Desde el punto de vista protección, el diseño de una red de tierras en una subestación eléctrica se debe hacer para buscar minimizar los daños causados por una falla y prevenir los peligros derivados de ésta, ya que si no se protege convenientemente al sistema, se pueden tener las siguientes consecuencias:

- Interrupción del servicio, pudiendo llegar a ser interrupciones generales a gran escala.
- Destrucción de las instalaciones y el equipo.
- Daños mecánicos.
- Variación de frecuencia o caídas excesivas de voltaje.

- Daño o muerte de un operario o personal que labore en el recinto por electrocución.

El objetivo es, entonces, la protección del personal operativo, continuidad en el servicio y protección del equipo para buscar y encontrar el punto óptimo de un sistema eléctrico: CONFIABILIDAD Y ECONOMIA.

## 1.2 CONCEPTOS BASICOS.

### INSTALACION ELECTRICA.

Se entiende como el conjunto de aparatos y accesorios destinados a la producción, distribución y utilización de la energía eléctrica.

En su forma más simple, una instalación eléctrica está constituida por un generador, un elemento de transmisión, elementos capaces de abrir y cerrar el circuito, y un centro de consumo ( ver fig. 1.1 ).

### CORRIENTE ELECTRICA.

Es el desplazamiento de las cargas eléctricas de un punto a otro en un conductor o en una región determinada en el espacio. Si una carga neta  $q$  pasa por una sección transversal cualquiera del conductor en un determinado tiempo  $t$ , se llama intensidad de corriente. Sus unidades son los amperes ( ver fig. 1.2 ).

$$i = \frac{dq}{dt} \text{ A}$$

#### VOLTAJE O DIFERENCIA DE POTENCIAL.

Es el trabajo necesario para desplazar la unidad de carga eléctrica de un punto de un conductor a otro. Sus unidades son los volts ( ver fig. 1.3 ).

#### RESISTENCIA ELECTRICA.

Es la oposición que opone todo conductor al paso de una corriente eléctrica, y es una propiedad que depende de las dimensiones geométricas del conductor, del material de que está constituido y de la temperatura. Sus unidades son los ohms ( ver fig. 1.4 ).

#### RESISTIVIDAD.

También llamada resistencia específica, es una constante que depende del material con que está hecho el conductor.

#### LEY DE OHM.

Es la relación de la intensidad de corriente, la diferencia de potencial y la resistencia eléctrica dada por la siguiente expresión:

$$V = R I$$

Donde:

V = Diferencia de potencial.

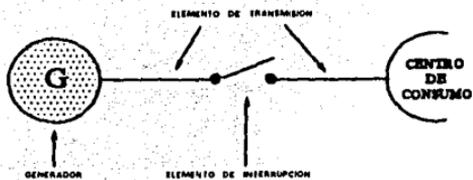


FIG. 1.1 INSTALACION ELECTRICA

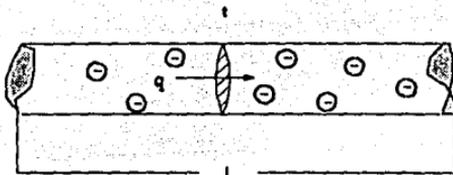
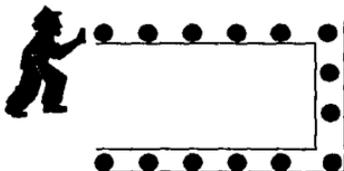
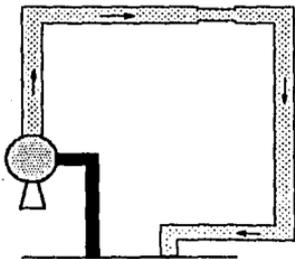


FIG. 1.2 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA CORRIENTE ELECTRICA.



**FIG. 1.3** Simil gravitacional del voltaje, donde el hombre al levantar las bolas de boliche del piso al anaquel hace un trabajo sobre ellas. Las bolas de boliche representan a las cargas en movimiento y el hombre a la diferencia de potencial de llevarlas de un lado hacia otra.



**FIG. 1.4** Flujo de carga comparado con su similitud, flujo de agua producido por una diferencia de presión causada por la bomba. La rapidez de flujo de agua depende de la naturaleza del tubo: ¿Es angosto o ancho? ¿Está vacío? ¿Está lleno de algo? Estas características del tubo son análogas a la resistencia de un conductor.

- I = Intensidad de corriente.
- R = Resistencia eléctrica.

POTENCIA ELECTRICA.

Es el trabajo necesario para transportar una carga  $q$  ( en coulombs ) a través de una elevación de potencial  $V$  ( en volts ) en un tiempo  $t$  ( en segundos ).

DIAGRAMA UNIFILAR.

Es un esquema o dibujo en donde se representan por medio de símbolos convencionales los diferentes elementos integrantes de un sistema eléctrico y su interconexión en una sola fase.

DIAGRAMA TRIFILAR.

Es un esquema o dibujo en donde por medio de símbolos convencionales se representa en forma trifásica los distintos elementos integrantes de un sistema eléctrico y sus interconexiones.

CONDICIONES NORMALES DE OPERACION.

Es cuando un sistema eléctrico está operando correctamente, es decir, no hay interrupciones en el servicio y no existen corto-circuitos o circuitos abiertos en dicho sistema.

**CONDICIONES ANORMALES DE OPERACION.**

Es cuando debido a una causa interna o externa, el sistema está operando incorrectamente.

**CORRIENTE NOMINAL.**

Es el valor de corriente que circula por una instalación o sistema eléctrico en condiciones normales de operación.

**CORRIENTE DE CARGA.**

Es el valor de la corriente que circula por una instalación o sistema eléctrico en condiciones normales de operación, a tensión nominal con valores de carga dados.

**CORRIENTE MAXIMA EN SERVICIO CONTINUO.**

Es el valor máximo admisible de corriente que se prevé en condiciones normales de operación ( sin falla ) en una instalación o sistema eléctrico.

**CORRIENTE DE CORTO-CIRCUITO.**

Es el valor de corriente que se presenta en una instalación o sistema eléctrico cuando se presenta una falla denominada corto-circuito.

**TENSION NOMINAL DE UN SISTEMA TRIFASICO.**

Es la tensión entre fases de designación del sistema a la que están referidas ciertas características de operación del mismo.

### TENSION MAXIMA DE UN SISTEMA TRIFASICO.

Es el valor eficaz de tensión más alto entre fases que ocurre en el sistema en condiciones normales de operación en cualquier momento y en cualquier punto. Esta definición excluye las tensiones transitorias y variaciones de tensión temporales debidas a condiciones anormales del sistema.

### TENSION MAXIMA DE DISEÑO DEL EQUIPO.

Es el valor de tensión entre fases máximo para la cual está diseñado el equipo con relación a su aislamiento.

### **1.3 NATURALEZA Y CAUSA DE LAS FALLAS.**

Los sistemas eléctricos están expuestos a diferentes contingencias llamadas condiciones anormales de operación, debido a que todo sistema está formado por partes creadas por el hombre, que por muy bien diseñadas que estén, pueden fallar en cualquier momento.

Las causas que pueden propiciar una falla pueden ser externas ( debidas principalmente a descargas atmosféricas ) e internas ( propias del sistema ), que producen sobretensiones y que dan origen a corto-circuitos en el sistema eléctrico, originando con esto daño en las instalaciones y en el equipo.

Es importante considerar un análisis breve sobre la naturaleza y características más importantes de las sobretensiones, ya que este tipo de fallas son las más

comunes y que con mayor frecuencia se presentan en un sistema eléctrico.

Las sobretensiones que se pueden presentar en un sistema eléctrico pueden ser:

### **1.3.1 SOBRETENSIONES DE ORIGEN ATMOSFERICO O POR RAYO.**

Estas sobretensiones son debidas a las descargas atmosféricas, y por lo general se manifiestan inicialmente sobre las líneas de transmisión de un sistema eléctrico, pudiendo ocurrir:

- Por descargas directamente sobre la línea de transmisión ( ver fig. 1.5 ).
- Por descargas sobre las estructuras ( torres ), y sobre los hilos de guarda en las líneas de transmisión ( ver figs. 1.6 y 1.7 )
- Por descargas a tierra en las proximidades de la línea ( ver fig. 1.8 ).

#### **1.3.1.1 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE UNA DESCARGA ATMOSFERICA.**

La formación de las nubes moviéndose a través de la tierra, adquieren grandes cargas positivas y negativas. El proceso por el cuál éstas se cargan es únicamente especulación. Es suficiente decir que la carga de la nube es extremadamente grande y cuando se aproxima a la tierra, la nube actúa como un lado de un capacitor, la tierra como el lado opuesto y el aire entre ambos como dieléctrico ( ver fig. 1.9 ).

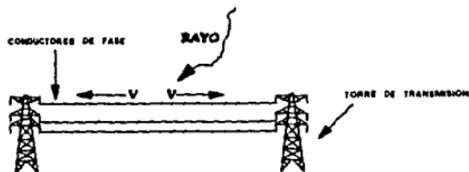


FIG. 1.6 REPRESENTACION DE UNA DESCARGA ATMOSFERICA DIRECTAMENTE SOBRE LA LINEA DE TRANSMISION

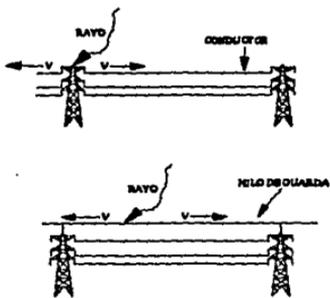


FIG. 1.6 Y 1.7 DESCARGA ATMOSFERICA SOBRE LA TORRE DE TRANSMISION Y EL RELO DE GUARDA RESPECTIVAMENTE.

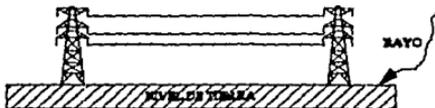


FIG. 1.8 DESCARGA ATMOSFERICA EN LA PROXIMIDAD DE LA LINEA DE TRANSMISION.

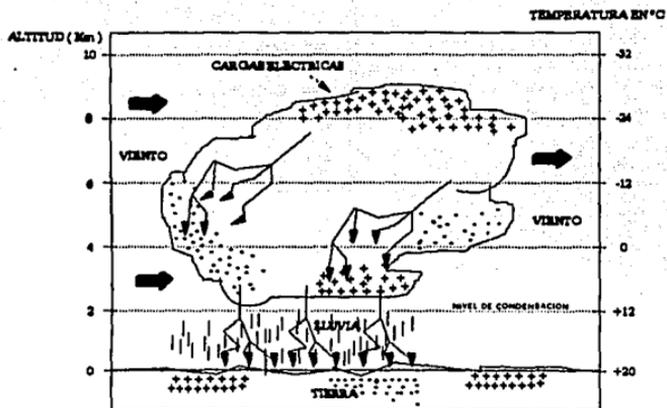


FIG. 1.8 REPRESENTACION DEL ORIGEN DE UNA DESCARGA ATMOSFERICA.

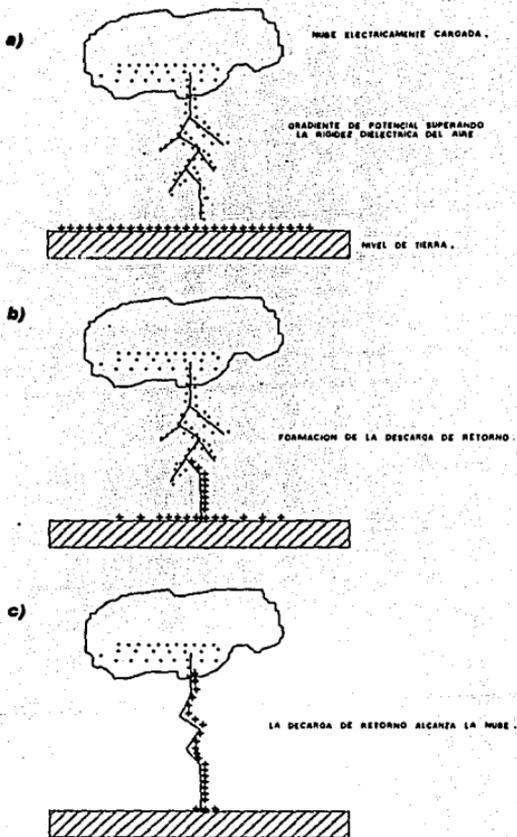
La diferencia de potencial entre la nube y la tierra se hace lo suficientemente grande para que la nube envíe hacia abajo un canal de aire ionizado, llamado predescarga de ionización, por lo general luminiscente. La velocidad media de propagación de esta predescarga tiene una magnitud de tiempos entre dos ondas sucesivas del orden de 0.15 m/microsegundos ( ver fig. 1.10 a ).

La punta de la predescarga se considera como una fuerte concentración de cargas, en el aire se crea un intenso campo electrostático, ésta misma origina un cierto número de descargas por efecto corona en el área ionizada. Cuando el canal más lejano de la descarga se acerca a tierra, se verifica una fuerte concentración de cargas en el punto del suelo, el aire ionizado forma un canal perfecto para que las cargas eléctricas saliendo de la tierra sigan éste camino con el fin de neutralizar a la nube ( ver fig.1.10 b ).

El encuentro entre cargas provenientes del suelo se da a una altura que se estima está entre 15 y 20 m. del nivel del suelo, es en este punto donde se produce el rayo ( descarga y retorno, ver fig. 1.10 c ).

La descarga de retorno es aquella que interesa de modo particular desde el punto de vista de la protección en las instalaciones eléctricas, ya que si el fenómeno antes descrito sucede en las inmediaciones o sobre dichas instalaciones, la trayectoria de la descarga es más fácil que ocurra sobre el hilo de guarda o a los propios conductores que a tierra.

Aproximadamente un 90 % de las corrientes del rayo son negativas ( nube negativa, suelo positivo ), y un 10 % con



FIGURAS 1.10 a), 1.10 b) y 1.10 c)

polaridad contraria, pero éstas representan las más severas, encontrándose magnitudes de corriente entre 5 y 100 kA; se han llegado a registrar corrientes hasta de 200 kA.

### **1.3.2 SOBRETENSIONES POR MANIOBRA DE INTERRUPTORES.**

Estas ondas de sobrevoltaje son debidas a las maniobras que se realizan en la conexión y desconexión de interruptores. Tales sobretensiones tienen por lo general un alto amortiguamiento y muy corta duración.

### **1.3.3 SOBRETENSIONES TEMPORALES.**

Es una sobretensión oscilatoria en un punto dado del sistema, que tiene una duración relativamente grande, la cuál no está amortiguada o tiene un débil amortiguamiento.

Estas sobretensiones, por lo general, están originadas por operaciones de maniobra o fallas ( rechazos de cargas, fallas de fase a tierra), y por efectos de no linealidades ( efectos de ferorresonancia y armónicas ). Una idea estadística de las fallas se da a continuación:

PARTE DEL SISTEMA	% TOTAL DE FALLAS
LINEAS AEREAS	50
CABLES SUBTERRANEOS	10
INTERRUPTORES	15
TRANSFORMADORES DE POTENCIA	12
TRANSF. DE POTENCIAL Y CORRIENTE	2
EQUIPO DE CONTROL	3
EQUIPOS VARIOS	8

TABLA 1.1

Es importante notar que el 50 % de las fallas ocurre en las líneas de transmisión y se manifiestan en forma de cortocircuito. La distribución de ocurrencia de fallas de cortocircuito tiene la forma siguiente:

FALLA DE FASE A TIERRA	85 % DE OCURRENCIA
FALLA DE LINEA A LINEA	8 % DE OCURRENCIA
FALLA DE 2 LINEAS A TIERRA	5 % DE OCURRENCIA
FALLA TRIPASICA	2 % DE OCURRENCIA

TABLA 1.2

Como se puede observar, las fallas de línea a tierra son muy comunes y pueden ser causadas en distintas formas ( como

se ha visto ); no así la falla trifásica, cuyo principal origen son los errores humanos.

Es importante considerar las causas y efectos, así como la probabilidad de ocurrencia para aplicar los criterios necesarios para proteger convenientemente al sistema y asegurar que las tensiones resultantes no ofrezcan peligro al personal operativo.

#### **1.4 PROTECCION DE PERSONAS Y ANIMALES DE LA CORRIENTE ELECTRICA.**

La conducción de altas corrientes en las instalaciones eléctricas provenientes de una falla, obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezcan un peligro al personal que labora en el recinto.

Por lo anterior, las personas y animales deben de ser protegidos de los peligros que representa la corriente eléctrica cuando la instalación se encuentra bajo condiciones anormales de operación.

El factor decisivo de la peligrosidad es, en esencia, la intensidad de corriente que circula a través del cuerpo de una persona o animal. En el caso de bajas intensidades, el resultado tan sólo es un calambre muscular, pero si pasa por el corazón, se producen fibrilaciones ventriculares que pueden degenerar en una parálisis cardíaca.

La intensidad de corriente eléctrica que circula a través del cuerpo está relacionada con la tensión a la que se encuentra sometido dicho cuerpo, y ésta a su vez, con la

resistencia óhmica de la parte del cuerpo que queda en contacto con los potenciales diferentes. Si se conoce el valor de la resistencia óhmica del cuerpo humano, se podrán establecer los límites de tensión que no ofrezcan peligro. Esta resistencia es muy variable, y depende de si el contacto con potenciales diferentes es en piel húmeda o seca, si es a través de zapatos o ropa, de la parte del cuerpo que se inserte en el circuito, o de circunstancias momentáneas como estados del cuerpo. La digestión o el estado de ánimo influyen notablemente en abatir la resistencia del cuerpo humano. Además, el tejido humano tiene una característica negativa de resistencia, es decir, la resistencia del cuerpo disminuye al aumentar la corriente y el tiempo de contacto.

Según ensayos llevados a cabo por el grupo médico de la UNIPEDA ( Unión Internacional de Productores de Energía Eléctrica ), muestra los efectos ( tabla 1.3 ) que causan en el hombre los distintos niveles de corriente que circulan por su cuerpo. Así mismo presenta una gráfica representativa ( fig. 1.11 ) que indica los niveles de corriente en amperes que puede soportar el ser humano.

Con base a lo anterior, todas las autoridades están de acuerdo en que pueden ser toleradas intensidades de corrientes superiores en el cuerpo humano sin producir fibrilación si la duración del flujo de corriente es muy corto. La ecuación que liga los parámetros de la intensidad de corriente tolerable y el tiempo en que ésta puede ser tolerada por el organismo es :

$$I_r^2 t = 0,013456$$

<b>Corriente Circulante en el cuerpo humano ( mA )</b>	<b>Efectos</b>
1	Imperceptible para el hombre.
2 - 3	Sensación de hormigüeo.
3 - 10	El sujeto consigue generalmente desprenderse del contacto. De todas formas la corriente no es mortal.
10 - 50	Los músculos de la respiración se afectan por calambres que pueden provocar la muerte por asfixia.
50 - 500	Corriente peligrosa en función de la duración del contacto, que da lugar a la fibrilación cardíaca. Posible muerte.
Más de 500	Disminuye la posibilidad de fibrilación, pero aumenta el riesgo de muerte por parálisis en los centros nerviosos.

TABLA 1.3

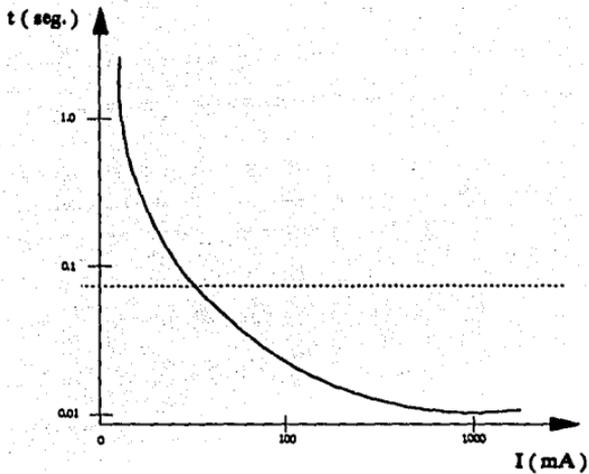


FIG. 1.11 GRÁFICA REPRESENTATIVA DE LOS NIVELES DE CORRIENTE EN AMPERES QUE PUEDE SOPORTAR EL SER HUMANO.

de donde:

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

$I_k$  = Es el valor eficaz ( r.m.s. ) de la corriente que circula por el cuerpo, en amperes.

t = Es el tiempo de duración del choque eléctrico en segundos.

0.116 = Es una constante de energía, derivada empíricamente.

La ecuación anterior no es válida para tiempos muy grandes, y está basada en pruebas hasta de 3 segundos, por lo que se recomienda la conexión a tierra de todo sistema eléctrico para disminuir la posibilidad de un choque eléctrico producido por las corrientes nocivas que en un momento de falla pueden llegar a circular por elementos que normalmente no están energizados.

#### 1.5 IMPORTANCIA DE LAS REDES DE TIERRA EN UNA SUBESTACION ELECTRICA.

En fechas recientes, se ha preferido conectar los sistemas eléctricos sólidamente conectados a tierra, el propósito que persigue el diseño meticoloso de una red de tierras para una subestación eléctrica es :

- Protección del personal operativo que labora en el recinto.
- Protección de los equipos e instalaciones contra las tensiones peligrosas.

- Asegurar la actuación de las protecciones eléctricas.
- Dar mayor confiabilidad y continuidad en el servicio eléctrico.

En relación al contenido sobre este tema, las Normas Técnicas Para Instalaciones Eléctricas ( NTIE ), indica que el objetivo de la red de tierras es : " El de dispersar en el terreno ( suelo o subsuelo ) las corrientes eléctricas nocivas y reducir las a un potencial que tienda al valor cero, con lo cual se disminuyen o se evitan daños al personal o al equipo".

El contacto accidental de un cuerpo metálico no conectado a tierra y un circuito eléctrico ( energizado ), eleva el potencial de dicho cuerpo al mismo potencial que tiene el circuito con respecto a tierra, condición de peligro para un operario si hace contacto accidental con este cuerpo. Al efectuar la conexión a tierra se evita la elevación del potencial del cuerpo, de tal manera que si es tocado accidentalmente por un conductor energizado o el sistema en condiciones anormales de operación, la diferencia de potencial que se desarrolla momentáneamente no es lo suficientemente alta como para representar un peligro para el personal operativo.

#### **1.6 DIFERENCIA ENTRE UN HILO NEUTRO Y UN HILO DE TIERRA.**

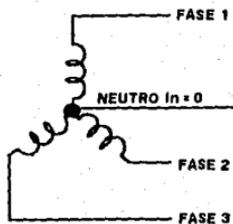
En el estudio de las redes de tierra, es importante considerar la diferencia que existe entre el hilo neutro y el hilo de tierra en los sistemas eléctricos.

El hilo neutro se forma de la unión de los conductores de fase de un instalación eléctrica conectada en estrella( ver

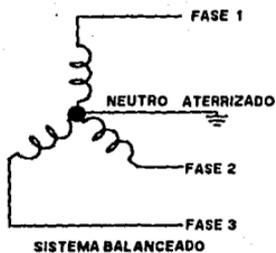
fig. 1.12 a ), su principal función es la de proporcionar la dualidad de tensiones en estas instalaciones; por lo que en condiciones normales de operación se presenta circulación de corriente ( llamada corriente de retorno ). Al conductor neutro se le considera con potencial nulo con respecto a los conductores de fase ( si el sistema está balanceado ), pero esta condición es difícil de mantener en la práctica. En un sistema desbalanceado, el hilo neutro debe soportar la corriente de desbalanceo, que es igual a la corriente que circula por la fase más cargada( ver fig. 1.12 c ).

Por el contrario, el hilo de tierra es aquél que se conecta al blindaje de los equipos eléctricos, y este a su vez con la red de tierras que se encuentra en contacto directo con el suelo o subsuelo. El objetivo de el hilo de tierra es el de proporcionar un camino de baja impedancia para conducir las corrientes nocivas que se presentan en un sistema eléctrico y así evitar la diferencia de potenciales peligrosos que se presenten en el momento de la falla.

Se puede presentar, en algunas ocasiones, una diferencia de potencial entre el hilo neutro y el hilo de tierra, para evitar esto, debe conectarse a tierra el hilo neutro, reduciendo con esto las resistencias con valores tendientes a cero. Además, un hilo neutro aterrizado tiene la función de fijar el centro del sistema eléctrico conectado en estrella para ayudar, en cierto modo, a su balanceo( ver fig. 1.12 b ).



a)



b)



c)

FIGURAS 1.12 a), 1.12 b) y 1.12 c)

**CAPITULO II****" ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA SUBESTACION ELECTRICA "****2.1 INTRODUCCION.**

En el empleo de la energía eléctrica, ya sea para fines industriales, comerciales o residenciales; intervienen una gran cantidad de máquinas y equipo eléctrico.

Un conjunto de equipo eléctrico utilizado para este fin determinado se le conoce con el nombre de **SUBESTACION ELECTRICA**.

Es conveniente, entonces tener una idea de cuáles son los componentes que constituyen una subestación eléctrica para reconocer la importancia de ésta dentro de una instalación eléctrica.

**2.2 DEFINICION Y CLASIFICACION DE LAS SUBESTACIONES ELECTRICAS.**

**DEFINICION.-** Una subestación eléctrica es un conjunto de elementos o dispositivos ( máquinas, aparatos y circuitos ) que tienen la función de modificar los parámetros de energía eléctrica ( voltaje, corriente y frecuencia ) en corriente alterna o corriente continua; o bien conservarle dentro de ciertas características, además de proveer un medio de interconexión y despacho entre las diferentes líneas de un sistema.

Las subestaciones eléctricas se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.- Por su operación.

- a) De corriente alterna.
- b) De corriente continua.

2.- Por su función o servicio.

a) SUBESTACIONES PRIMARIAS ELEVADORAS. Se encuentran adyacentes a las centrales eléctricas o plantas generadoras de electricidad. Modifican los parámetros de potencia de un generador, ya que éste tiene por lo general capacidad de suministro de entre 5 y 25 kV y la transmisión, dependiendo del volumen de energía y la distancia, se puede efectuar a 69, 85, 115, 138, 230 y 400 kV; en algunos países se emplean tensiones de transmisión de 765, 800 y hasta 1200 kV en C.A.

b) SUBESTACIONES RECEPTORAS - REDUCTORAS PRIMARIAS. Estas son alimentadas directamente de las líneas de transmisión, y reducen la tensión a valores menores para alimentar sistemas de subtransmisión o redes de distribución, de manera que, dependiendo de la tensión de transmisión pueden tener en su secundario tensiones de : 115, 69, 34.5, 13.2, 6.9 y 4.16 kV.

c) SUBESTACIONES RECEPTORAS ELEVADORAS-REDUCTORAS SECUNDARIAS. Son aquellas que alimentadas por las redes de subtransmisión y suministran la energía eléctrica a las redes de distribución a tensiones comprendidas entre 34.5 y 6.9 kV.

### 3.- Por su construcción.

a) SUBESTACION TIPO INTEMPERIE. Son subestaciones que se construyen en terrenos expuestos a la intemperie y requieren de un diseño, aparatos y máquinas capaces de soportar el funcionamiento bajo condiciones atmosféricas adversas. Por lo general se adoptan en sistemas de alta y extra alta tensión.

b) SUBESTACIONES TIPO INTERIOR. Son subestaciones que están diseñadas para operar en interiores, esta solución se usaba hace algunos años en la práctica europea. Actualmente son pocos los tipos de subestaciones tipo interior y generalmente son usadas en industrias, incluyendo la variante de las subestaciones tipo blindado.

c) SUBESTACIONES TIPO BLINDADO. Son subestaciones diseñadas para operar en espacios muy reducidos en comparación a las construcciones de subestaciones convencionales, por lo general se usan en el interior de fábricas, hospitales y centros que requieren de poco espacio para estas instalaciones. Se usan en tensiones de distribución y utilización.

Los elementos que constituyen una subestación eléctrica se pueden clasificar en elementos principales y elementos secundarios. Como elementos principales tenemos:

### **2.3 EL TRANSFORMADOR.**

Es la parte más importante de una subestación eléctrica, ya sea por la función que representa de transferir energía eléctrica de un circuito a otro de diferente tensión estando acoplados magnéticamente sus circuitos, o bien por su costo en relación a las otras partes de la instalación y puede definirse como un dispositivo que:

- 1.- Transfiere energía eléctrica de un circuito a otro sin cambio de frecuencia.
- 2.- Lo hace bajo el principio de inducción electromagnética y,
- 3.- Tiene circuitos eléctricos aislados entre sí que son eslabonados por un circuito magnético en común.

Debido a que el transformador es un dispositivo estático, no se le podría considerar como una máquina eléctrica; pero dada su importancia en la ingeniería eléctrica se le considera y estudia como tal, ya que modifica las características de la energía eléctrica, no tiene pérdidas mecánicas ( sus pérdidas son únicamente eléctricas y en el hierro ) y su rendimiento o eficiencia es extremadamente alto en comparación con las máquinas rotativas.

#### **2.3.1 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UN TRANSFORMADOR.**

Un transformador consta de numerosas partes, las principales son ( ver fig. 2.1 ):

1.- Núcleo magnético. Es el circuito magnético que transfiere energía de un lugar a otro y su función es conducir el flujo activo.

2.- Bobinas ( devanados ). Son los circuitos de alimentación y carga. Su función es crear un campo magnético ( primario ) y utilizar el flujo para inducir una fuerza electromotriz ( secundario ).

3.- Tanque, recipiente o cubierta. Es indispensable en aquellos transformadores cuyo medio de refrigeración no es el aire. La función es la de radiar calor producido por el transformador a través de un líquido contenido en dicho recipiente.

4.- Boquillas terminales. Son aquellas que permiten el paso de la corriente a través del transformador.

5.- Medio refrigerante. Es un buen conductor del calor y puede ser líquido, sólido o semisólido, utilizado en transformadores de potencia.

6.- Indicadores. Son instrumentos que indican el estado general del transformador (termómetro, manómetro, etc.).

7.- Relé de Buchholz. Dispositivo de protección.

8.- Base para rodar.

9.- Tubos radiadores, ventiladores. Dispositivos que ayudan a radiar en forma eficaz el calor generado por el transformador.

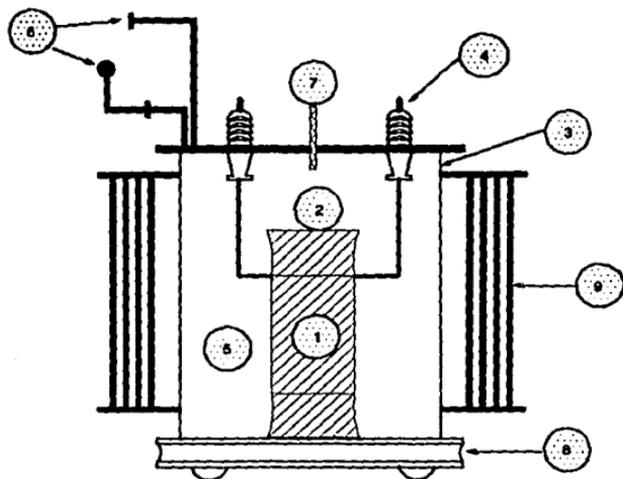


FIG. 2: PARTES ESENCIALES DEL TRANSFORMADOR.

### 2.3.2 CLASIFICACION DE LOS TRANSFORMADORES.

Las formas en que se puede clasificar a un transformador son:

1.- Por su núcleo.

a) TIPO COLUMNAS. Aquí los devanados se colocan en forma concéntrica ( ver fig. 2.2 ).

b) TIPO ACORAZADO. Aquí el circuito magnético abarca una parte considerable de los devanados ( ver fig. 2.3 ).

2.- Por el número de fases.

a) Monofásico.

b) Trifásico.

3.- Por el medio refrigerante.

a) AIRE.

b) ACEITE.

c) LIQUIDO INERTE.

4.- Por el tipo de enfriamiento:

a ) TIPO OA ( OIL AIR ). Sumergido en aceite con enfriamiento propio.

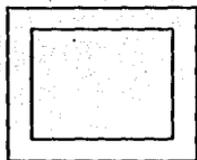


FIG. 2.2 TRANSFORMADOR TIPO COLUMNAS MONOFASICO.

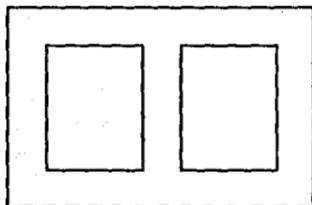


FIG. 2.2 TRANSFORMADOR TIPO COLUMNAS TRIFASICO.



FIG. 2.3 TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO.

b) TIPO OA/FA ( OIL AIR/FORCED AIR ). Sumergido en aceite con enfriamiento propio por medio de aire forzado con la ayuda de ventiladores para disipar el calor.

c) TIPO OA/FA/FOA. Es básicamente un OA con la adición de ventiladores y bombas para la circulación de aceite.

d) TIPO FOA. Sumergido en aceite, enfriado con aceite forzado y con enfriador de aire forzado. Se usan únicamente donde se desea que operen al mismo tiempo bombas de aceite y ventiladores. Tales condiciones absorben cualquier tipo de carga pico a plena capacidad.

e) TIPO OW ( OIL WATER ). Sumergido en aceite y enfriado con agua por medio de serpentines.

f) TIPO AA ( AIR AIR ). Son de los llamados de tipo seco, no contienen aceite ni otros líquidos para enfriamiento. Se utilizan en capacidades menores de 15 KV.

g) TIPO AFA ( AIR FORCED AIR ). Tipo seco, enfriado por aire forzado con ayuda de ventiladores.

#### 6.- Por la regulación.

a) REGULACION FIJA.

b) REGULACION VARIABLE CON CARGA.

c) REGULACION VARIABLE SIN CARGA.

7.- Por la operación.

a) DE POTENCIA.

b) DE DISTRIBUCION.

c) DE INSTRUMENTO.

2.3.3 CONEXION DE TRANSFORMADORES.

En los sistemas de potencia, es necesario a menudo instalar bancos de transformadores monofásicos en conexiones trifásicas, de acuerdo a las necesidades que se presenten. Hay cuatro formas normales de conectar un banco trifásico:

1.- CONEXION DELTA - DELTA. Este tipo de conexión se emplea normalmente en lugares donde existen tensiones relativamente bajas, en sistemas de distribución se utiliza para alimentar cargas trifásicas a tres hilos ( ver fig. 2.4 ).

2.- CONEXION DELTA - ESTRELLA. Es una conexión de las más empleadas, se utiliza en los sistemas de potencia para elevar voltaje de generación o transmisión; en los sistemas de distribución se usan para la alimentación de fuerza y alumbrado ( ver fig. 2.5 ).

3.- CONEXION ESTRELLA - ESTRELLA. Esta conexión se emplea en tensiones muy elevadas, ya que disminuye la cantidad de aislamiento ( ver fig. 2.6 ).

4.- CONEXION ESTRELLA - DELTA. Es contraria a la conexión delta - estrella y se utiliza en los sistemas de transmisión

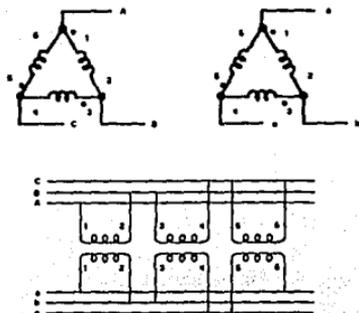


FIG. 2.4 DIAGRAMA DE CONEXION DELTA - DELTA

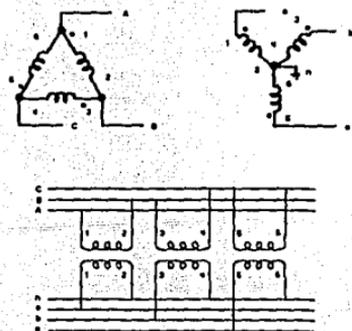


FIG. 2.5 DIAGRAMA DE CONEXION DELTA - ESTRELLA.

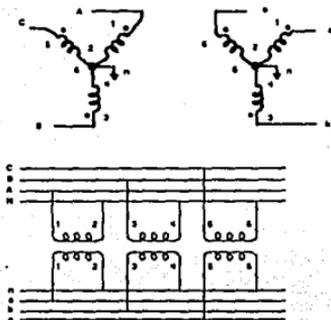


FIG. 26 DIAGRAMA DE CONEXION ESTRELLA - ESTRELLA

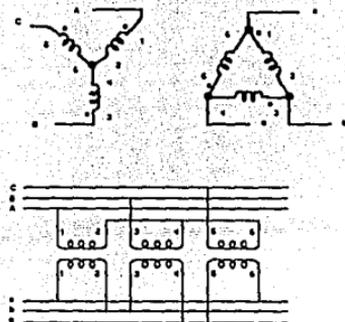


FIG. 27 DIAGRAMA DE CONEXION ESTRELLA - DELTA

de las subestaciones receptoras cuya función es reducir voltajes ( ver fig. 2.7 ).

#### **2.4 INTERRUPTORES DE POTENCIA.**

Un interruptor es un dispositivo mecánico cuya función es interrumpir o restablecer una o repetidas veces, en condiciones normales ( tensión nominal o vacío ) y anormales ( corto-circuito ), la continuidad en un circuito eléctrico.

Su operación o ciclo de trabajo consiste en lo siguiente:

- Desconexión normal.
- Interrupción en corriente de falla.
- Cierre con corrientes de falla.
- Interrupción de corrientes capacitivas.
- Fallas de línea corta ( falla kilométrica ).
- Interrupción de pequeñas corrientes inductivas.
- Oposición de fase durante las salidas del sistema.
- Recierres automáticos rápidos.
- Cambios súbitos de corriente durante las operaciones de maniobra.

Su construcción y clasificación es en dos tipos generales:

- 1.- Interruptores de aceite.
- 2.- Interruptores neumáticos.

1.- INTERRUPTORES DE ACEITE. Son aquellos en el cual el medio en donde se presenta la interrupción está constituido por aceite mineral y se pueden clasificar en :

a) INTERRUPTORES DE GRAN VOLUMEN DE ACEITE. Estos interruptores reciben este nombre debido a la gran cantidad de aceite que contienen; generalmente se construyen en tanques cilíndricos y pueden ser monofásicos o trifásicos ( ver fig. 2.8 ).

b) INTERRUPTORES DE GRAN VOLUMEN DE ACEITE CON CAMARA DE EXTINCIÓN. Los interruptores de grandes capacidades con gran volúmen de aceite originan fuertes presiones internas que en algunas ocasiones pueden originar explosiones. Para disminuir este riesgo, se acondicionó un dispositivo que recibe el nombre de cámara de extracción y dentro de éstas cámaras se extingue el arco ( ver fig. 2.9 ).

c) INTERRUPTORES DE PEQUEÑO VOLUMEN DE ACEITE. Estos interruptores reciben este nombre debido a que su cantidad de aceite es menor comparada con los dos anteriores. Su construcción es básicamente una cámara de extinción modificada que permite mayor flexibilidad en su operación.

2.- INTERRUPTORES NEUMATICOS. Debido al riesgo de explosión e incendio que presentan los interruptores en aceite, se fabrican los interruptores neumáticos, en los cuales la extinción del arco se efectúa por medio de un flujo de aire a presión.

El aire a presión se obtiene por medio de un sistema de aire comprimido que incluye uno o varios compresores con un tanque principal y un tanque de reserva. Se fabrican monofásicos y trifásicos.

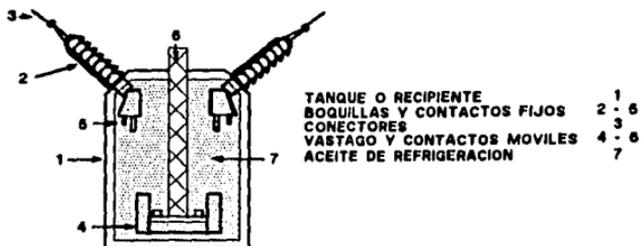


FIG. 28 INTERRUPTORES DE GRAN VOLUMEN DE ACEITE

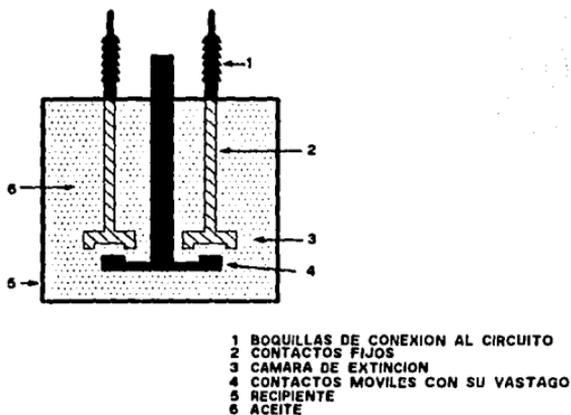


FIG. 29 INTERRUPTORES DE ACEITE CON CAMARA DE EXTINCION

La interrupción se realiza aplicando al arco eléctrico una fuerte inyección de aire comprimido, de manera que el arco mismo se alarga y se enfría en una forma muy eficaz.

## 2.5 RESTAURADORES.

Un restaurador es un dispositivo electromecánico habilitado para sensibilizar e interrumpir, en determinado tiempo, sobrecorrientes en un circuito debidas a la eventualidad de una falla; así como de hacer recierres automáticamente y reenergizar el circuito ( ver fig. 2.10 ).

Es decir, pensando en satisfacer la necesidad de dar continuidad al servicio eléctrico, se tiene este dispositivo de operación automática que no necesita de accionamiento manual para su operación de cierre o de apertura, y está construido de tal manera que un disparo o cierre está calibrado de antemano y opera bajo una secuencia lógica predeterminada.

Por lo que, un restaurador no es más que un interruptor, sumergido en aceite, con sus tres contactos dentro del mismo tanque y que opera en capacidades interruptivas relativamente bajas a tensiones muy elevadas. Están diseñados para funcionar con tres operaciones de recierre y cuatro aperturas, al final de las cuales quedará bloqueado.

La secuencia anterior realiza dos importantes funciones:

- 1.- Prueba la línea para determinar si la condición de falla ha desaparecido.

## **2.- Discrimina las fallas temporales de las permanentes.**

El restaurador opera en forma semejante a un interruptor trifásico, ya que sus contactos móviles son accionados por un vástago común, conectando y desconectando en forma simultánea.

### **2.6 CUCHILLAS FUSIBLE.**

La cuchilla fusible es un elemento de conexión y desconexión de circuitos ( ver fig. 2.11 ), opera en base a dos funciones: como cuchilla desconectadora y como elemento de protección.

El elemento de protección lo constituye el dispositivo fusible, que se encuentra dentro del cartucho de conexión.

### **2.7 CUCHILLAS DESCONECTADORAS.**

Son dispositivos de maniobra capaces de interrumpir en forma visible la continuidad de un circuito ( ver fig. 2.12 ), pueden ser maniobrables bajo tensión, pero en general sin corriente ya que poseen una capacidad interruptiva casi nula. Su empleo es necesario en los sistemas, ya que debe existir seguridad en el aislamiento físico de los circuitos antes de realizar cualquier trabajo y para los cuales la presencia de un interruptor no es suficiente para garantizar un aislamiento eléctrico.

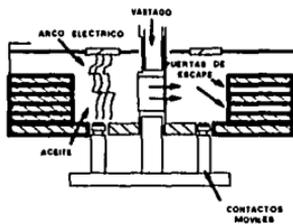


FIG. 2.10 EJEMPLO DE LA OPERACION DE UN RESTAURADOR

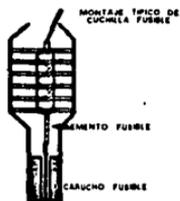


FIG. 2.11 REPRESENTACION DE UNA CUCHILLA FUSIBLE



FIG. 2.12 CUCHILLAS DESCONECTADORAS ( SECCIONADORES )

Las cuchillas desconectadoras pueden tener formas constructivas que tienen variantes en base a la tensión de aislamiento y a la corriente que debe conducirse, en condiciones normales pueden ser:

- CUCHILLAS UNIPOLARES. Constan de un seccionador en el cual la navaja se encuentra insertada en un contacto a presión para garantizar un óptimo contacto eléctrico.

- CUCHILLAS TRIPOLARES. Es básicamente el mismo tipo de cuchillas unipolares, pero el mando es tal que se accionan en tres fases simultáneamente.

- CUCHILLA UNIPOLAR DE ROTACION. Es básicamente una cuchilla fija que tiene un perno de control con una columna central giratoria, son utilizadas por lo general en sistemas de alta tensión con corrientes hasta de 2000 amperes.

- CUCHILLA DESCONECTADORA TRIPOLAR GIRATORIA. Son prácticamente iguales a las giratorias unipolares, pero emplean mando tripolar para accionamiento simultáneo de los tres polos, por lo general se usan en 69 y 115 kV.

- CUCHILLA DESCONECTADORA DE APERTURA VERTICAL. En estas cuchillas se tiene un giro del orden de  $110^\circ$  de la columna central del aislador, la apertura se realiza en dos tiempos por medio de un giro de  $60^\circ$  de la cuchilla que gira sobre su propio eje y un movimiento vertical de la otra navaja en forma propia. Los puntos de contacto son antihielo y a prueba de contaminación. Se usan en sistemas de 85 a 230 kV.

- CUCHILLAS DESCONECTADORAS TIPO PANTOGRAFO. Se construyen en general del tipo monopolar siendo su elemento de conexión del

tipo pantógrafo de donde viene su nombre, el cierre del circuito se obtiene levantando el contacto móvil que se encuentra sobre el pantógrafo conectándose al contacto fijo que se monta sobre el cable o sistema de barras de la subestación.

## **2.8 FUSIBLES.**

El uso de fusibles para la protección contra el cortocircuito y contra sobrecargas en los sistemas de baja tensión ha sido muy común por la simplicidad y el bajo costo que estos elementos representan, estas características hacen que también sean usados en circuitos de media tensión.

En esencia, un fusible es un elemento de aleación metálica que por efecto térmico se funde al paso de una corriente eléctrica superior a un valor predeterminado; por lo que debe especificarse en base a la frecuencia de operación, capacidad nominal de corriente, voltaje nominal de operación, voltaje máximo de diseño y capacidad interruptiva.

Entonces, un fusible está reservado para la interrupción automática del circuito que protege cuando se verifican condiciones anormales de funcionamiento que están normalmente asociadas con las sobrecorrientes.

## **2.9 APARTARRAYOS.**

Como se vió en el capítulo I, existen sobretensiones que se presentan en las instalaciones eléctricas que son debidas principalmente a :

- Sobretensiones de origen atmosférico.
- Sobretensiones por fallas del sistema.

El apartarrayos es un dispositivo que nos permite proteger a las instalaciones contra sobretensiones de origen atmosférico.

Las ondas que se presentan durante una descarga atmosférica viajan a la velocidad de la luz y dañan al equipo si no se le tiene protegido correctamente. El apartarrayos debe encontrarse permanentemente conectado al sistema y opera cuando se presenta una sobretensión de determinada magnitud, descargando la corriente a tierra.

Su principio general de operación se basa en la formación de un arco eléctrico entre dos explosores cuya separación está determinada de antemano con la tensión a la que va a operar.

Existen diferentes tipos de apartarrayos, los más empleados son los conocidos como " apartarrayos tipo autovalvular y de resistencia variable ".

El apartarrayos tipo autovalvular consiste en varias chapas de explosores conectados en serie por medio de resistencias variables ( ver fig. 2.13 ) cuya función es la de dar una operación más sensible y precisa. Se emplean en sistemas que operan a grandes tensiones, ya que representa una gran seguridad de operación.

El apartarrayos de resistencia variable cuenta con dos explosores y se conecta a una resistencia variable. Se emplea

en tensiones medianas y tiene mucha aceptación en sistemas de distribución ( ver fig. 2.13 ).

Como se ha visto, la función del apartarrayos no es la de eliminar las ondas de sobretensión presentadas durante las descargas atmosféricas, sino de limitar su magnitud a valores que no sean perjudiciales para las máquinas del sistema.

## **2.10 INSTRUMENTOS ELECTRICOS DE MEDICION Y TABLEROS DE CONTROL.**

La función de los instrumentos eléctricos de medición dentro de la subestación eléctrica es de vital importancia, pues no va a indicar el estado general del sistema con base a la lectura de los parámetros de la energía eléctrica.

Los instrumentos eléctricos de medición se pueden clasificar de acuerdo a:

- Principio de funcionamiento ( electromagnético, magneto eléctrico, electrodinámico, de inducción y digital).
- Naturaleza de la corriente con que operan (C.A. o C.C.).
- Por su grado de precisión ( de tableros de control, de laboratorio, etc. ).
- Por sus características constructivas ( forma del indicador, registrador, forma externa, etc.).

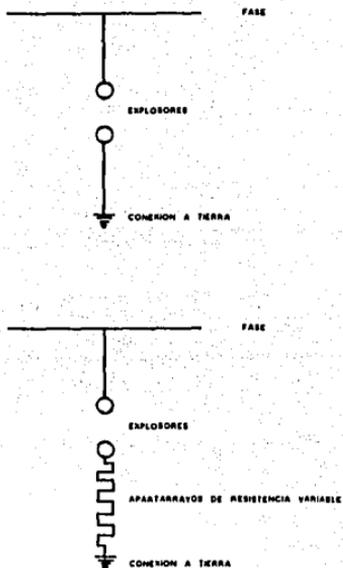


FIG. 2.13 REPRESENTACION DE DOS TIPOS DE APARTARRAYOS EN UN DIAGRAMA UNIFILAR.

Entre los instrumentos eléctricos de medición más importantes tenemos:

### **2.10.1 AMPERIMETRO.**

Es un instrumento eléctrico que mide la cantidad de corriente que circula por un sistema. Debe conectarse en serie con el circuito que se desea medir y la conexión puede ser directa en los circuitos de baja tensión; mientras que para los circuitos a tensiones elevadas o para altos valores de corriente se requieren métodos de medición indirecta ( transformadores de instrumento en C.A. y circuitos derivadores shunt en C.C. ).

El tipo de amperímetro más conocido es el electromagnético de hierro móvil dada la simplicidad de construcción y bajo costo.

### **2.10.2 VOLTIMETRO.**

Instrumento que mide el voltaje del sistema, y son por lo general electromagnéticos para C.A. y magneto-eléctrico para C.C. Se conectan en paralelo con el circuito a medir, si es de baja tensión se conecta en forma directa; para alta tensión se utiliza un transformador de instrumento. Actualmente se incrementa el uso de voltmetros tipo digital.

### **2.10.3 WATTMETROS Y VARNETROS.**

El wáttmetro es un instrumento que sirve para la medición de la potencia activa que circula por el circuito eléctrico, para la medición de la potencia reactiva se utiliza el varmetro, que desde el punto de vista de construcción es

igual que el wáttmetro, pero se diferencia por un sólo artificio: la bobina de voltaje se encuentra en cuadratura con la tensión.

El empleo del vármetro está limitado sólo a circuitos monofásicos, ya que en los circuitos trifásicos la medición de la potencia reactiva se hace utilizando wattmetros de construcción normal convenientemente insertados.

#### **2.10.4 FASOMETRO.**

Realiza la medición directa del factor de potencia de un circuito monofásico o trifásico referido a un factor de potencia unitario, de manera que sólo indica si está adelantado o atrasado.

#### **2.10.5 FREQUENCIMETRO.**

Para controlar la frecuencia de la potencia eléctrica en una instalación, se emplea el frecuencímetro, que es el instrumento que mide la cantidad de ciclos por segundo en un circuito eléctrico.

#### **2.10.6 TABLEROS ELECTRICOS.**

En el complejo de una subestación eléctrica, donde intervienen los instrumentos de maniobra, de medición, de

control y algunos otros; la conexión eléctrica entre éstos se divide en dos categorías: Los tableros y los circuitos primarios de la subestación eléctrica.

En las instalaciones eléctricas de baja potencia y baja tensión es común que el equipo principal de los aparatos de maniobra y control se monten justo a los aparatos que deben accionar.

En instalaciones grandes, los aparatos de control, maniobra y medición no se pueden instalar juntos en los mismos tableros; por lo que todo lo que corresponde a los aparatos de corte se instalan por separado y es frecuente tener un puesto de mando central, lo que hace necesario efectuar un alambrado de interconexión.

De lo anterior, un tablero no es mas que aquel que alimenta, protege, interrumpe, mide y transfiere circuitos primarios. Los tableros pueden ser de alta y de baja tensión.

**TABLERO DE BAJA TENSION.** Es aquel que trabaja a una tensión no mayor de 1,000 V de C.A. y 1,500 V de C.C.

Las tensiones y corrientes nominales para C.A. y C.C. se resumen en la siguiente tabla.

**TABLEROS DE BAJA TENSION**

TENSION NOMINAL		CORRIENTE NOMINAL		TIPO DE CORRIENTE
120	V	600 A	1200 A	C.A.
240	V	2000 A	3000 A	C.A.
480	V	3000 A	4000 A	C.A.
550	V	5000 A		C.A.
125	V	*		C.C.
250	V	*		C.C.
550	V	*		C.C.

\* Mismas capacidades de corriente que en C.A.

**TABLA 2.1**

**TABLEROS DE ALTA TENSION.** Son aquellos tableros que trabajan a tensiones mayores de 1,000 V en C.A. o 1,500 V de C.C.

Las tensiones y corrientes nominales para C.A. y C.C. se muestran en la siguiente tabla:

**TABLEROS DE ALTA TENSION**

<b>TENSION NOMINAL</b>	<b>CORRIENTE NOMINAL</b>	<b>TIPO DE CORRIENTE</b>
2400 V	600 A	*
4160 V	1200 A	*
7200 V	2000 A	*
13800 V	3000 A	*
23000 V	4000 A	*
34500 V	5000 A	*

\* C.A. o C.C. indistintamente.

**TABLA 2.2**

**2.11 TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO.**

Como se ha visto, en los sistemas eléctricos de corriente alterna se manejan normalmente diferencias de potencial e intensidades de corriente considerablemente altas, por ello y para proteger al personal y aislar eléctricamente de los equipos primarios los equipos de protección y medición; es que estos últimos son alimentados por magnitudes proporcionalmente menores, copiadas fielmente del sistema a

través de dispositivos especiales llamados **TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO**.

Se denominan transformadores para instrumento los que se emplean para alimentación de equipos de medición, control o protección. Los transformadores para instrumentos se dividen en dos clases:

- 1.- Transformador de Corriente ( "TC" ).
- 2.- Transformador de Potencial ( "TP" ).

#### **2.11.1 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE.**

Un transformador de corriente ( TC ) es un dispositivo que nos alimenta una corriente proporcionalmente menor a la de un circuito, es decir, es un aparato en donde la corriente secundaria es proporcional a la corriente primaria y está defasada de ésta en un ángulo cercano a cero ( ver fig. 2.14 ), para un sentido apropiado de conexiones.

Los transformadores de corriente tienen por finalidad llevar la intensidad de corriente que se desea medir a un valor cómodo para manipular y registrar.

Su construcción es semejante a la de cualquier tipo de transformador, ya que fundamentalmente consiste en un devanado primario y un devanado secundario. La capacidad de estos transformadores es muy baja, se determina sumando las capacidades de los instrumentos que se van a alimentar y pueden ser de: 15, 30, 50, 60, y 70 VA.

Normalmente su conexión es en sistemas trifásicos y las conexiones que con ellos puede hacerse son las conexiones

normales trifásicas entre transformadores ( delta-delta, delta-estrella, etc. ). Es muy importante que se hagan conectar correctamente los devanados de acuerdo con sus marcas de polaridad, cuidando de conectar siempre el secundario a tierra.

### **2.11.2 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL.**

Se denomina transformador de potencial ( TP ) a aquel cuya función principal es transformar los valores de voltaje, sin tomar en cuenta la corriente. Es decir, un transformador de potencial es un transformador para medición, donde la tensión secundaria es prácticamente proporcional a la tensión primaria y defasada de ella un ángulo cercano a cero ( ver fig. 2.15 ), para un sentido apropiado de conexiones.

Su construcción es básicamente igual a la de cualquier transformador, con un devanado primario y otro secundario. Su capacidad es baja y se obtiene sumando las capacidades de los instrumentos de medición que se van a alimentar. Varían de entre 15 a 60 VA, y se construyen para diferentes relaciones de transformación; pero el voltaje en el devanado secundario es normalmente de 115 V. Para sistemas trifásicos se conectan en cualquiera de las conexiones trifásicas conocidas, según las necesidades.

### **2.11.3 GRADO DE PRECISION DE UN TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO.**

Los transformadores de instrumento tienen diferente precisión de acuerdo con el empleo que se les dé. A esta precisión se le denomina clase de precisión y se selecciona de acuerdo a la siguiente tabla ( tabla 2.3 ):

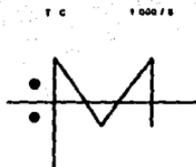


FIG. 2.14 REPRESENTACION DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE EN UN DIAGRAMA UNIFILAR.

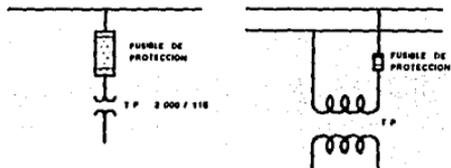


FIG. 2.15 REPRESENTACION DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIAL EN UN DIAGRAMA UNIFILAR.

**GRADOS DE PRECISION EN TC'S Y TP'S.**

CLASE	UTILIZACION
0.1	Calibración y medidas de laboratorio.
0.2 - 0.3	Medidas de laboratorio. Alimentación de wathhorímetros para alimentadores de gran potencia.
0.5 - 0.6	Alimentación de wathhorímetros para facturación en circuitos de distribución. Wathhorímetros industriales.
1.2	Ampérmetros indicadores. Ampérmetros registradores. Fasómetros indicadores. Fasómetros registradores. Wathhorímetros indicadores. Wathhorímetros registradores. Wathhorímetros industriales. Protecciones diferenciales, relevadores de impedancia y de distancia.
3 - 5	Protección en general.

TABLA 2.3

En conclusión, los transformadores de instrumento presentan las siguientes ventajas:

- 1.- Aísla los instrumentos de medición y protección del circuito primario.

2.- Permite la normalización de las características de operación de los instrumentos de medición y protección.

3.- Permiten la ubicación de los instrumentos de medición y protección del circuito principal. Esto disminuye la influencia de los campos electromagnéticos producidos por tensiones y corrientes altas.

4.- Le da una mayor seguridad al personal que opera los circuitos de alta tensión.

#### **2.12 RELACION DE LA SUBESTACION ELECTRICA CON LAS LINEAS DE TRANSMISION Y CENTRALES GENERADORAS.**

Por razones técnicas, los voltajes de generación en las centrales generadoras son relativamente bajos en relación con los voltajes de transmisión, por lo que si la energía eléctrica se va a transportar a grandes distancias, estos voltajes de generación resultarían antieconómicos debido a que tendrían gran caída de voltajes.

Supongamos que se desea transmitir energía eléctrica de una central generadora a un centro de consumo que está situado a 1,000 Km de distancia, será necesario elevar el voltaje de generación, que se supondrá de 13.8 kV, a otro más conveniente ( que se asume de 110 kV ), como se observa en la fig. 2.16.

Para poder elevar el voltaje de 13.8 kV al de transmisión es necesario emplear una subestación eléctrica ( ver fig. 2.17 ). Suponiendo que la caída de voltaje en la línea de

transmisión fuera de cero volts, tendríamos en el centro de consumo 110 kV. Es obvio que este voltaje no sería posible utilizarlo en instalaciones industriales y aún menos en instalaciones residenciales; de donde se desprende la necesidad de reducir el voltaje de transmisión de 110 kV a otro más conveniente de distribución. Por tal razón será necesario emplear otra subestación eléctrica, como se ve en la fig. 2.18.

De lo anterior se desprende que existe una estrecha relación de la subestación eléctrica con las centrales generadoras y las líneas de transmisión, como una de las partes más importantes que intervienen en el proceso de **GENERACION - CONSUMO** de energía eléctrica.

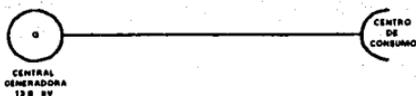


FIG. 2.16 REPRESENTACION GENERADOR - LINEA - CENTRO DE CONSUMO

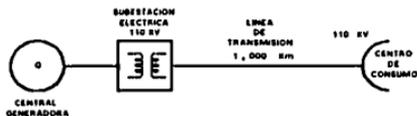


FIG. 2.17 REPRESENTACION DE GENERADOR CON SUBESTACION ELEVADORA

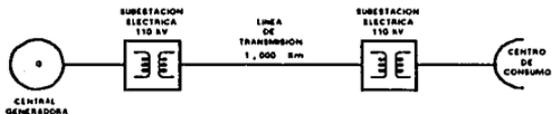


FIG. 2.18 REPRESENTACION DE GENERADOR CON SUBESTACION REDUCTORA

## **CAPITULO III**

### **" ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA RED DE TIERRAS "**

#### **3.1 INTRODUCCION.**

Durante la construcción de las instalaciones eléctricas o en el empleo de máquinas o aparatos que van a prestar algún tipo específico de servicio eléctrico, es una norma fundamental de seguridad que todas las partes metálicas que se encuentren accesibles al contacto con las personas, se deban de mantener siempre a un potencial bajo para que en caso de un accidente no resulte de peligro.

Este peligro puede reducirse y eventualmente eliminarse, estableciendo una conexión a tierra con las partes metálicas que se encuentran accesibles al contacto. Para lograr lo anterior, se requiere de un diseño adecuado de las redes de tierra.

#### **3.2 REDES DE TIERRA.**

**DEFINICION.-** Es un conjunto de conductores, electrodos, accesorios, conectores, etc., interconectados eficazmente entre sí, sin fusibles ni protección alguna, con el objeto de conseguir que el conjunto de instalaciones, edificio y superficie próxima al terreno no existan diferencias de potencial peligrosas; y que al mismo tiempo permitan el paso

a tierra de las corrientes de falla o de descarga de origen atmosférico.

Por lo general, las normas internacionales dividen a las redes de tierra en las siguientes clases:

### **3.2.1 REDES DE TIERRA PARA PROTECCION.**

Es aquella red que conecta eléctricamente a tierra todas aquellas partes de la instalación eléctrica que no se encuentran sujetas a tensión normalmente, pero que pueden tener diferencias de potencial a causa de fallas accidentales; tales partes pueden ser: tableros eléctricos, el tanque de los transformadores o interruptores, la carcasa de las máquinas, las estructuras metálicas de la subestación o de las líneas de transmisión, y en general, todos los soportes metálicos de equipos y aparatos.

### **3.2.2 REDES DE TIERRA PARA FUNCIONAMIENTO.**

Se utilizan para establecer una conexión a tierra en determinados puntos de una instalación eléctrica con el fin de mejorar el funcionamiento, una mayor seguridad y mejor regularidad de operación. Los puntos del sistema por conectar a la red de tierra pueden ser: la conexión del neutro de los transformadores conectados en estrella, la conexión a tierra de los apartarrayos de los hilos de guarda, la conexión de los transformadores de potencial y algunos otros.

### **3.2.3 REDES DE TIERRA PARA TRABAJO.**

Se utilizan con frecuencia cuando en las actividades de trabajo de una instalación eléctrica ( mantenimiento,

ampliaciones, reparaciones, etc. ), se requiere realizar la conexión a tierra temporal con partes de la instalación puestas fuera de servicio, con el fin de que sean accesibles y sin peligro para los trabajos a realizar.

Analizando la definición de redes de tierra, se puede deducir que los elementos fundamentales que intervienen son: el circuito de la red a tierra, que será el encargado de captar y canalizar las corrientes de defecto o descargas atmosféricas; el terreno, que será el encargado de absorber las descargas; el electrodo, que será el elemento de unión entre el circuito y el terreno; la bondad del contacto entre el terreno y el electrodo, punto fundamental para una buena puesta a tierra.

### 3.3 EL TERRENO.

Dentro del contexto de las redes de tierra; al terreno se le considera, desde el punto de vista eléctrico, como el elemento encargado de disipar la corriente de defecto o las descargas de origen atmosférico.

El comportamiento de este fenómeno viene asociado con el término " RESISTIVIDAD ", que es una característica de todos los materiales y que nos da una idea de la resistencia que ofrece el material al ser atravesado por la corriente eléctrica. Es sabido que los cuerpos con una resistividad muy baja, dejan circular con cierta facilidad el flujo de la corriente eléctrica; por el contrario, en los cuerpos con resistividad muy alta se oponen al flujo de la corriente eléctrica.

En el terreno, las resistividad depende de las características propias, de acuerdo a su composición física y química, se mide en ohmios por metro. Su expresión matemática y sus unidades se muestran a continuación:

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad \Omega \cdot \frac{m^2}{m} = \Omega \cdot m$$

### 3.3.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

Como el terreno no suele ser uniforme en cuanto a su composición, tendrá una " RESISTIVIDAD APARENTE "; que promedia los efectos de las diferentes capas que lo componen. El valor de esta resistividad aparente no es constante en el tiempo, pues se ve afectado por varios factores, siendo los principales:

#### 3.3.1.1 NATURALEZA DEL TERRENO.

El terreno, como se ha visto, debido a su composición no puede considerársele homogéneo desde el punto de vista de la resistividad eléctrica; se requiere conocer sus características naturales, y para obtenerlas deberán de hacerse mediciones ( ver capítulo IV ) con métodos y aparatos aceptados para estos fines. Lo anterior nos permite juzgar la homogeneidad y condiciones del terreno.

De acuerdo con las mediciones hechas por el Departamento de Estándares de los Estados Unidos de Norteamérica, la resistividad del terreno varía de algunas unidades hasta los 3000 ohms-metro.

A modo de orientación, se tienen a continuación dos tablas de valores de resistividad. La tabla 3.1 incluye valores de resistividad de los materiales que forman los terrenos; y la tabla 3.2 da a conocer los valores de resistividad en función de la naturaleza del terreno.

MATERIALES	RESISTIVIDAD OHM x m .
SAL GEMA	$10^{13}$
CUARZO	$10^9$
ARENISCA, GUIJARROS, PIEDRA, CEMENTO ORDINARIO, ESQUISTOS	$10^6 - 10^7$
CARBON	$10^5 - 10^6$
BASALTO, CASCAJO, GRANITO ANTIGUO, TERRENO ROCOSO, CALIZOS ( JURASICO ) SECOS.	$1.5 \times 10^3 - 5 \times 10^4$
YESO SECO, ARENA FINA, GRAVA Y ARENA GRUESA.	$5 \times 10^2 - 10^2$
ARENA ARCILLOSA, GRAVA Y ARENA GRUESA HUMEDA, TIERRA ARENOSA CON HUMEDAD, BARRO ARENOSO.	$1.5 \times 10^2 - 4 \times 10^2$
MARGAS, TURBAS, HUMUS SECOS.	30 - 50
AGUA DE MAR	1
SOLUCION SALINA	0.01 - 0.1
GRAFITOS Y MINERALES CONDUCTORES	0.0001 - 0.01

TABLA 3.1

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD EN OHMS X M
TERRENO PANTANOSO	DE ALGUNAS UNIDADES A 30
LIMO	20 A 100
HUMOS	10 A 150
TURBA HUMEDA	5 A 100
ARCILLA PLASTICA	50
MARGAS Y ARCILLAS COMPACTAS	100 A 200
MARGAS DEL JURASICO	30 A 40
ARENA ARCILLOSA	50 A 500
ARENA SILICEA	200 A 3,000
SUELO PEDREGOSO CON CESPED	300 A 500
SUELO PEDREGOSO DESNUDO	1,500 A 3,000
CALIZAS BLANDAS	100 A 300
CALIZAS COMPACTAS	1,000 A 5,000
CALIZAS AGRIETADAS	500 A 1,000
PIZARRAS	50 A 300
ROCAS Y MICAS DE CUARZO	800
GRANITOS Y GRES	1,500 A 10,000
GRANITOS Y GRES ALTERADOS	100 A 600

TABLA 3.2

### 3.3.1.2 HUMEDAD.

El estado higrométrico del terreno influye de forma apreciable sobre la resistividad del mismo. Con el incremento de la humedad en el terreno, se abate en forma efectiva la resistividad eléctrica; por el contrario, si se carece de humedad ( suelo seco ), tendremos una resistividad muy alta.

La humedad contenida en el terreno es variable, sin embargo se puede decir que el porcentaje promedio de humedad es de aproximadamente 10 % en época de estiaje y, alrededor de un 35 % en tiempo de lluvias.

A continuación se presenta una tabla ( tabla 3.3 ) donde se muestra la variación de la resistividad al incrementar el porcentaje de humedad para dos tipos de suelo.

CONTENIDO DE AGUA % EN PESO	RESISTIVIDAD (OHM-M) SUELO SUPERFICIAL	RESISTIVIDAD (OHM-M ) ARCILLA ARENOSA
0.0	1000 x 10 <sup>6</sup>	1000 X 10 <sup>6</sup>
2.5	250,000	150,000
5.0	165,000	43,000
10.0	53,000	18,500
5.0	19,000	10,500
20.0	12,000	6,200
30.0	6,400	4,200

TABLA 3.3

Como se observa, la humedad facilita la disociación de las sales contenidas en el terreno en iones positivos y negativos; que son los encargados de transportar la corriente eléctrica a través del terreno. Al haber más humedad, hay más posibilidad de disociación y una mayor movilidad de estos elementos dentro del terreno.

La gráfica 3.1 muestra la variación de la resistividad para tres tipos de terreno. Analizando la gráfica, se observa que la resistividad disminuye rápidamente cuando la humedad alcanza el 10 %; a partir de este valor sólo se consigue una leve disminución de la resistividad con el aumento de la humedad. Inversamente, por abajo del 10 %, la resistividad aumenta en forma exponencial con la disminución de la humedad.

### 3.3.1.3 TEMPERATURA.

La resistividad de un terreno también se ve influenciada por la temperatura. La fig. 3.2 nos muestra la variación de la resistividad versus temperatura para un terreno de arcilla arenosa con el 15.28 % de peso en humedad.

Como se observa, la resistividad se ve afectada considerablemente por las bajas temperaturas. La resistividad crece lentamente a medida que la temperatura disminuye hasta llegar al punto de congelación del agua ( 0 °C ). Por debajo de esta temperatura, el agua que contiene el terreno pasa al punto de congelación y la resistividad crece rápidamente.

En este tipo de casos, la red de la puesta a tierra debe instalarse por encima del nivel de congelación para obtener un valor aceptable de resistencia.

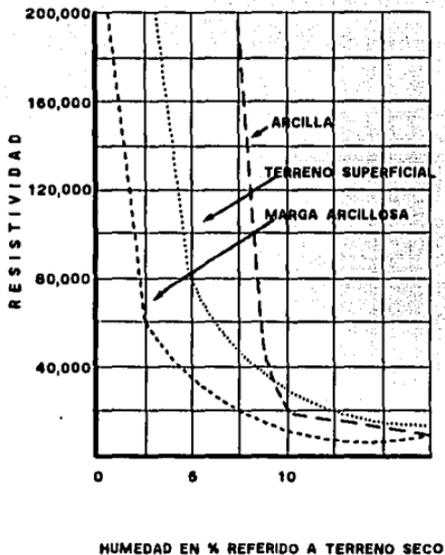


FIG. 3.1 GRAFICA DE HUMEDAD VS. RESISTIVIDAD  
PARA TRES TIPOS DE TERRENO.

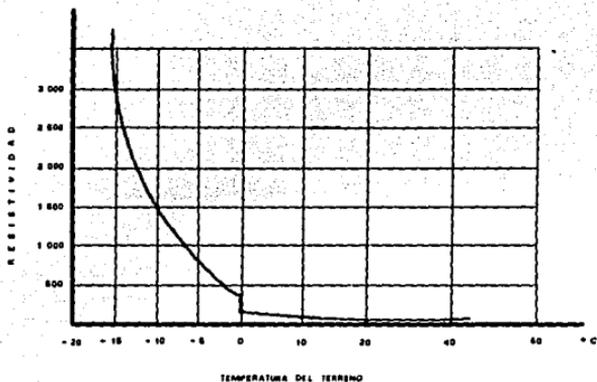


FIG. 3.2 GRAFICA QUE MUESTRA LA VARIACION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO CON LA TEMPERATURA.

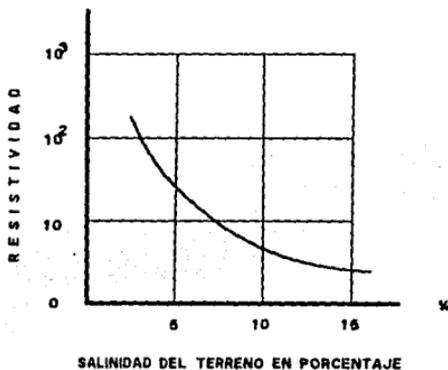


FIG. 3.3 GRAFICA QUE MUESTRA LA VARIACION DE LA RESISTIVIDAD CON RESPECTO A LA SALINIDAD DEL TERRENO.

De lo anterior, se concluye que el contenido de humedad es más importante que la temperatura sobre la resistividad; siempre y cuando la temperatura esté por encima del punto de congelación del agua.

#### **3.3.1.4 SALINIDAD.**

La cantidad de sales minerales contenidas en el terreno es de gran importancia, pues la humedad al combinarse con la salinidad del suelo produce electrolitos que ayudan a disipar las corrientes eléctricas a través del terreno ( ver fig. 3.3 ). Un terreno húmedo que no contenga sales minerales, tiene una alta resistividad; por lo que es poco recomendable para la instalación de una red de tierras.

La manera de instalar la red de tierras en este tipo de terreno es abatir en forma artificial la resistividad eléctrica del mismo, agregando sales disueltas en agua y vertidas en el terreno. Los efectos de este tipo de métodos no son permanentes en el tiempo.

#### **3.3.1.5 VARIACIONES ESTACIONALES.**

Los factores antes descritos ( humedad, temperatura, salinidad, etc. ) se ven afectados a lo largo del año debido a las variaciones estacionales y climatológicas ( ver fig. 3.4 ). Estas variaciones estacionales afectan principalmente a las capas superficiales del terreno, por lo que se debe tomar en cuenta una revisión periódica de la red de tierras en la época del año más desfavorable; con el fin de asegurar una baja resistencia del terreno y el funcionamiento óptimo de la red.

VARIACIONES ESTACIONALES DE LA RESISTIVIDAD DE UN TERRENO

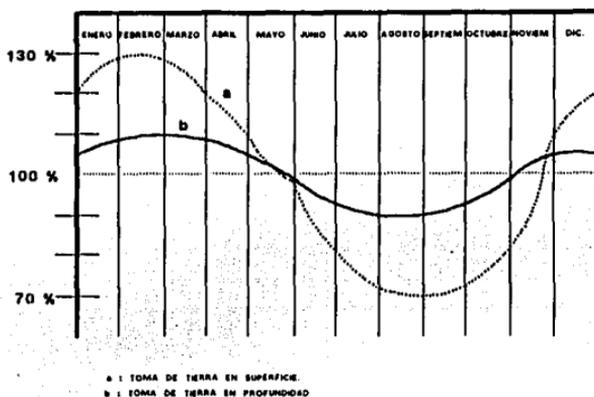


FIG. 34 GRÁFICA QUE MUESTRA EL VALOR DE LA RESISTIVIDAD EN DIFERENTES EPOCAS DEL AÑO.

### **3.3.1.6 FACTORES DE NATURALEZA ELECTRICA.**

Existen también factores de naturaleza eléctrica que pueden afectar a la resistividad del terreno, tales como: el gradiente de potencial y la magnitud de la corriente de puesta a tierra.

Respecto al primero, la resistividad no se ve afectada hasta que el gradiente no alcanza un cierto valor crítico, lo que origina la formación de pequeñas áreas eléctricas en el suelo que hacen que el electrodo se comporte como si fuera de mayor tamaño.

En cuanto a la magnitud de la corriente de la red de tierras, puede también modificar el comportamiento del electrodo de tierra si su valor es muy elevado; bien por provocar gradientes excesivos, o bien por dar lugar a calentamientos en torno a los conductores enterrados que provoquen evaporación del agua.

### **3.4 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LAS REDES DE TIERRA.**

#### **3.4.1 TOMAS DE TIERRA.**

La toma de tierra es el elemento de unión entre el terreno y el circuito; instalados en el complejo de la subestación eléctrica, instalaciones, edificio, etc. La toma de tierra consta de tres elementos fundamentales:

- 1.- ELECTRODOS O DISPERSORES.
- 2.- CIRCUITO DE CONDUCTORES Y CONECTORES.

### 3.- CIRCUITO DE CONDUCTORES DE PROTECCION.

#### 3.4.1.1 ELECTRODOS O DISPERSORES.

El electrodo es el elemento de la red a tierra encargado de introducir en el terreno las corrientes nocivas, debidas principalmente a fallas en los circuitos eléctricos o de origen atmosférico. Se definen como toda masa metálica que introducida en el terreno y en permanente contacto con él, facilita el paso a tierra de cualquier carga eléctrica.

Con la toma a tierra, se pretende que todo el circuito de protección esté a potencial de cero volts. El que dicho electrodo tenga siempre este potencial depende única y exclusivamente del contacto **ELECTRODO - TERRENO**, y es lo que técnicamente se denomina "**Resistencia de Dispersión a Tierra**". Es por esta razón, que la red debe de ser proyectada con una alta conductancia y permanencia en el tiempo.

Como se ha visto, la resistencia entre un electrodo y el suelo circundante representa la resistencia de la red de tierra; pero existen otros factores que incrementan dicha resistencia y son, básicamente:

- 1.- Resistencia propia del electrodo, conductores y conexiones.

La resistencia del electrodo, conductores y conexiones en sí es despreciable; no así con el paso del tiempo, ya que si los materiales de los cuales están hechos no son resistentes a la corrosión, puede llegarse a la pérdida de la conductividad entre ellos.

## 2.- Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo.

Datos experimentales de la Bureau Of Standar's de USA, afirman que si el electrodo está libre de pintura y grasa, y el terreno está compactado firmemente; esta resistencia de contacto es despreciable.

## 3.- Resistencia distribuida por el terreno inmediato al electrodo.

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

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

La resistencia de dispersión a tierra de un electrodo se reduce a medida que se incrementa su profundidad de empotramiento; en cambio, el diámetro del mismo influye muy poco en abatir dicha resistencia. La resistencia de dispersión a tierra es directamente proporcional a la resistividad del terreno, y es un factor fundamental que nos indicará cuál será la resistencia de dispersión a tierra y a que profundidad deberá de enterrarse el electrodo.

Para calcular la resistencia de dispersión a tierra de electrodos en forma analítica, se hará uso de la siguiente fórmula:

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

Donde:

- $R_f$  = Resistencia de dispersión a tierra.  
 $\rho$  = Resistividad del suelo.  
 $C$  = Capacidad combinada en el vacío del electrodo y su imagen sobre el nivel del suelo.

La fórmula anterior supone la resistividad uniforme a través de todo el volumen del terreno considerado. El concepto básico de ésta fórmula es mostrar la forma en que debe disponerse una cantidad de metal para obtener mejores resultados.

#### 3.4.1.3 TIPOS DE ELECTRODOS.

Existen diferentes tipos de electrodos, los más comúnmente utilizados son:

##### 1.- VARILLAS O PICAS.

Son electrodos artificiales alargados que se introducen en el terreno en forma vertical y suelen fabricarse de:

- Acero dulce o acero fundido de 25 mm de diámetro exterior mínimo.
- Perfiles de acero galvanizado, con 60 mm de lado como mínimo.
- Barras de cobre o acero recubierto de cobre.

La longitud en cualquiera de los casos anteriores no será inferior a los dos metros.

La fig. 3.5 muestra este tipo de electrodos. Como se observa, en la extremidad inferior van provistos de una punta de penetración para facilitar el paso al interior del terreno; de un tubo o barra, que es propiamente el electrodo; un " manguito " de acoplamiento, para permitir la unión de dos o más electrodos; y una " sufridera ", sobre la cual actuará la maza o martillo para introducir el electrodo y evitar así que se deforme.

La NTIE recomienda picas de alma de acero recubiertas de cobre ( Copperweld ), de 14 mm a 16 mm de diámetro. El recubrimiento de cobre deberá tener como mínimo 2 mm de espesor y deberá ser por sistema de unión molecular entre el cobre y el acero; lo anterior con el fin de garantizar que el recubrimiento no se caiga a la hora de introducir la pica en el terreno. La longitud de la pica no será menor de 2.5 m.

Existen dos formas de diseñar una red de tierras con varillas; una es colocando las varillas a profundidad, y la otra es colocarlas en paralelo. La primera, más costosa, consiste en ir introduciendo en el terreno una varilla encima de la otra hasta conseguir profundidades de 6, 8, 10, etc, metros.

El segundo método es el más recomendado y utilizado normalmente. La única precaución que hay que tener con este sistema es que las varillas tengan una separación como mínimo igual a la longitud enterrada; y después unir las eléctricamente con cable desnudo de 35 mm<sup>2</sup>, como se observa en la fig. 3.6. Constituido de esta manera el electrodo,

experimentalmente se puede demostrar que la resistencia de dispersión es la mitad de la resistencia de una varilla.

En ambos casos, se colocan trampillas ( registros ) de vigilancia para control y medición; que a la vez protegen a la toma de tierra, tal como se muestra en la fig. 3.7.

El cálculo de la resistencia de dispersión a tierra que ofrecen este tipo de electrodos está en función de la siguiente fórmula:

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

Donde:

- $R_p$  = Resistencia de dispersión a tierra.
- $\rho$  = Resistividad del terreno en ohms-metro.
- $L$  = Longitud del electrodo.
- $r$  = radio del electrodo.

## 2.- EN FORMA DE PLACA.

Es un electrodo artificial de forma rectangular o circular, que ofrece una gran superficie de contacto con el terreno en relación a su grosor.

La dimensión de un electrodo en forma de placa depende de la resistencia de dispersión a tierra. Suponiendo una placa circular ( ver fig. 3.8 ) de diámetro  $d$ , la resistencia de dispersión será:

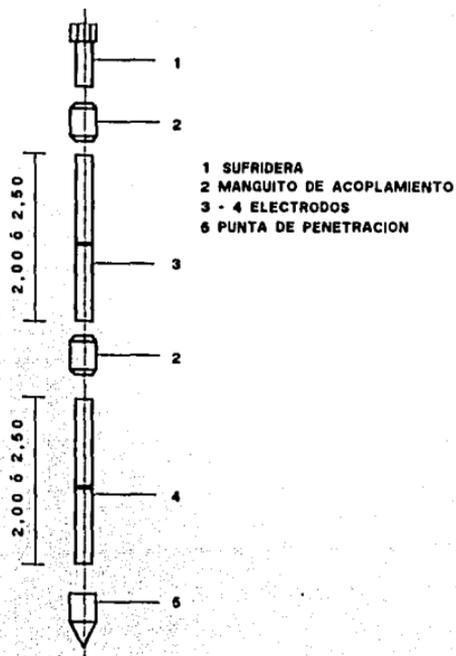


FIG. 3.5 REPRESENTACION DE UN ELECTRODO EN FORMA DE PICA O VARILLA

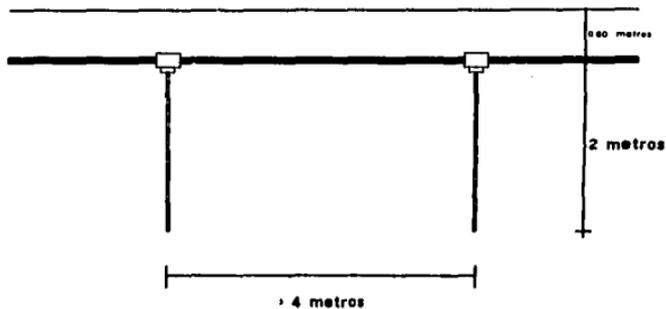


FIG. 3.6 SISTEMA DE COLOCACION DE ELECTRODOS EN PARALELO

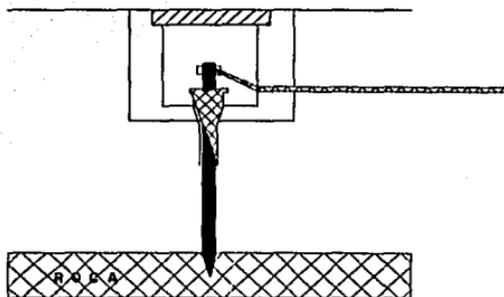


FIG. 3.7 REGISTRO DE UNA TOMA DE TIERRAS EN FORMA DE VARILLAS.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

$$R_r = \frac{\rho}{4d} \Omega$$

Sí la placa es rectangular ( ver fig. 3.8 ), la fórmula anterior se sustituye por la siguiente:

$$R_r = \frac{\rho}{4.5 \sqrt{a b}} \Omega$$

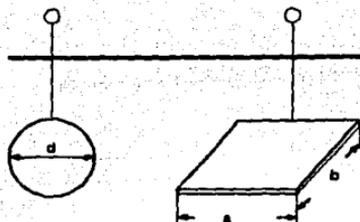
Donde en ambos casos:

- $R_r$  = Resistencia de dispersión a tierra.
- $\rho$  = Resistividad del terreno.
- $d$  = Diámetro de la placa.
- $a, b$  = Longitudes de los lados de la placa.

En general, de acuerdo a las normas VDE, se deben de utilizar placas de 1.0 X 0.5 metros ( ver fig. 3.9 ). El canto superior se colocará a 1.0 m por debajo de la superficie del terreno como mínimo.

Las placas más comúnmente utilizadas son de:

- 1.- Placas de acero: Con medidas de 0.5 X 1.0 m , y espesor mayor de 3 mm.
- 2.- Placas de cobre: Con las dimensiones arriba indicadas y un espesor mayor de 2 mm.



$d$  = DIÁMETRO DE LA PLACA CIRCULAR.  
 $a$ ,  $b$  = DISTANCIAS DE LOS LADOS DE LA PLACA RECTANGULAR.

FIG. 3.8 ELECTRODOS EN FORMA DE PLACA CIRCULAR Y RECTANGULAR.

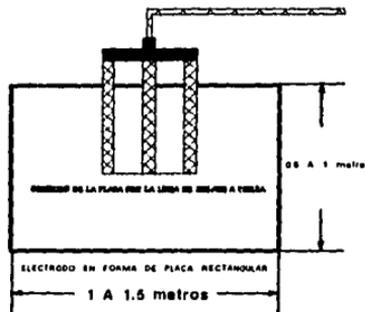


FIG. 3.9 FORMA DE CONECTAR UNA PLACA RECTANGULAR CON LA LÍNEA DE ENLACE A TIERRA UTILIZANDO SOLDADURA DE ALTO PUNTO DE FUSIÓN.

Todas las piezas de acero que se encuentren enterradas deben ser galvanizadas al fuego o recubiertas de cobre.

El sistema de colocación de estas placas macizas en el terreno, se hace practicando en el terreno un hoyo de dimensiones tales que el borde superior de la placa quede ( según norma VDE ) a 1.0 metros de la superficie del terreno. Es indiferente que la placa se coloque en forma horizontal o verticalmente.

Si es necesario colocar más de una placa, para el caso de placas rectangulares, se separan como mínimo 3.0 metros entre sí; para el caso de placas radiales, el ángulo entre dos radios contiguos no deberá ser menor de 60 grados.

La forma de conexión de las placas con la línea de enlace a tierra, se hará con soldadura de alto punto de fusión a lo ancho de la placa.

El uso de este tipo de electrodos va en decremento, debido a que para lograr su instalación se requiere de un mayor espacio y esfuerzo, además de su costo.

### 3.- ELECTRODOS DE CINTA.

Se fabrican de cinta metálica, materiales cilíndricos o cables desnudos, que se entierran generalmente a poca profundidad ( de 0.5 a 1.0 m. ). Según su forma, pueden ser:

a).- En forma de anillo. Es un conductor desnudo con sección mínima ( según norma VDE ) de  $35 \text{ mm}^2$ , que se coloca en el fondo de una excavación, bordeando exteriormente los cimientos de la instalación, a una profundidad de entre 0.5

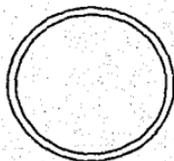
a 1.0 m. De esta manera, se forma un anillo de perímetro igual o superior al de la instalación; puesto en el más íntimo contacto posible con el terreno ( ver fig. 3.10 ).

b).- En forma radial. Se construyen a partir de seis ramificaciones de material cilíndrico ( ver fig. 3.10), siendo éste: de alambre de acero con sección mínima ( según norma VDE ) de  $100 \text{ mm}^2$  y de espesor mínimo de 3 mm.; cable galvanizado de hierro, con sección mínima de  $95 \text{ mm}^2$ . Algunas veces se emplea también: el acero cobreado, con sección mínima de  $50 \text{ mm}^2$ .; cinta de cobre, con sección mínima de  $50 \text{ mm}^2$ . y espesor mínimo de 2 mm. En cualquiera de los casos anteriores, el ángulo entre ramificaciones no debe ser menor a los  $60^\circ$ .

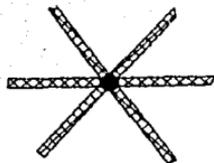
c).- En forma de malla. Como su nombre lo dice, es un enmallado en forma rectangular ( ver fig. 3.10 ), que se hace por medio de conductores enterrados a una profundidad de 0.5 a 1.0 m., de acuerdo a el tipo de suelo donde se instale. La malla debe complementarse en los nudos y a lo largo de su perímetro con varillas clavadas, a fin de reducir la resistencia de dispersión a tierra. Los conductores deberán tener como mínimo  $50 \text{ mm}^2$  de sección transversal, de acuerdo a norma VDE si son conductores de acero cobreado.

A través de la fórmula de Laurent, se puede conocer en forma analítica la resistencia de dispersión a tierra de un electrodo en forma de malla:

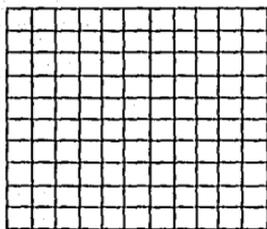
$$R_r = \left( \frac{\rho}{4L} + \frac{\rho}{L} \right) \Omega$$



EN FORMA DE ANILLO.



EN FORMA RADIAL



EN FORMA DE MALLA

FIG. 3.10 EJEMPLOS DE ELECTRODOS DE CINTA

Donde:

- $R_T$  = Resistencia de dispersión.
- $r$  = Radio equivalente en metros.
- $L$  = Longitud total del conductor en metros, incluyendo varillas.
- $\rho$  = Resistividad del terreno en ohms-metros.

#### 4.- OTROS ELECTRODOS.

a).- HORMIGÓN ARMADO. El hormigón armado puede utilizarse como electrodo de tierra metálico (armadura), inmerso en un medio razonablemente homogéneo (hormigón), cuya resistividad es del orden de los 30 ohms-metro. A su vez, el hormigón está inmerso en el terreno, cuya resistividad varía desde 1.0 hasta 10,000 ohms-metro. La resistencia de dispersión, entonces, la determinan ambas resistividades (hormigón - suelo).

En terrenos difíciles, este tipo de electrodos puede brindar una óptima solución técnica, dando resistencias de dispersión a tierra muy bajas, con la ventaja de que el costo es prácticamente nulo; ya que se hace uso de la obra civil de la instalación. Lo que se necesita para llevar a cabo lo anterior, es hacer accesible al exterior la armadura de las bases; para ello, deben de soldarse las barras de armadura con pernos que salgan de la base sobre el nivel del suelo. De esta forma, todas las bases quedan automáticamente conectadas entre sí, obteniéndose resistencias de dispersión a tierra muy bajas.

b).- VIGAS METÁLICAS. Las vigas introducidas en el terreno se pueden comportar como electrodos verticales o picas, y se

toma como resistencia de dispersión a tierra la de una pica que tiene forma circular y de diámetro la del círculo que inscribe a la viga, ver fig. 3.11.

En forma analítica se puede obtener el valor de resistencia a tierra a través de la siguiente fórmula:

$$R_T = 0.366 \frac{\rho}{h} \log \left( \frac{3h}{d} \right) \Omega$$

Donde:

$R_T$  = Resistencia de dispersión a tierra en ohms.

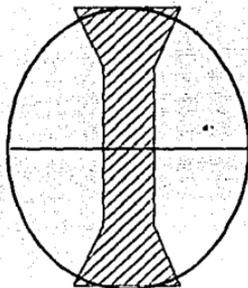
$\rho$  = Resistividad del terreno en ohms-metros.

$d$  = Diámetro del cilindro.

$h$  = Profundidad de la viga enterrada.

c).- TUBERIA DE ACERO. Son tubos de acero con perforaciones, que tienen por lo menos 19 mm. de diámetro exterior y longitud mínima de 2.0 metros. Se debe de contar con un registro ( ver fig. 3.12 ) para facilitar el mantenimiento y la adición de agua a través del tubo con otras soluciones químicas, con el objeto de incrementar el porcentaje de humedad y, por tanto, la conductividad del terreno.

d).- ELECTRODOS PARA ZONA ROCOSA. Cuando se tiene un terreno con mantos de rocas en la superficie, y la aplicación de varillas o la excavación de zanjas para la aplicación de cualquier otro tipo de electrodo es muy complicado; es necesario diseñar una red de tierras que permita captar la mayor cantidad de humedad posible en el subsuelo, a través de



d = DIAMÉTRO EQUIVALENTE A UNA PLACA CIRCULAR.

FIG. 3.11 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UNA VIGA METALICA  
COMO ELECTRODO ARTIFICIAL.

la acción de capilaridad. Un método efectivo es el de instalar conductores o estrechas bandas de metal en largas zanjas, cavando como la capa rocosa lo permita.

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

Como se ha visto, el problema del dimensionamiento de una red de tierras consiste en el cálculo de un conjunto de elementos dispersores conectados de manera conveniente para que nos otorguen una resistencia a tierra muy pequeña. Para el cálculo analítico de la resistencia de dispersión a tierra se tiene la tabla B.1 ( apéndice B ), que nos describe las fórmulas más utilizadas en el cálculo de la resistencia a tierra de electrodos con diferentes formas geométricas.

#### **3.4.1.4 INFLUENCIA ELECTROQUIMICA DE LOS ELECTRODOS.**

Todo metal convertido en electrodo, e introducido en el terreno, se corroe debido a los componentes mismos del terreno ( humedad, sales minerales, elementos químicos nitrados, etc. ). Lo anterior, afecta el funcionamiento y confiabilidad de la conexión a tierra cuando la sección transversal del electrodo corroído se hace inadecuada para la corriente diseñada.

Por lo anterior, se deben conocer las causas que provocan la corrosión en los electrodos, puesto que no es posible inspeccionar o probar el buen funcionamiento de la extensa conexión a tierra para localizar el daño de corrosión, para reforzar o reemplazar las secciones corroídas de los electrodos a tierra. Conociendo las causas que producen la

corrosión en los electrodos de puesta a tierra, se pueden elegir éstos para un tipo de terreno determinado. La corrosión se debe a las siguientes causas:

- 1.- Reacción química entre el agua del terreno y el electrodo.
- 2.- Ataque de los agentes químicos contenidos en el terreno.
- 3.- Corrientes eléctricas que atraviesan el terreno.
- 4.- Corrientes galvánicas.

Las corrientes, tanto continuas como alternas, no producen daños por corrosión y sólo pueden verse afectadas en las proximidades de la red de distribución de corriente continua.

La influencia de los agentes químicos, las fábricas de productos químicos, la humedad, el agua de mar, etc., producen corrosión en los electrodos si éstos no están protegidos convenientemente. En el caso de las corrientes galvánicas, producidas por el contacto entre diferentes materiales, puede llegar en el peor de los casos a la destrucción de las piezas metálicas colocadas en el terreno.

La forma más apropiada para luchar contra la agresión electroquímica de los electrodos, es el perfecto conocimiento de los electrolitos dominantes del terreno y de su interacción sobre los diferentes metales que se utilizan para fabricar electrodos. Un análisis detallado es necesario para determinar el grado de corrosión de los electrodos en un sitio dado.

Los materiales, como se ha visto, más utilizados para la elaboración de electrodos son : el cobre, el hierro, el acero galvanizado, el acero cobreado y el aluminio. A continuación se describe el comportamiento frente a la corrosión de los materiales anteriores para la construcción de los electrodos.

**CORROSION DEL COBRE.** Resiste, generalmente, a la corrosión, excepto en suelos alcalinos o en medios amoniacales ( agua de estiércol ). También le atacan las cenizas y las escorias.

**CORROSION DEL HIERRO.** En el hierro galvanizado, suelen corroerse más las partes enterradas a profundidad que las superficiales, y de éstas, la zona inmediata bajo la superficie.

**CORROSION DEL ACERO.** Se corroe fácilmente en medios alcalinos y amoniacales, pero tiene ventajas tecnoeconómicas sobre el cobre.

**CORROSION DEL ALUMINIO.** Es atacado por el ácido clorhídrico, igualmente, no deben hacerse redes de tierra con electrodos de aluminio en las inmediaciones del mar.

#### **3.4.1.5 CONDUCTORES Y CONECTORES.**

Los conductores de conexión o líneas de puesta a tierra, son aquellos que se unen con el electrodo de tierra en la parte de una instalación que deba conectarse a tierra, siempre y cuando la línea esté fuera del suelo o se haya colocado en el mismo provista de aislamiento.

La función que cumplen es la de conducir la corriente eléctrica nociva a través de ellos, los materiales más utilizados en su fabricación son: el cobre y el aluminio, pero el más comúnmente utilizado es el cobre. Se dimensionan con la máxima corriente de falla que se prevea, siendo como mínimo ( de acuerdo norma VDE )  $16 \text{ mm}^2$  de sección transversal.

Estos conductores se pueden establecer en las mismas canalizaciones que los conductores de energía, siguiendo las normas técnicas para instalaciones eléctricas ( NTIE ). El recorrido deberá ser lo más corto posible y sin cambios bruscos de dirección, además, serán protegidos contra la corrosión y el desgaste mecánico.

Los conectores son los elementos utilizados para unir en forma eficaz los diferentes elementos de la red de tierras, y efectuar al mismo tiempo la conexión de los elementos que se quiere aterrizar.

Los conectores normalmente utilizados son:

- 1.- Conectores atornillados.
- 2.- Conectores por compresión.
- 3.- Conectores por soldadura.

Los conectores atornillados se fabrican de bronce con alto contenido de cobre, formando dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material es de bronce al silicio; lo anterior es para brindarle una alta resistividad mecánica y corrosiva ( ver fig. 3.13 ).

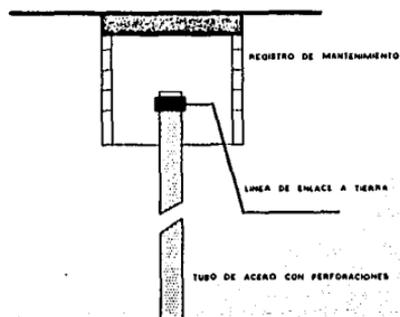


FIG. 3.12 TUBERIA DE ACERO UTILIZADA COMO ELECTRODO.

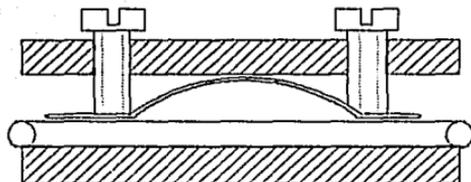


FIG. 3.13 SISTEMA DE CONECTORES ATORNILLADOS

Los conectores por compresión son más económicos que los atornillados, y también dan una buena garantía de contacto.

Las conexiones soldadas se usaron mucho hace algunos años, pero se han ido desplazando con la introducción de los conectores atornillados. Lo anterior, debido a que se detectaban fallas en la conexión de los conductores, porque la fusión de las uniones era irregular y formaban grandes zonas huecas que producían falsos contactos y aumentaban la resistencia eléctrica de la unión.

#### 3.4.1.6 CONDUCTORES DE PROTECCION.

Un conductor de protección es el encargado de unir eléctricamente la masa de una instalación y equipo eléctrico con el fin de asegurar la protección contra los contactos indirectos.

El dimensionado de estos conductores viene dado en función de la sección del conductor de fase de la instalación que protege, y que se puede resumir en la siguiente tabla:

CONDUCTOR DE FASE mm <sup>2</sup>	CONDUCTOR DE PROTECCION mm <sup>2</sup>
S ≤ 16	S*
16 ≤ S ≤ 35	16
S > 35	S/2

TABLA 3.5

\* Sección mínima :  $2.5 \text{ mm}^2$ , si no forman parte de la canalización de alimentación y tienen protección mecánica;  $4 \text{ mm}^2$  si no tiene protección mecánica.

Estas secciones se pueden mantener siempre y cuando se instale un dispositivo de corte que garantice que en caso de defecto franco los conductores de protección no alcancen un incremento de temperatura de:

- \*  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  en conductor aislado.
- \*  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  en conductor desnudo.

Los conductores desnudos no podrán entrar en contacto con los elementos combustibles y su paso a través de pared, techos, etc. ; se hará mediante un tubo no combustible y de resistencia adecuada.

## **CAPITULO IV**

### **" MEDICION DE LA RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL TERRENO Y PROCEDINIENTOS UTILES PARA ABATIRLA "**

#### **4.1 INTRODUCCION.**

Desde el punto de vista eléctrico, la determinación de la resistividad del terreno deberá de obtenerse a través de mediciones en forma directa. Las mediciones deberán hacerse en varios puntos dentro del terreno donde piense llevarse a cabo la instalación, empleando alguno de los métodos que a continuación se describen.

#### **4.2 MEDICION ELECTRICA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.**

Los métodos que se aplican para la medición de la resistividad del terreno tienen su principio en la ley de ohm, por lo que para efectuar dicha medición, es necesario circular corriente a través de él. El método generalizado es el de emplear cuatro varillas ( método de los cuatro electrodos ). Existen varios métodos derivados de éste, basados en la teoría desarrollada por Frank Wenner.

##### **4.2.1 METODO DE WENNER.**

La configuración universal del método de Wenner consiste en introducir cuatro electrodos en línea recta sobre el

terreno donde piense llevarse a cabo la instalación ( ver fig. 4.1 ), a una misma profundidad de penetración. Las mediciones de resistividad dependerán de la distancia que exista entre los electrodos de prueba y de la bondad del contacto de éstos con el terreno, no así del tamaño, forma y material de los electrodos.

Si la distancia entre los electrodos de prueba y la resistencia que se opone al paso de la corriente son conocidos, y siempre que en la medición los electrodos de prueba 1 y 4 sean usados para circular corriente, y los electrodos 2 y 3 sean usados para medir potencial; la resistividad del terreno vendrá dada por la siguiente expresión:

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

Donde:

- $\rho$  = Resistividad del terreno en ohms - metro.
- $R$  = Resistencia medida en ohms.
- $a$  = Distancia entre electrodos, en metros.
- $b$  = Profundidad de penetración de los electrodos, en metros.
- $n$  = Tiene un valor entre 1 y 2, dependiendo de la relación  $b/a$  como se indica a continuación:

Cuando :

$$b = a$$

$$n = 1.187$$

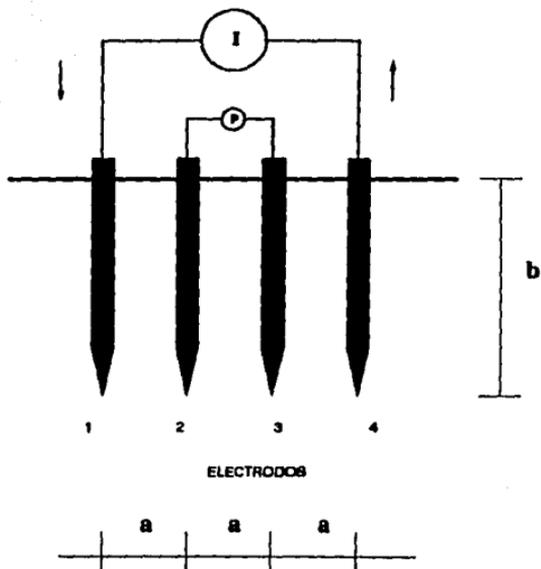


FIG. 4.1 CONFIGURACION UNIVERSAL DEL METODO WENNER

$$b = 2a$$

$$n = 1.038$$

$$b = 4a$$

$$n = 1.002$$

La ecuación anterior puede simplificarse si se cumplen las siguientes condiciones:

Si  $b$  es muy pequeña comparada con  $a$ , entonces se usa:

$$\rho = 2\pi a R \Omega \cdot n$$

Si por el contrario,  $b$  es muy grande comparada con  $a$ , se utiliza:

$$\rho = 4\pi a R \Omega \cdot n$$

#### 4.2.2 METODO DE SCHLUMBERGER.

Es una modificación del método de Wenner, y consiste en introducir cuatro electrodos en línea sobre el terreno donde piense hacerse la instalación, manteniendo la distancia constante en los electrodos centrales y variando la distancia de los electrodos exteriores ( ver fig. 4.2 ) a partir de éstos; la variación debe de hacerse a distancias múltiplos (  $na$  ) de la separación base de los electrodos exteriores.

La expresión de la resistividad viene dada por :

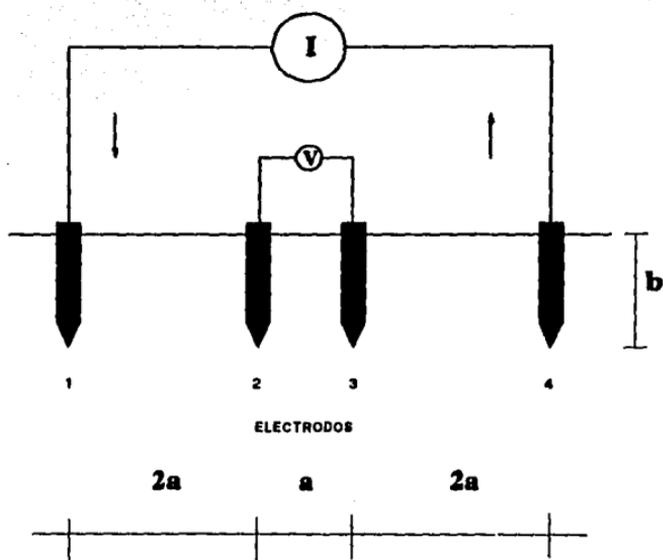


FIG. 4.2 CONFIGURACION UNIVERSAL DEL METODO DE SCHLUMBERGER

$$\rho = \frac{V}{I} \frac{\pi}{4} (n+1) a. \quad \Omega \cdot m$$

Este método es de gran utilidad cuando el aparato para medir la resistencia ( megger de tierras ) no tiene la precisión adecuada para valores de resistencia pequeños.

#### 4.2.3 METODO DE SHEPARD CANES.

Este método consiste en introducir sobre el terreno dos electrodos de prueba, uno de mayor longitud que el otro para evitar una posible polarización. Se utiliza una batería de corriente continua, con capacidad de 3 volts, y un medidor conectado en serie ( miliamperímetro ) graduado para leerse en ohms - metro. Este es un método de medición directa, y se utiliza para la medida de pequeñas muestras de terreno.

#### 4.3 PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACION DE LOS METODOS ANTERIORES EN LA MEDICION DE LA RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL TERRENO.

La resistividad  $\rho$  del terreno se mide, de acuerdo a especificación de CFE, a través del siguiente procedimiento:

##### 1.- SELECCION DE APARATOS Y EQUIPO.

- a) Megger de tierra o Vibroground.
- b) Electrodo de prueba.

Los electrodos normalmente son varillas tipo Copperweld de 15.9 mm. de diámetro y su longitud puede variar de 750 mm. a 1,000 mm. El diámetro de las varillas deberá ser menor, cuando el suelo sea suave o cuando se requiera medir la resistividad superficial con pequeña separación entre varillas.

- c) Cables.  
Deberán de ser de cobre con aislamiento para 600 V, y de calibre 14 AWG ó mayor. La longitud dependerá de la separación máxima entre electrodos que se desea medir.
- d) Conectores mecánicos de grapa.
- e) Cinta métrica.

## 2.- METODO DE MEDICION.

Para efectuar la medición de la resistividad del terreno, se puede utilizar cualquiera de los métodos antes descritos. Generalmente, se utiliza el método de Wenner por ser el más confiable y consiste en hacer lo siguiente:

- a) Clavar cuatro electrodos sobre el terreno a una profundidad de 200 a 300 mm., dispuestas en línea recta con una separación uniforme entre ellos. Se debe procurar que los electrodos quede más o menos en un plano horizontal y no debe de haber huecos entre ellos.
- b) Las terminales del instrumento  $C_1$  y  $C_2$  se conectan a través de los cables a los electrodos de los

extremos, así mismo, las terminales de potencial  $P_1$  y  $P_2$  a los electrodos centrales, como lo indica la fig. 4.3

- c) Se energiza el instrumento de acuerdo a su instructivo, y se toman las lecturas respectivas de resistencia en ohms.
- d) Se calcula la resistividad mediante la fórmula respectiva, de acuerdo al método utilizado.

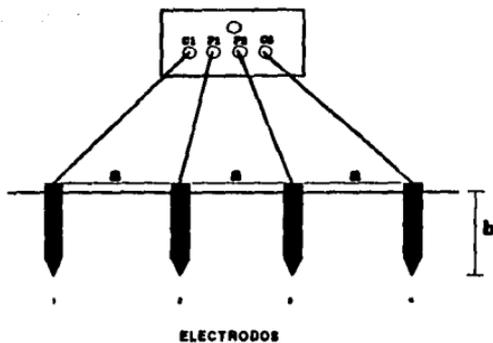
### 3.- ERRORES EN LA MEDICION.

Durante la medición se pueden tener errores, debidos principalmente a :

- a) Cuando la distancia entre los electrodos es muy grande ( valores pequeños de resistencia en el límite o por abajo de la escala menor del instrumento ), se puede presentar inestabilidad en el instrumento. Cuando esto sucede, basta con aumentar la distancia entre los electrodos centrales, como se muestra en la fig. 4.4 , y utilizar la fórmula:

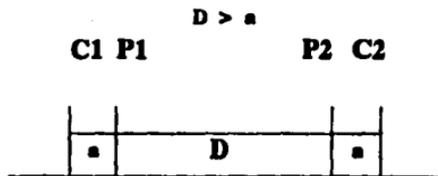
$$\rho = \frac{\pi R (a^2 + d)}{D} \quad \Omega \cdot m$$

Con resistividades elevadas ( aprox. 3,000 ohms - metro ) y teniendo una separación desigual de los electrodos centrales, se puede llegar a tener también inestabilidad en el instrumento.



- • SEPARACION ENTRE ELECTRODOS
- • PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO

**FIG. 4.3 MEDICION DE LA RESISTIVIDAD.**



**FIG. 4.4 ERROR EN LA MEDICION**

- b) Falta de calibración en el instrumento de medición, por lo que antes de utilizar el instrumento, se debe de comprobar su ajuste.

#### 4.- PROCEDIMIENTO DE LA MEDICION EN CAMPO.

- a) En el terreno donde se desea medir la resistividad, se trazan dos líneas de prueba, como se indica en la fig. 4.5 . Puede escogerse  $L_1$  y  $L_2$ ,  $L_3$  y  $L_4$  ó ambas si se requiere de mayor información, dependiendo del tamaño del terreno.
- b) Se mide la resistencia  $R$  en cada línea de prueba con el método de medición adecuado a las características del terreno, comenzando al centro de la línea y variando cada vez la separación entre electrodos, tal y como se muestra en la fig. 4.6

El número de mediciones se limita hasta aproximadamente  $0.5 L$ . Por ejemplo, si  $L = 100$  m, la máxima será de aproximadamente 50 m. y sería necesario realizar tres mediciones más aumentando cada vez 4 m. En subestaciones eléctricas pequeñas, el número de mediciones debe de ser menor.

- c) Se calcula la resistividad con la siguiente fórmula:

$$\rho = 2 \pi a R \Omega \cdot m$$

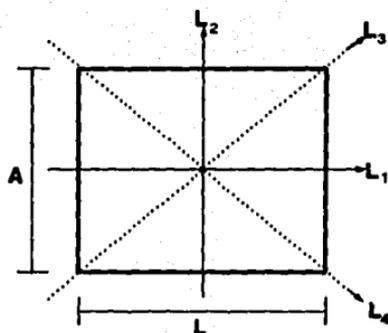


FIG. 4.6 MEDICION DE CAMPO

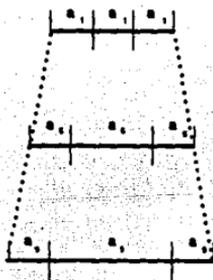


FIG. 4.6 MEDICION DE LA RESISTENCIA R

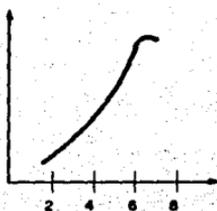
Los datos obtenidos a través de esta fórmula se reportan como se indican en la tabla siguiente ( tabla 4.1 ):

SEPARACION ENTRE VARILLAS	LINEA DE PRUEBA 1	LINEA DE PRUEBA 2
$a_1$	$\rho_{11}$	$\rho_{21}$
$a_2$	$\rho_{12}$	$\rho_{22}$
$a_3$	$\rho_{13}$	$\rho_{23}$
$a_4$	$\rho_{14}$	$\rho_{24}$
$a_5$	$\rho_{15}$	$\rho_{25}$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$a_g$	$\rho_{1g}$	$\rho_{2g}$

TABLA 4.1

- d) Con los valores de  $a$  y  $p$  se trazan las curvas  $p$  vs.  $a$ , las cuales podrán resultar similares a las de la fig. 4.7, con éstos valores o mediante la comparación de las curvas obtenidas, se puede obtener el modelo del terreno ( homogéneo ó heterógeno, ver fig. 4.8 ).

Cabe aclarar que la medición se debe de realizar en la época de menor humedad anual.



SUELO HOMOGENEO.

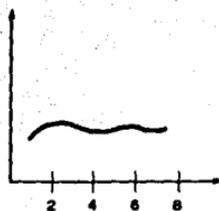
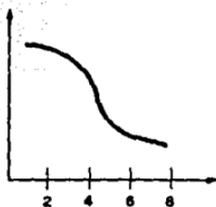
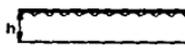
SUELO HETEROGENEO DOS CAPAS  
( DISMINUYE CON LA PROFUNDIDAD ).SUELO HETEROGENEO DOS CAPAS  
( DISMINUYE CON LA PROFUNDIDAD ).

FIG. 4.7 CURVAS QUE REPRESENTAN LOS DISTINTOS TIPOS DE SUELO.



MODELO HOMOGENEO.



MODELO HETEROGENEO

FIG. 4.8 REPRESENTACION DE LOS DOS TIPOS DE TERRENO  
EN FORMA ESQUEMATICA.

#### **4.4 PROCEDIMIENTOS UTILES PARA ABATIR LA RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL TERRENO.**

Como se ha visto, dependiendo de la naturaleza del terreno, se tienen distintos valores de resistividad eléctrica. Cuando éstos valores son superiores a los especificados en las tablas, se debe aplicar un método para abatir la resistividad eléctrica, y de esta manera obtener una red de tierras con un valor razonablemente bajo de resistencia.

La NTIE especifica que para mallas de tierra en subestaciones eléctricas, la resistencia total no debe de exceder los 10 ohms; pero desde luego, es preferible alcanzar la mínima posible.

Para lograr lo anterior, debe de hacerse un estudio minucioso del terreno, con el objeto de aplicar un método en especial para reducir la resistividad eléctrica; teniendo en cuenta que un método se aplica sólo para un tipo de terreno en particular y que no es aplicable en cualquier otro. A continuación se describen algunos de los métodos más comúnmente utilizados para abatir la resistividad eléctrica del terreno o la resistencia de la red de puesta a tierra.

##### **4.4.1 ELECTRODOS PROFUNDOS.**

Este método se utiliza para reducir la resistencia eléctrica de la red de tierras, y es utilizado en terrenos con alta resistividad eléctrica ( zonas rocosas, zonas volcánicas, etc. ). Consiste en hacer perforaciones profundas hasta encontrar terrenos de baja resistividad eléctrica, y se

introducen electrodos especiales ( seccionados ) empalmados ( uno encima del otro ). La técnica de implantación de este tipo de electrodos consiste en colocar uno encima del otro, unidos a través de un " manguito " con rosca hembra.

Al aumentar la profundidad, disminuye la resistividad eléctrica, por tanto es aconsejable realizar perforaciones de hasta 100 m. de profundidad para obtener una resistividad eléctrica muy baja. El aspecto más importante de este método es que la resistividad obtenida de este modo es estable e independiente de las variaciones estacionales.

#### **4.4.2 ELECTRODOS MULTIPLES EN PARALELO.**

La aplicación de este método consiste en colocar múltiples electrodos de distintas configuraciones ( en forma de anillo, en forma de estrella, en forma de malla, etc. ) a una distancia entre sí, en por lo menos, a la longitud del electrodo más grande. Si la configuración de los electrodos tiene la distancia adecuada, se cumplirá la ley de las resistencias en paralelo, es decir, los electrodos tendrán la mitad del valor de la resistencia de uno sólo, y dependerá de la uniformidad del terreno.

#### **4.4.3 TRATAMIENTOS QUINICOS.**

Cuando la resistividad en algunos terrenos es demasiado elevada y no puede abatirse la resistividad eléctrica con los métodos anteriormente descritos, se tendrá que diseñar redes de tierra de enormes dimensiones físicas a un costo muy elevado. Si además, se tiene limitado el espacio de la superficie donde se colocará la red de tierras, se tendrá que

recurrir a reducir artificialmente la resistividad eléctrica del terreno a través de tratamientos químicos.

El tratamiento químico de un terreno consiste en agregar soluciones especiales ( sales minerales, carbón, sulfatos, etc. ), disueltas en agua y vertidos sobre el terreno próximo al electrodo, o directamente sobre éste si es del tipo tubular. Estas soluciones originan precipitados que dan origen a formaciones de masas gelatinosas, éstas se desparraman sobre el terreno produciendo numerosas ramificaciones de agua. De esta manera, resulta aumentada la conductividad del terreno y la superficie de contacto con el electrodo.

El problema básico en el tratamiento químico del terreno es, por una parte, la corrosión a que es sometido el electrodo con este tipo de soluciones, pues los resultados esperados no siempre corresponden a lo previsto; y por otra parte, algunas de estas soluciones contienen productos tóxicos cuya manipulación exige de mucho cuidado.

Los métodos para el tratamiento químico del terreno más comúnmente empleados son:

#### **4.4.3.1 AGREGADO DE SALES SIMPLES.**

Es un método típico para el tratamiento químico del terreno mediante sales minerales, y consiste en cavar una zanja circular rodeando al electrodo sin entrar en contacto directo con él ( ver fig. 4.9 ), a la zanja se le agregan las sales minerales ( que pueden ser: sulfato de magnesio, sulfato de cobre, cloruro de sodio, cloruro de calcio ) y posteriormente se tapa con tierra. Lo anterior se hace con el

fin de minimizar el efecto corrosivo que producen las sales en el electrodo, además de lograr una mejor distribución de dichas sales sobre el terreno.

Se recomienda utilizar el sulfato de magnesio por ser el menos corrosivo, sin embargo, la sal común ( cloruro de sodio ) es la más económica.

El inconveniente de este método es que sus efectos no son permanentes en el tiempo, ya que las sales agregadas al terreno se disuelven a través del filtraje de agua producido por las lluvias estacionales. Por lo anterior, las sales deben reponerse después de un determinado período de tiempo, dependiendo del régimen de lluvias y de las propiedades mismas del terreno.

Debido a lo anterior, este método es poco aconsejable, ya que actualmente se dispone de métodos más eficaces, de gran permanencia y menos corrosivos.

#### **4.4.3.2 AGREGADO DE SALES TIPO GEL.**

Tratando de superar el inconveniente del método anterior ( la permanencia de las sales en el terreno ), se desarrolló este método; el cual consiste en irrigar al terreno dos o más sales en una solución acuosa, que acompañadas de un catalizador en la proporción adecuada, reaccionan entre sí formando un precipitado en forma de gel insoluble. Lo anterior, le confiere al tratamiento químico del terreno una gran permanencia en el tiempo ( debido a la insolubilidad del gel ), una elevada conductividad eléctrica y una alta resistencia a los ácidos del terreno.

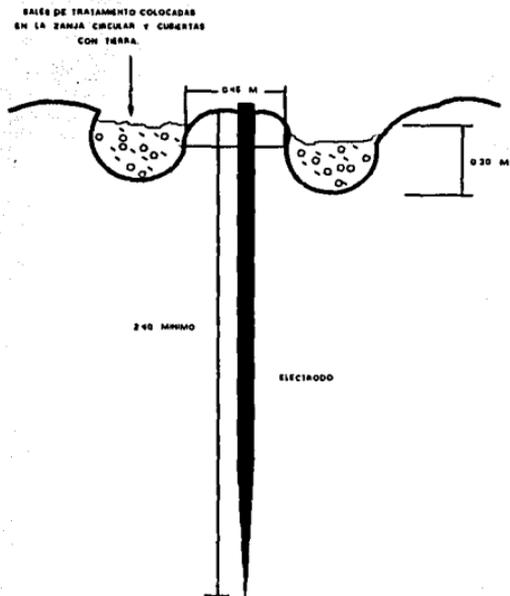


FIG. 4.9 METODO AGREGADO DE SALES SIMPLIS.

Las soluciones químicas empleadas más comúnmente en este método son:

**1.- Aerylamida.**

Contiene una resistividad aproximada de 1 ohm-metro, y el inconveniente principal es que tanto la sal como el catalizador son altamente tóxicos.

**2.- Gel de silicato.**

Es una solución de silicato de sodio con catalizadores adecuados que producen un gel de ácido sílico de baja resistividad (aproximadamente de 0.23 ohms-metro).

**3.- Método Sanick.**

Es un gel que se forma con la combinación de sulfato de cobre y ferrocianuro de sodio. Su resistividad es del orden de los 0.2 ohms-metro. El inconveniente principal de éste gel, es que sus soluciones deben aportarse al terreno en forma separada, ya que el tiempo de formación del gel es muy corto.

**4.4.3.3 AGREGADO DE CARBON.**

La resistividad del carbón es del orden de los 0.13 ohms-metro, inferior en forma significativa a la mayoría de los suelos y es además, independiente del contenido de humedad.

Este método consiste en colocar carbón sobre la excavación que se hace para colocar el electrodo, de este modo se está reemplazando el terreno de alta resistividad eléctrica en contacto con dicho electrodo por una sustancia de baja resistividad. Se consigue una apreciable reducción de la resistividad del terreno, aunque no independiente de la

humedad del mismo, ya que la cantidad de carbón es limitada con respecto al volúmen del terreno y la variación de la resistividad en función de la humedad aparece casi en la misma proporción que en electrodos instalados sin tratamiento artificial.

Comparado con el agregado de sales minerales simples, el agregado de carbón tiene la ventaja de ser permanente en el tiempo.

#### **4.4.3.4 AGREGADO DE BENTONITA.**

Uno de los sistemas más económicos y efectivos para lograr abatir la resistividad eléctrica, es tratar el terreno con base a la absorción de humedad de la bentonita sódica. La bentonita es un mineral de composición compleja, de notables características higroscópicas; buen conductor de la electricidad y que además protege a los electrodos ferrosos. Este método puede emplearse en cualquier tipo de terreno con características desfavorables.

La preparación consiste en hacer una mezcla de bentonita con agua de acuerdo a la siguiente proporción: por cada kilogramo de bentonita se deben de agregar 1.5 lts. de agua, mezclarse perfectamente hasta obtener una masa uniforme y gelatinosa. El agregado de esta mezcla sobre el terreno debe de hacerse de acuerdo al tipo de red de tierras que desea implementarse. A continuación se describe este método para dos tipos de redes de tierra.

- 1.- Redes de tierra con varillas. Para el uso de la bentonita en este sistema, se recomienda excavar la cepa donde se insertará el electrodo con las siguientes dimensiones:

0.45 m. de diámetro por 1.50 m de profundidad. Una vez inmerso el electrodo en el terreno, se procede a colocar la mezcla de agua y bentonita en el interior de la cepa hasta llenarla completamente.

- 2.- Tratamiento de terrenos rocosos. Para el uso de la bentonita en este tipo de terrenos, se efectúan perforaciones con equipo neumático en el terreno rocoso donde planea instalarse la red de tierras con brocas de 5.08 cm. de diámetro por 150 cm. de longitud. A continuación se elabora una parrilla con alambre de cobre semiduro desnudo, de calibre #6 AWG de una pieza ( sin empalmes ) para insertarse en las perforaciones ( el número de perforaciones depende de el valor de resistividad deseado ), unidos con entorche. Las zanjas y perforaciones se llenan con la mezcla de agua y bentonita, y la parte superior de la zanja se cubre con material de la excavación.

**CAPITULO V****" RECOMENDACIONES PARA EL CALCULO PRELIMINAR Y PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LA REDES DE TIERRA EN SUBESTACIONES ELECTRICAS "****5.1 INTRODUCCION.**

El objetivo del presente capítulo es exponer un método sistemático simplificado, que permita efectuar los cálculos preliminares que den una idea de las dimensiones de la red de tierras, en función de las resistividades del suelo y de las dimensiones de la subestación.

El cálculo preliminar consiste entonces, en determinar la longitud, calibre y disposición de los conductores que van a conformar el electrodo de dispersión; así mismo el número de varillas y la profundidad de enterramiento de cada una de ellas; de manera que satisfaga la necesidad de seguridad humana y del equipo, así como la continuidad en el servicio de la energía eléctrica.

Lo anterior con base a la norma No. 80 del IEEE ( The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. ), en la guía para la protección de tierras en subestaciones eléctricas ( Guide for Safety in A.C. Substations ).

**5.2 DEFINICIONES.**

Como se vió en el capítulo I, la conducción de altas corrientes a tierra en las instalaciones eléctricas debidas

a disturbios atmosféricos o a fallas en el equipo, producen gradientes eléctricos elevados en la vecindad del punto o puntos de contacto a tierra ( electrodo de dispersión ). Lo anterior es debido a la gran resistividad eléctrica de la tierra, ya que todas las corrientes que fluyen por ella producen una caída de tensión considerable, ( ver fig. 5.1 ) desarrollando fuertes intensidades de campo eléctrico que afectan a extensas regiones de la superficie terrestre donde se encuentra la instalación eléctrica.

Se ha demostrado ( ver fig. 5.2 ) que la caída de tensión es máxima en las proximidades del electrodo de dispersión, y disminuye a medida que aumenta la distancia radial desde el electrodo ( a unos 20 m. resulta inapreciable ). A los valores de tensión situados alrededor del electrodo de tierra se les conoce como embudo o cono de tensión.

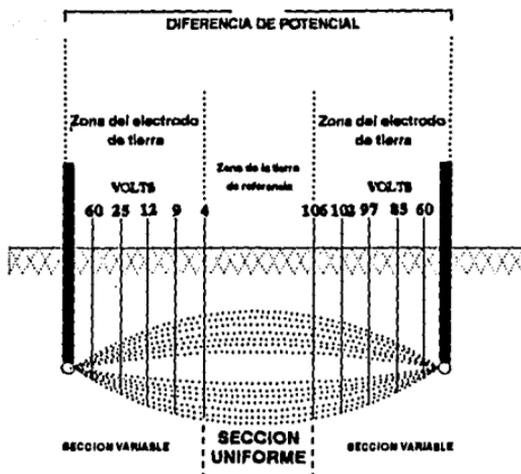
El diseño de la red de tierras consiste, de acuerdo a lo anterior, en calcular un conjunto de elementos dispersores convenientemente conectados de tal forma que se tenga un valor a tierra resultante:

$$R_T \leq \frac{V_T}{I_T} \quad \Omega \quad (1)$$

Donde:

$R_T$  = Resistencia de dispersión a tierra.

$V_T$  = Máxima tensión admisible.



**FIG. 5.1 TRAYECTORIAS DE CORRIENTE EN EL TERRENO.**

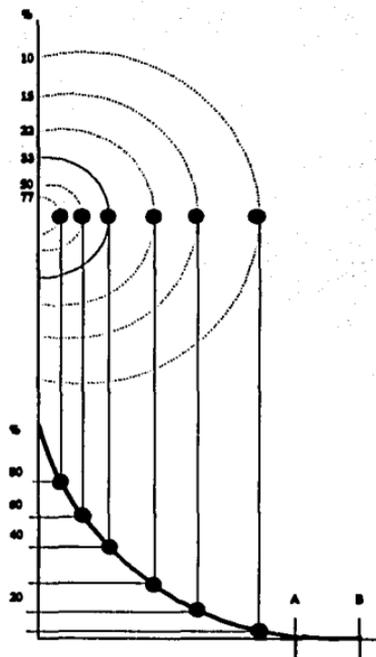


FIG. 6.2 Arriba : Líneas de igual tensión alrededor de un electrodo de tierra.  
 Abajo : Curva de tensiones alrededor de un electrodo, tomando como origen de distancias dicho electrodo.

$V_f$  = Máxima corriente de falla.

El valor de  $R_T$  debe tener un valor tal que limite la máxima caída de tensión que pueda aparecer entre una estructura y el suelo, dentro de los límites de seguridad que se establezcan.

Es necesario entonces, tener en cuenta los diversos casos que pueden presentarse al hacer contacto con superficies en diferente potencial. Las diferencias de potencial tolerables se determinan para tensión de " paso ", de " contacto ", y de " transferencia ".

#### 5.2.1 TENSION DE PASO.

Es la tensión que resulta entre los pies de una persona apoyada en el suelo, a distancia de un metro cuando se encamina hacia el lugar donde se encuentre la toma de tierra ( ver fig. 5.3 ). En otras palabras, es la diferencia de potencial existente entre dos puntos distanciados a un metro sobre la superficie de la tierra en el momento de ocurrir la falla.

La diferencia de potencial tolerable entre estos puntos de contacto puede determinarse en función de las constantes del circuito equivalente de la fig. 5.3, y de la corriente tolerable, aplicando el teorema de Thevenin se tiene:

$$E_f = ( R_t + 2 R_p ) V \quad (2)$$

Donde:

$R_k$  = Resistencia del cuerpo humano en ohms, se toman 1000 ohms - metro tal y como lo recomienda la norma 80 del IEEE.

$R_F$  = Es la resistencia a tierra bajo los pies en ohms; siendo su valor para fines prácticos:

3  $\rho_s$ , donde  $\rho_s$  es la resistividad del suelo en ohms-metros.

$I_k$  = Valor eficaz ( r.m.s. ) de la corriente que circula por el cuerpo en amperes, y se calcula como sigue:

$$I_k = \frac{0,116}{\sqrt{E}} \quad A \quad (3)$$

Donde:

t = Es el tiempo de duración del choque eléctrico en segundos.

Sustituyendo los valores de  $R_F$ ,  $R_k$ , e  $I_k$  en la ecuación número ( 2 ) tenemos:

$$E_s = (1000 \Omega + 2(3) \Omega) \frac{Q_s}{m} \frac{0,116}{\sqrt{E}} \text{ A} \quad (4)$$

$$E_s = \frac{116 + 0,7 Q_s}{\sqrt{E}} \text{ V} \quad (5)$$

La expresión anterior se utiliza para fallas menores a 5 segundos, para fallas permanentes sostenidas, se toma:

$$I_x = 0,009 \text{ A} \quad (6)$$

Por lo tanto:

$$E_s = (1000 \Omega + 6 \Omega) \text{ V} \quad (7)$$

### 5.2.2 TENSION DE CONTACTO.

Es la tensión que durante un defecto puede resultar aplicada entre la mano y el pie de una persona, que toque con ella la masa o el elemento metálico normalmente sin tensión. La fig. 5.4, nos muestra el circuito equivalente de la tensión de contacto.

En este caso el problema es algo más complicado, si el objeto tocado estuviera conectado a tierra inmediatamente abajo sin ninguna resistencia, la diferencia de tensión

máxima que se interceptaría sería aquella correspondiente a una distancia sobre el suelo igual al alcance normal, nuevamente aproximadamente igual a 1 metro. Desafortunadamente, los objetos tocados pueden estar conectados a tierra en puntos remotos.

Observando el circuito equivalente de la fig. 5.4, y aplicando el teorema de Thevenin, tenemos la siguiente expresión para calcular el voltaje tolerable cuando exista un posible contacto:

$$E_f = \left( R_k + \frac{R_f}{2} \right) I_k \quad V \quad (8)$$

Donde:

$R_k$  = Resistencia del cuerpo humano en ohms

$R_f$  = Es la resistencia a tierra bajo los pies en ohms.

$I_k$  = Valor eficaz ( r.m.s. ) de la corriente que circula por el cuerpo.

Sustituyendo valores como en ecuación ( 4 ), tenemos :

$$E_f = \frac{116 + 0,25 Q_d}{\sqrt{E}} \quad V \quad (9)$$

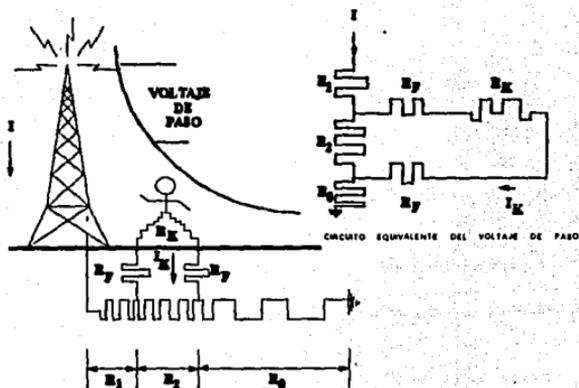


FIG. 5.3 POTENCIAL DE PASO

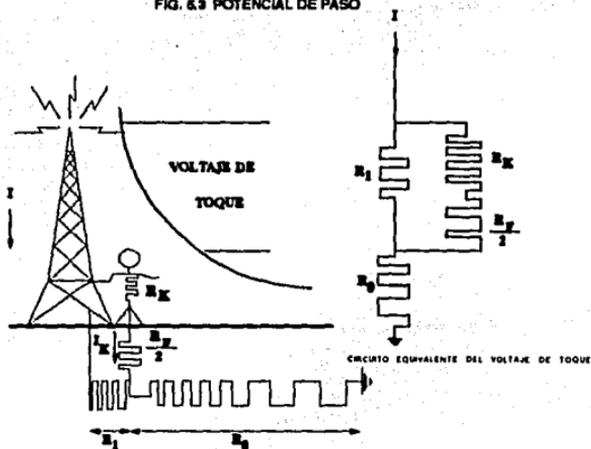


FIG. 5.4 POTENCIAL DE TOQUE

# FALLA DE ORIGEN

La expresión anterior es válida para fallas con duración menor a los 5 segundos.

### **5.2.3 TENSION DE TRANSFERENCIA.**

La fig. 5.5 muestra un ejemplo de contacto con potencial transferido. En este caso, una persona hace contacto con el conductor que está a tierra en un punto lejano de la subestación. La tensión del choque eléctrico puede ser esencialmente igual a la elevación total del potencial de la malla de tierra en condiciones de falla, y no la fracción correspondiente a un paso o un contacto con la mano a la distancia de un metro.

El procedimiento que se aplica para limitar el peligro de potenciales transferidos consiste en instalar juntas aislantes en las estructuras enterradas o superficiales cercanas a la subestación eléctrica.

El potencial de transferencia, al considerársele un caso especial de potencial de toque, su valor se limita a lo establecido por la expresión para voltaje de toque.

### **5.2.4 TENSIONES DE SEGURIDAD.**

De los puntos anteriores, se recomienda que en ningún punto de una instalación eléctrica se presenten tensiones de paso o de contacto superiores a los siguientes valores:

60 Volts, Cuando no se prevé la alimentación rápida de una falla de línea a tierra.

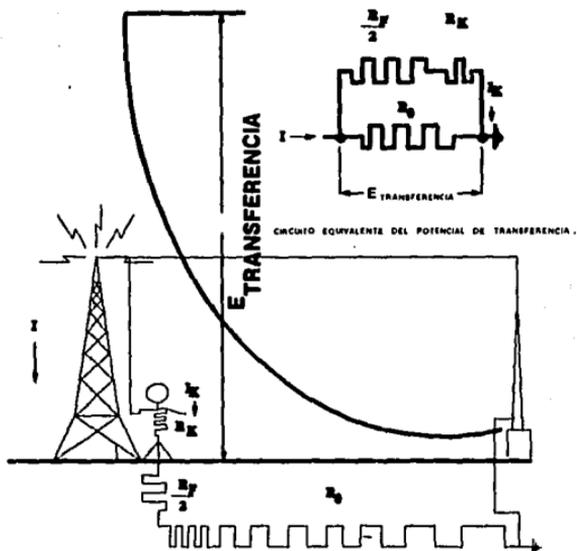


FIG. 6.6 POTENCIAL DE TRANSFERENCIA

125 Volts, Cuando la falla se elimine en un período de un segundo.

Si se desprecia la resistencia del pie a tierra, para tiempos de 1.2 segundos, puede aceptarse una tensión de 150 volts como límite.

Tensiones tan bajas para gradientes de potencial alto, bajo condiciones de falla, son muy difíciles de lograr en algunas condiciones. En estos casos, debe de considerarse la resistencia del pie hacia la tierra ( aumentándola en lo posible ), y tiempos muy cortos para la eliminación de las fallas, con el objeto de alcanzar los límites de seguridad a costos razonables.

### 5.3 DATOS PARA EL DISEÑO.

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

- 1.- PLANO DE LOCALIZACION GENERAL. Es un plano que muestra la disposición del equipo en la subestación, incluyendo la localización de las ceras ( perímetro externo ).
- 2.- AREA DE LA RED. Es el cálculo del área donde se va a instalar la red. En forma práctica, cuando se efectúa un diseño se presentan dos condiciones: primeramente la disponibilidad de un área limitada, que reflejará un valor límite de la resistencia a tierra del electrodo; o bien, el uso de un área no limitada, con lo que se logrará el valor de resistencia para el electrodo de puesta a tierra.

- 3.- TIPO DE SUBESTACION. Es la clasificación de la subestación eléctrica de acuerdo con lo indicado en el capítulo II, y debe de contener el tipo de transformador que utiliza, así como los datos de placa del mismo que contengan la siguiente información: voltaje de operación, potencia eléctrica, valor de reactancia, valor de inductancia, tipo de conexión eléctrica, frecuencia de operación; lo anterior para lograr un diseño óptimo de la red de tierras.
  
- 4.- DETERMINACION DE LA CORRIENTE MAXIMA DE FALLA. Es el valor de la corriente en amperes bajo condiciones de falla, considerando el crecimiento futuro de la red. El cálculo puede hacerse por medio de estudios del corto - circuito. Es importante establecer que la corriente de falla debe ser la de una fase a tierra, ya que ésta drena corriente a tierra aún antes de que actúen las protecciones.
  
- 5.- TIEMPO DE APERTURA DE LOS INTERRUPTORES. Es el tiempo en el cual actuarán los interruptores de seguridad, y es el tiempo el que determinará la magnitud de los potenciales de " Paso " y de " Contacto ". Actualmente existen interruptores que operan en un lapso de 0.2 seg., sin embargo, para efectos del cálculo se toman valores más conservadores, con tiempos de apertura del orden de 0.5 segundos.
  
- 6.- DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS Y RESISTIVIDAD DEL SUELO. Es la resistividad media del terreno en ohms - metros, medida de acuerdo con lo indicado en el capítulo IV.

- 7.- VALORES MAXIMOS ADMISIBLES DE POTENCIALES DE PASO Y DE CONTACTO. Son valores que deben de limitarse a valores normalizados para asegurar para la protección del personal dentro del área de la instalación durante la ocurrencia de una falla.

#### 5.4 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO.

Habiendo conocido los datos necesarios para el cálculo preliminar, debe procederse al diseño y construcción de la red de tierras. A continuación se presenta el método para efectuar los cálculos preliminares que den una idea de las dimensiones de la red.

##### 5.4.1 CALCULO DE LA RESISTENCIA A TIERRA DESEADA.

El primer parámetro que se determinará en el diseño, es la resistencia deseada para la red, la cuál depende de la corriente de falla a tierra y de la máxima elevación de potencial esperada en el área de la subestación eléctrica. La expresión que nos determina el valor de la resistencia deseada es la ley de ohm:

$$R_T = \frac{V}{I} \quad (10)$$

Donde :

$R_T$  = Resistencia total de la red, en ohms.

V = Elevación aceptable de potencial en la red, en volts.

I = Corriente máxima de corto - circuito, en amperes.

El resultado de esta expresión constituye un objetivo, ya que el valor de la resistencia dependerá del área y de la longitud del conductor que formará la red, sin embargo, nos da una idea de la magnitud que buscará satisfacerse.

#### 5.4.2 DETERMINACION DE LA CORRIENTE MAXIMA DE FALLA A TIERRA.

Es necesario determinar el valor correcto de la corriente para el cálculo de la red, para ello:

a) Se debe determinar el tipo de falla posible a tierra que produzca el máximo flujo de corriente entre la malla de la red de tierras y la tierra adyacente y por lo tanto, su mayor elevación de potencial; así como los mayores gradientes locales en el área de la subestación.

b) Se determina el valor máximo de la corriente de falla a tierra y la tierra circundante en el instante de iniciarse la falla (  $I''$  máximo ).

c) Se aplica un factor de corrección, cuando sea pertinente, que tome en cuenta el efecto del desplazamiento de la onda de corriente continua y los decrementos de corriente alterna y directa ( ver tabla siguiente ).

DURACION DE LA FALLA Y DEL CHOQUE ELECTRICO T	CICLOS (60 Hz. EN A.C.)	FACTOR DE DECREMENTO D
0.008	1/2	1.65
0.1	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 o más	30 o más	1.00

TABLA 5.1

Para valores intermedios de duración puede interpolarse linealmente los valores del factor D. Nótese que estos factores de decremento sirven para determinar la corriente efectiva durante un intervalo dado después de la iniciación de una falla a distinción de los factores multiplicadores en aplicaciones para interruptores, los cuales permiten calcular la corriente de falla al final del intervalo.

d) Debe aplicarse un factor de corrección cuando resulte pertinente tomar en cuenta aumentos de corrientes de falla a tierra, debidos al crecimiento del sistema eléctrico.

Para determinar los puntos a) y b), se aplican cualquiera de los métodos propuestos en el apéndice A.

Por lo que toca al punto c), debe recordarse que en general los corto - circuitos 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. En vista de que 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.

Puede determinarse por la siguiente expresión:

$$I = \sqrt{\frac{I}{T} \int_0^T i_f^2 dt} = D I'' \quad (11)$$

En donde:

$$D = \frac{1}{I''} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_f^2 dt} \quad (12)$$

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

**T** = Duración de la falla y del choque eléctrico en segundos.

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

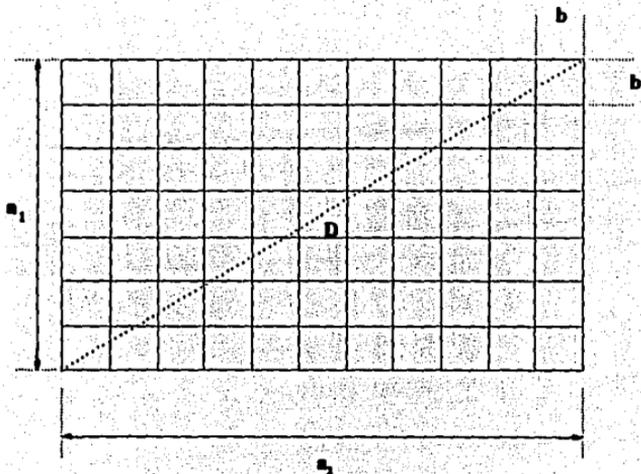
**$i_f$**  = Valor efectivo de la corriente de falla a tierra al tiempo.

**D** = Factor de decremento que toma en cuenta el efecto del desplazamiento de corriente continua y la atenuación de los componentes transitorios de corriente alterna y directa de la corriente de falla.

Por lo que respecta al punto d), resulta prudente tomar un margen adecuado para estimar los aumentos de las corrientes de fallas futuras por aumentos de capacidad del sistema eléctrico o por interconexiones posteriores, pues las modificaciones posteriores 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, estimado en 1.5.

#### **5.4.3 DISEÑO PRELIMINAR.**

Aquí es donde se supone la forma que debe adoptar la red de tierras. Se supondrá la red en forma de mallas ( ver fig. 5.6 ), debido a que esta configuración es la que más se acerca a la condición de una placa metálica, eliminando con estos los potenciales peligrosos.



$a_1, a_2$  = DISTANCIA DE LOS LADOS DEL RECTANGULO .

$b$  = DISTANCIA ENTRE CONDUCTORES .

$D$  = DISTANCIA EN FORMA DIAGONAL DE LA MALLA QUE FORMA LA RED .

FIG. 5.6 CUADRICULA DEL CONDUCTOR QUE FORMA LA MALLA DE LA RED DE TIERRAS.

La malla deberá estar formada de material conductor desnudo enterrado a una profundidad de 0.3 a 0.5 m debajo de la superficie. Un cable continuo debe bordear el perímetro de la malla para evitar concentraciones de corriente y de gradientes altos en los extremos de los cables. Formando la malla deben colocarse cables paralelos en lo posible a distancias razonablemente uniformes y a lo largo de las estructuras o alineamientos de la maquinaria para facilitar las conexiones.

Las conexiones entre los conductores de la malla o de las bajadas a tierra se efectúan con conectores mecánicos o soldados con latón. Deben evitarse en lo posible las uniones con soldadura de estaño por su bajo punto de fusión y por el peligro de corrosión galvánica.

#### **5.4.4 CALCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR.**

El calibre del conductor tradicionalmente se ha calculado en función de su capacidad térmica. Actualmente esto ha dejado de ser una limitación, debido a que se tienen sistemas de protección con tiempos de apertura bajísimos, y la sección transversal de un conductor estará dada en función de razones mecánicas.

La siguiente tabla ( Tabla 5.2 ) permite seleccionar el conductor y la unión adecuados para evitar el punto de fusión.

## CIRCULAR MIL POR AMPERE

DURACION DE LA FALLA ( SEGUNDOS )	CABLE SOLO	CON UNIONES DE SOLDADURA DE LATON	CON UNIONES DE CONECTORES
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0.5	5	6.5	8.5

TABLA 5.2

NOTA: 1 C M = 0.0005067 mm<sup>2</sup>

También puede determinarse el calibre por la ecuación de Onderdonk, en la que esta basada la tabla 5.2:

$$I = A \sqrt{\frac{\log_{10} \left( \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{33 \cdot t}} \quad (13)$$

Donde:

I = Es la corriente de falla en amperes

A = Es la sección del conductor en circular mils

$t$  = Es el tiempo en segundos, durante el cual circula la corriente de falla.

$T_m$  = Es la temperatura máxima permisible en grados centígrados

$T_a$  = Es la temperatura ambiente en grados centígrados.

Pueden suponerse normalmente los siguientes valores:

$T_a$  = 35 a 40 °C

$T_m$  = 1083 °C, que es la temperatura de fusión del cobre.

$T_m$  = 450 °C, temperatura permisible para soldadura de latón.

$T_m$  = 250 °C, temperatura permisible para las uniones con conectores.

Otra forma de calcular el calibre del conductor se hace dividiendo la corriente máxima de falla a tierra entre la densidad de corriente del material utilizado, es decir:

$$A = \frac{I}{D} \text{ mm}^2 \quad (14)$$

Donde:

$A$  = Calibre del conductor en  $\text{mm}^2$

$I$  = Corriente máxima de falla a tierra, en amperes

$D$  = Densidad de corriente del material utilizado, en amperes/ $\text{mm}^2$

Para conductor de cobre, se usa la expresión:

$$S = \frac{1}{160} \text{ mm}^2 \quad (15)$$

Para conductor de aluminio, se usa:

$$S = \frac{1}{100} \text{ mm}^2 \quad (16)$$

Se debe de utilizar un conductor de cobre y sólo cuando sea necesario se podrá usar aluminio, ya que se tiene la ventaja que con el cobre de una alta conductividad aunada a la ausencia de corrosión, ya que es catódico con respecto a otros metales que podrán estar enterrados en la vecindad y con ello se asegura una larga vida de la red si los conductores que la forman han sido escogidos adecuadamente para soportar las corrientes a tierra y para resistir daños mecánicos.

#### **5.4.5 CALCULO DE LA LONGITUD DEL CONDUCTOR NECESARIO PARA EL CONTROL DE GRADIENTES.**

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 del cuerpo, y éste tolera corrientes de magnitud superior a través de las extremidades inferiores.

Se escogen generalmente las tensiones de contacto a estructuras conectadas a tierra al centro del rectángulo de una malla, en lugar 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 directamente o indirectamente a la malla. Este caso especial de tensión de contacto se la llamará " Tensión de malla ". Generalmente es de un valor superior que las tensiones de contacto a un metro, del conductor de la malla.

En el cálculo de la longitud del conductor se deben de considerar: la profundidad de enterramiento del mismo, la irregularidad en el flujo de la corriente en partes diferentes de la red, el diámetro de los conductores y su espaciamento. Para lograr lo anterior, se usa la siguiente expresión:

$$E_{malla} = K_m K_1 e \frac{I}{L} V \quad (17)$$

Donde:

$K_m$  = Es un coeficiente que toma en cuenta el efecto del número de conductores paralelos  $n$ , el espaciamento

D, el diámetro  $d$ , y la profundidad de enterramiento  $h$ , de los conductores que forman la red.

Su valor se calcula como sigue:

$$K_n = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{D^2}{16 h d} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{3}{4} \right) \left( \frac{5}{6} \right) \left( \frac{7}{8} \right) \dots \quad (18)$$

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

$K_1$  = Es un factor de corrección por irregularidades para tomar en cuenta el flujo de la corriente no uniforme en partes diversas de la red.

Donde:

$$K_1 = 0.65 + 0.172 n$$

$n$  = Número de conductores paralelos de la malla en una sola dirección excluyendo las conexiones en las cruces.

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

$I$  = Corriente total efectiva máxima, en amperes, que fluyen entre la red de tierras y la tierra ajustada por decremento y crecimiento futuro de la red.

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

Igualando la ecuación ( 17 ) con la ecuación ( 5 ), tenemos:

$$\frac{K_1 K_2 Q I}{L} = \frac{116 + 0,117 Q_2}{\sqrt{E}} \quad (19)$$

Despejando L de ( 18 ), tenemos:

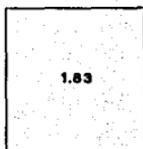
$$L = \frac{K_1 K_2 Q I \sqrt{E}}{116 + 0,17 Q_2} \quad (20)$$

Que es la ecuación que nos determina la longitud de conductor enterrado necesario para mantener la tensión de malla dentro de los límites de seguridad.

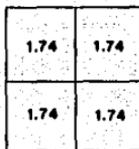
La corriente no penetra a la tierra solamente por conductores horizontales de la malla, sino también por las varillas verticales, por los tubos metálicos, etc.

Resulta conveniente, en el caso de las varillas, agregar sus longitudes al de los conductores que forman la malla, aunque el resultado no es riguroso.

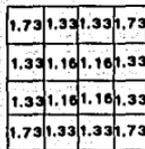
Por lo que toca al factor de irregularidad  $K_1 \bullet K_m$  este fluctúa entre 1.0 y algo más de 2.0; como se observa en la tabla de la fig. 5.7, y depende de la geometría de la red.



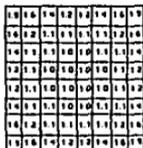
RED A



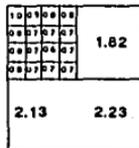
RED B



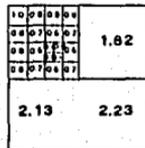
RED C



RED D



RED E



RED F

RED	A	B	C	D	E	F
MAXIMO VALOR DE $K_m \times K$	1.83	1.74	1.73	1.90	2.23	2.23
COEFICIENTE $K_m$	1.82	1.50	1.18	0.86	1.50	1.50

FIG. 6.7 FIGURAS QUE REPRESENTAN LA FORMA QUE SE ADOPTA EN LA RED DE TIERRAS Y SE MUESTRA EL VALOR REPRESENTATIVO DE LOS COEFICIENTES  $K_m$  Y  $K$  EN FORMA EXPERIMENTAL.

Observando la fig. 5.7, se nota que los valores más altos resultan en las esquinas de la red, debiéndose al hecho de que la corriente se encuentra más entre los lados y en las esquinas.

#### 5.4.6 CALCULO DEL NUMERO DE VARILLAS A EMPLEAR.

El uso de varillas como electrodos de tierra tiene como fin específico reducir los valores de resistencia cuando las condiciones del terreno no permitan conseguir el valor deseado de resistencia a tierra utilizando la malla simple, ya que agregar mas conductor a la varilla resultaría antieconómico.

Estos electrodos se conectan entre sí y a la malla de tierra por medio de conectores, de tal forma que cubran el area total de la malla. Estos electrodos deben estar convenientemente separados a una distancia no menor de dos veces su longitud, y a una distancia máxima de un metro más de la cerca protectora de la subestación.

La expresión que determina el número de varillas a emplear es:

$$n = 0,60 \sqrt{A} \quad (21)$$

Donde:

n = Número de varillas a emplear.

A = Area de la malla en metros cuadrados.

También se acepta el uso de la siguiente expresión obtenida en la forma empírica:

$$n = 1,125 R_v \quad (22)$$

Donde:

$n$  = Número de varillas a emplear

$R_v$  = Resistencia de la varilla, definida por:

$$R_v = \frac{\rho}{1,145 L} \left( \ln \frac{96 L}{d} - 1 \right) \quad (23)$$

Donde:

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

$L$  = Longitud de la varilla en pies ( 1ft = 30.43 cm. ).

$d$  = Diámetro de la varilla en pulgadas ( 1 in. = 2.54 cm. ).

#### 5.4.7 EFECTOS DE LA RESISTENCIA DE LA RED.

Se presenta el caso en donde la resistencia predicha de la red de tierras es muy alta comparada con la reactancia del sistema que obliga a tomarse en cuenta. Esto implica un problema, pues mientras no está diseñada la red, no puede conocerse su resistencia. Este círculo vicioso puede

romperse, ya que una vez determinada la resistividad del terreno, la resistencia del área de la red de tierra que normalmente es conocida.

La resistencia se estima entonces por:

$$R = \frac{0,55 \rho}{\sqrt{a}} \quad \text{o} \quad R = \frac{\rho}{4 r} \quad (24)$$

Donde:

a = Área de la red de tierras en metros.

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

r = Radio del círculo que tenga la misma área que la ocupada por la malla en metros.

$$r = \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad (25)$$

R = Resistencia de la malla de la estación en ohms.

Para mayor precisión, se utiliza:

$$R = \frac{\rho_s}{4 r} + \frac{\rho}{L} \quad (26)$$

Donde:

L = Longitud total de los conductores de la red de tierras en metros.

En esta expresión:

$\rho/4\pi$  Es la contribución a la resistencia del área de la red.

$\rho/L$  Es la resistencia con que contribuye el conductor enterrado.

Cuando los hilos neutros de líneas aéreas quieran ser conectados a la malla de tierras de la subestación, debe tomarse en cuenta que estos desvían una proporción apreciable de la corriente de falla, restándose a la red de tierras. En vista de que la corriente a tierra se divide en proporción inversa a las resistencias de la malla y de los hilos aéreos, se hace necesario establecer sus valores aunque sea en forma 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:

$$Z = \sqrt{Z_1 R_2} \quad (27)$$

Por ejemplo, un hilo de guarda de acero de  $70 \text{ mm}^2$  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 ohms/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.

La impedancia arriba calculada es aproximadamente igual a la impedancia longitudinal de sólo 1500 m del cable de guarda, lo que muestra que las corrientes de falla no recorran una gran distancia, sino que se desvían rápidamente a tierra.

#### 5.4.8 CALCULO DE POTENCIALES DE CONTACTO Y DE PASO.

El cálculo de potenciales de paso y de contacto pueden efectuarse utilizando las expresiones generalizadas definidas en los puntos 5.2.1. y 5.2.2. del presente capítulo.

Dentro de la malla es posible reducir las tensiones de paso y de contacto a cualquier valor deseado efectuando las erogaciones correspondientes. Pueden inclusive reducirse a cero en el caso límite teórico de hacer uso de una placa metálica sólida.

La situación es diferente en la zona inmediata fuera de la periferia de la malla, donde pueden resultar potenciales altos aún con una placa sólida formando la red de tierras. El problema puede tornarse serio en subestaciones pequeñas, donde la malla puede cubrir sólo un área reducida.

A. este tipo especial de tensión se le conoce como :  
" Tensión de paso en la periferia de la malla ", y generalmente tiene valores superiores a los de la tensión de contacto, se calcula por medio de la expresión:

$$E_p = K_s K_i \rho \frac{I}{L} \quad (28)$$

Donde:

$E_p$  = Tensión de contacto en la periferia de la malla, en volts.

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

$S$  = Resistividad media del terreno en ohms - metro.

$I$  = Corriente máxima de falla a tierra, en amperes.

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

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

Su valor se calcula como sigue:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \text{etc.} \right) \quad (29)$$

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

Regularmente, cuando se limitan los potenciales internos a valores tolerables y cuando la resistividad en la superficie es comparable dentro de la cerca como fuera de ella, los potenciales de paso en la periferia no resultan un problema, en vista de que se permiten valores más altos para éstos.

Por lo anterior, se deduce que la distribución de corriente en la malla no es uniforme y se concentra una mayor densidad de corriente en su periferia.

#### 5.4.8 CALCULO DE LA ELEVACION MAXIMA DE POTENCIAL EN LA RED.

La máxima tensión que puede alcanzar la red de tierras en la condición más desfavorable se obtiene multiplicando el valor de R en toda la malla por la corriente total de falla.

$$E = R I$$

Se comprende que para valores bajos de R ó I, la elevación de tensión E puede resultar dentro de los valores de seguridad.

Las condiciones que se deben de cumplir para la red de tierras sea segura, son:

$$1.- E_{\text{malla}} \leq E_T$$

$$2.- E_p \leq E_s$$

### 3.- LONGITUD CALCULADA $\leq$ LONGITUD PROPUESTA

$$4.- R = \frac{F}{I} > R = \frac{R}{4} + \frac{R}{L}$$

Si se cumplen estas cuatro condiciones, se procede a la construcción de la red de tierras.

### 5.5 INDICACIONES PARA MEJORAR LA OPERACION DE LA RED.

Para mejorar la operación de una red de tierras deben seguirse las siguientes indicaciones:

1.- La disminución de la resistencia total de la red reducirá el aumento de potencial máximo de transferencia. La manera más efectiva para disminuir la resistencia de la red es aumentar el área de la misma.

Varillas enterradas a profundidad y la conexión a tubos de pozos profundos pueden ayudar a disminuir la resistencia cuando el área está confinada.

2.- Reduciendo el espaciamiento de los conductores que forman las mallas, permite eliminar potenciales peligrosos acercándose a la condición de una placa metálica. El problema del perímetro, principalmente a resistividades altas, puede eliminarse extendiendo a la malla enterrada más allá del enrejado de la subestación.

Un método poco usado consiste en enterrar dos o más conductores paralelos a lo largo del perímetro a profundidades mayores, cuanto mayor es la distancia a la subestación.

3.- Agregar capas de roca triturada de alta resistividad en la superficie para aumentar la resistencia en serie con el cuerpo. Este medio permite reducir las corrientes por el cuerpo.

4.- Prever pasos adicionales a las corrientes de falla a tierra por medio de conductores neutros, aéreos de líneas de transmisión, conectándolos a la red.

5.- Limitando, 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.

6.- Debe prohibirse el paso a las áreas limitadas donde sea poco práctico eliminar la posibilidad de que aparezcan diferencias de potencial excesivas durante las fallas a tierra.

7.- Deben evitarse dobles redes de tierra independientes en una subestación.

8.- La conexión a tierra de rejas que bordean una subestación debe de hacerse, ya que aparecen ahí las más peligrosas tensiones de contacto por estar accesibles al público en general y porque el enrejado puede ocupar una posición en la periferia de la malla de tierras, donde

resultan máximos los gradientes de potencial superficiales.

Al aumentar la extensión de la red excluyendo la reja dentro de su territorio, se obtiene la ventaja de abatir la resistencia total de la malla a tierra y, por lo tanto, también la elevación de tensión durante las fallas. Es recomendable que el perímetro de la malla se extienda más allá de la reja a 1.0 o 1.5 metros.

9.- Los pararrayos requieren para su correcta operación de una conexión a tierra de baja resistencia que sea confiable. Deben colocarse tan cerca como sea el equipo que deben proteger, y cuando quedan montados en la propia estructura del aparato que protegen, está debe de ser conectada a tierra en forma efectiva.

10.- Para los circuitos de comunicación se han desarrollado esquemas que incluyen aparatos de protección y transformadores de aislamiento y de neutralización para proteger al personal y al equipo terminal.

Es de enfatizarse la importancia de un aislamiento adecuado y evitar contactos accidentales con esta clase de equipo, pues es frecuente olvidar que puede alcanzar tensiones elevadas con respecto a tierras locales.

11.- Las tuberías de agua deben de ser amarradas a la red de tierras, preferiblemente en varios puntos, para evitar riesgos dentro del área. La misma regla debe seguirse con tuberías de gas y con las chaquetas metálicas o armaduras de cables que estén en contacto con el terreno.

12.- Los edificios auxiliares, excluyendo las casas de empleados, pueden ser tratados como parte de la subestación desde el punto de vista de conexiones a tierra, o como instalaciones separadas dependiendo de las circunstancias. Si están relativamente cercanos y especialmente si están unidos directamente a la subestación por tuberías de agua, forros de cable, líneas telefónicas, etc.; resulta apropiado tratar tales construcciones como parte de la subestación eléctrica.

Si se encuentran localizados remotamente, es propio tratar tales edificios como unidades separadas, con sus propias redes de seguridad.

**CAPITULO VI****" DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA RED DE TIERRAS EN LA SUBESTACION ELECTRICA DE UNA INDUSTRIA EMPACADORA DE ALIMENTOS "****6.1 INTRODUCCION.**

La finalidad del presente capítulo es mostrar en forma práctica y real la aplicación del método propuesto en el capítulo anterior en el diseño de redes de tierra. Para llevar a cabo esto, se realizó un estudio en la subestación eléctrica de la empresa denominada " **INDUSTRIAS MAFER S.A. DE C.V.** ", persiguiendo satisfacer la política de seguridad del corporativo del grupo, denominado " **UNILEVER DE MEXICO** ".

La política de seguridad es la siguiente:

" **UNILEVER DE MEXICO** reconoce la importancia de todas y cada una de las personas que colaboran en todas sus instalaciones y por lo tanto el derecho que tienen de trabajar en un ambiente seguro, que garantice su integridad física y su salud ocupacional, y es por ello que en todos los centros de trabajo de la empresa se deberán cumplir con las Responsabilidades, Lineamientos, Procedimientos, Programas, Reglamentos, Normas, Medidas, Leyes y Actividades de Seguridad, Higiene y Control Ambiental establecidas o que se establezcan en el futuro.

Toda persona que labore para **UNILEVER DE MEXICO** tendrá como responsabilidad primaria el compromiso de un

comportamiento seguro, evitando riesgos que puedan provocar accidentes que lesionen la integridad física de las personas o afecten nuestra fuente de trabajo ".

Con base a lo anterior, se inicia el estudio para el diseño de una red de tierras en la subestación eléctrica de la empresa; para poder tener una visión más clara de la actividad de dicha empresa se conocerán sus antecedentes generales.

## **6.2 ANTECEDENTES GENERALES DE LA EMPRESA.**

En 1951, se crea " Industrias Mafer, S.A. de C.V. " por su fundador: Mario Fernández García, de nacionalidad española, y un grupo de empresarios mexicanos; formando así una empresa dedicada al fomento de la siembra e industrialización de la semilla del cacahuete. En aquél entonces contaba con una planta receptora de semillas de cacahuete, localizada en el pueblo de Alpuyeca, Estado de Morelos; y una planta industrializadora de los productos elaborados a base de cacahuete, ubicada en Av. Ferrocarril No. 150, colonia Moctezuma 2da. Sección, México D.F., que es el domicilio actual de la empresa.

En 1980, es adquirida por un corporativo denominado " GRUPO VISA ", posteriormente es entregada en 1990 a un corporativo británico - holandés con sede en Londres, Inglaterra, refiriéndonos así a " UNILEVER DE MEXICO ". La empresa posee ahora en día sólo la planta industrializadora de cacahuete, continuando de ésta manera permanente dentro de la industria alimentaria en nuestro país, ubicada firmemente

dentro del mercado botanero de productos derivados de la semilla de cacahuate.

La planta industrializadora se encuentra en una etapa de gran crecimiento a nivel nacional, ya que actualmente se labora de manera permanente tres turnos de trabajo en cinco días de la semana, para poder satisfacer los requerimientos del departamento de Ventas, estimando un promedio de 300 a 340 toneladas de producto terminado mensualmente.

### **6.3 OBJETIVO DEL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA RED.**

El estado actual de la subestación eléctrica representa un alto riesgo de inseguridad, ya que no incluye la red de tierras que se establece como norma, de acuerdo al IEEE No. 80. La subestación eléctrica sólo cuenta con seis electrodos de tierra en forma de varilla conectados a lo largo de ella, representando un riesgo potencialmente alto para el personal que labora en la vecindad del recinto donde se ubica la subestación eléctrica.

Por lo anterior, y atendiendo la política de seguridad del corporativo del grupo, se encarga al departamento de Mantenimiento y Proyectos Especiales la construcción de la red de tierras; es así como se inicia el proyecto en el diseño de la red de tierras.

### **6.4 DATOS PARA EL DISEÑO Y PROCEDIMIENTO PARA EFECTUAR LOS CALCULOS.**

Siguiendo los pasos del procedimiento del capítulo anterior, se tiene:

**1.- PLANO DE LOCALIZACION GENERAL.** En la fig. 6.1 se muestra el plano general de la planta industrializadora, conteniendo todos los departamentos donde se labora, incluidos la Gerencia Técnica, Producción y Control de Calidad. El plano está acotado en metros para facilitar los cálculos. Como se observa, la subestación eléctrica se encuentra en el perímetro de los departamentos donde se elaboran los productos: palanqueta, mazapán y la bodega de materia prima, además de un pasillo de maniobras de operación con rodacargas y montacargas.

**2.- AREA QUE VA A OCUPAR LA RED.** En la fig. 6.2 a) se muestra el área de la subestación eléctrica, junto con los elementos que la integran. Como se aprecia, tenemos un área limitada, debido a que la subestación se diseñó con la finalidad de que las áreas destinadas a la producción tuvieran más espacio para maniobras propias de la elaboración de los distintos productos. El hecho de tener un área limitada se verá reflejado en el valor de la resistencia a tierra que buscará satisfacerse, siendo éste un problema, pues se probablemente requerirá de algún método para abatir dicha resistencia.

El cálculo del área de la red se hace de la siguiente manera:

$$L_1 \cdot L_2 = \text{METROS CUADRADOS}$$

$$10,0 \text{ m.} \cdot 7,0 \text{ m.} = 70,0 \text{ m}^2$$

El radio equivalente de la instalación se calcula como sigue:



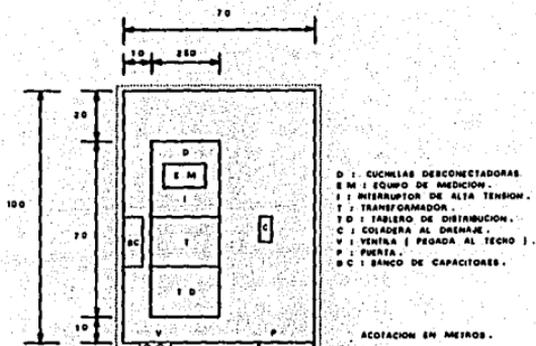


FIG. 6.2 a) DIAGRAMA DE LA SUBESTACION ELECTRICA .

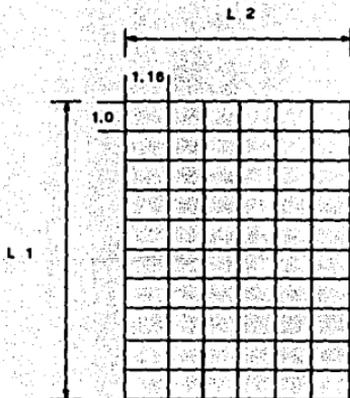


FIG. 6.2 b) FORMA DE LA MALLA DE TIERRAS .

$$r = \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad , \quad a = \text{Área de la red}$$

$$r = \sqrt{\frac{70,0}{\pi}} = 4,72 \text{ m.}$$

3.- TIPO DE SUBESTACION. La subestación eléctrica bajo estudio es una subestación tipo blindada, reductora de 23 KV. a 220 V., transformador trifásico con núcleo tipo columnas autoenfriado en aceite dieléctrico con aletas para ayudar a disipar el calor. Los interruptores operan en 0.5 seg.

Los datos de placa son:

Marca:	MAQUINARIA ELECTRICA INDUSTRIAL, S.A. de C.V.
No. de serie:	53375937
Peso total:	3,000 Kg
Potencia:	500 kVA
Reactancia:	5,57 %
Frecuencia:	60 Hz

Para corregir el factor de potencia cuenta con un banco de ocho capacitores, cuyos datos de placa son:

2 Capacitores: SPRAGAMEX, fabricados por ELECTRODO S.A., 14 kVAR, 60 Hz, 33.6 A y 240 V.  
 2 Capacitores: AEROVOX, 12 kVAR, 60 Hz, 30 A y 220 V.

1 Capacitor: SIEMENS - SCHUCKET, 12 kVAR, 60 Hz, 32 A y 220 V.

3 Capacitores: BALMEC, 12.5 kVAR, 50 Hz, 37.6 A y 240 V.

Se hace notar que el banco de ocho capacitores son en Askarel y próximos a reemplazar.

4.- **DIAGRAMA UNIFILAR.** El diagrama unifilar se muestra en la fig. 6.3, y contiene en forma simbólica todos los elementos que abarca la subestación eléctrica.

5.- **DETERMINACION DE LA MAXIMA CORRIENTE DE FALLA.** Para el cálculo de la corriente de falla, se partió del diagrama unifilar y de los datos de placa del transformador. Se utilizó el metodo del bus infinito al tener los valores de reactancia del transformador y después se calculó como se propone en el capítulo anterior, comparando los resultados.

Para iniciar los cálculos, se calcula el valor de corriente nominal del transformador como sigue:

$$I_{snc.} = \frac{kVA \cdot 1,000}{\sqrt{3} \cdot V} \text{ A}$$

$$I_{snc.} = \frac{500 \text{ kVA} \cdot 1,000}{\sqrt{3} \cdot 220 \text{ V}} = 1,312 \text{ A}$$

Se procede ahora a el cálculo de la máxima corriente de falla que puede suministrar el transformador con el método del bus infinito:

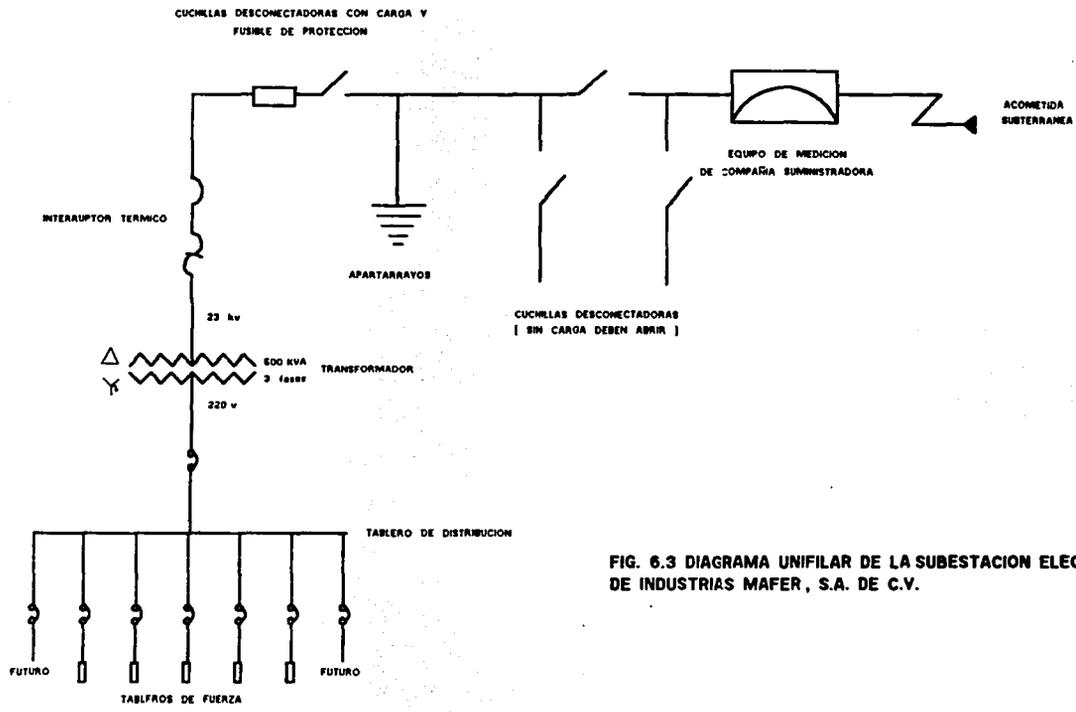


FIG. 6.3 DIAGRAMA UNIFILAR DE LA SUBSTACION ELECTRICA DE INDUSTRIAS MAFER, S.A. DE C.V.

$$I_{cc.máx.} = \frac{100\%}{X\%} \cdot I_{ssc.} \text{ A}$$

$$I_{cc.máx.} = \frac{100\%}{5,57\%} \cdot (1,312) = 23,555 \text{ A}$$

**6.- DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS Y RESISTIVIDAD DEL TERRENO.** El dato de las características y resistividad del suelo fué proporcionado por la empresa " Seguridad Eléctrica Mexicana, S.A. de C.V. ", cuando instaló la subestación a finales de 1989. El resultado que le arrojó fué: suelo homogéneo muy húmedo, con resistividad de 9.76  $\Omega$  - metro. El valor de la resistividad superficial se estima en 3,000  $\Omega$  - metro para fines prácticos.

**7.- DISEÑO PRELIMINAR DE LA RED DE TIERRAS.** El diseño que se supondrá para la red será en forma de malla ( como lo muestra la fig. 6.2 b ) con una cuadrícula de 1.16 X 1.0 metros , ya que esta forma es la que más se acerca a la condición de una placa metálica sólida, eliminando con esto los potenciales peligrosos; para hacer un total de 7 conductores longitudinales y 11 conductores transversales con una profundidad de enterramiento de 0.5 metros.

A continuación se agrupan los datos obtenidos para tener una visión más clara:

Corriente Máxima de Falla:	23,555 A
Duración de la Falla:	0.5 seg.
Tensión de operación:	220 V
Resistividad del Terreno:	9.76 $\Omega$ - m.

Resistividad Superficial:	3,000 $\Omega$ - m.
Area de la Red:	70 m <sup>2</sup>
Radio Equivalente de la red:	4.72 m
Temperatura Ambiente:	35 °C ( valor tomado para fines prácticos ).
Tipo de Conectores:	Mecánicos.
Profundidad de Enterramiento:	0.5 m

Con los datos anteriormente obtenidos, y basándonos en la fig. 6.2 b), se realizan los cálculos correspondientes de acuerdo con el método propuesto en el capítulo anterior.

Se estima entonces, el valor deseado de resistencia a tierra deseada para la red y la longitud total que ocupará el conductor de la misma de la siguiente manera:

1.- Resistencia a tierra deseada. Una vez determinada la máxima corriente de falla y con el valor de resistividad del terreno, la resistencia a tierra deseada puede estimarse a partir del área de la red a través de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{0.55 \rho}{\sqrt{A}} = \frac{(0.55) 9.76}{\sqrt{70}} = 0.6416 \Omega$$

Que es el valor estimado de la resistencia a tierra deseado.

2.- Longitud propuesta para el conductor que forma la malla. El valor estimado para la longitud de conductor se calcula como sigue:

$$L = (\text{Número de conductores longitudinales} \times L_1) + (\text{Número de conductores transversales} \times L_2) = \text{Longitud Total.}$$

Sustituyendo valores, tenemos:

$$L = (7 \cdot 10.0) + (11 \cdot 7.0) = 147 \text{ m.}$$

Que es la longitud del conductor que forma la malla de tierras estimado.

Con lo anterior, se proceden a realizar los cálculos para el diseño de la red de tierras, con base a lo propuesto en el capítulo anterior.

#### CALCULOS:

##### a).- CALCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR.

$$A = \frac{I}{\sqrt{\frac{\log_{10} \left( \frac{T_n - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{33 \cdot t}}}$$

$$A = \frac{23,555}{\sqrt{\frac{\log_{10} \left( \frac{250 - 35}{234 + 35} + 1 \right)}{33 (0.5)}}} = 189,441.77 \text{ C.M.}$$

$$A = 189,441.77 \text{ (C.M.)} \cdot 0.0005067 \text{ (mm}^2 \text{ / C.M.)}$$

$$A = 95.99 \text{ mm}^2.$$

Corresponde a un conductor de cobre calibre 4/0 AWG con sección transversal de 107.225 mm.<sup>2</sup> y 11.684 mm. de diámetro.

b).- CALCULO DE LA LONGITUD NECESARIA DEL CONDUCTOR PARA EL CONTROL DE LOS GRADIENTES.

$$L = \frac{K_m \cdot K_l \cdot \theta \cdot I \cdot \sqrt{E}}{116 + 0.17 \cdot \theta_s}$$

Calculando los coeficientes  $K_m$  y  $K_l$  :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{1.16^3}{16 (0.5) (0.011684)}\right) + \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{6}\right) \dots \left(\frac{11}{12}\right)$$

$$K_m = 0.231$$

$$K_l = 0.65 + 0.172 (7) = 1.854$$

$$K_m \cdot K_l = 0.4283$$

$$L = \frac{0.4351 \cdot 9.760 \cdot 23,555 \cdot \sqrt{0.5}}{116 + (0.17 \cdot 3,000)} = 111 \text{ m}$$

c).- NUMERO DE ELECTRODOS EN FORMA DE VARILLAS A EMPLEAR.

$$n = 0.60 \cdot \sqrt{A} = 0.60 \cdot 8.36 = 5 \text{ varillas}$$

Como el resultado de varillas es cinco, y actualmente existen seis, se tomó la decisión de instalar las seis varillas existentes en la malla. Las varillas son del tipo copperweld de 3.05 metros de longitud y 19 mm. de diámetro, con lo que la nueva longitud del conductor será:

$$L = 111 + (6 \cdot 3.05) = 130 \text{ m}$$

d).- CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA RED.

$$R = \frac{R}{4r} + \frac{R}{L} = \frac{9.76}{(4)(4.72)} + \frac{9.76}{130} = 0.5920 \Omega$$

e).- CALCULO DE LOS POTENCIALES DE PASO, DE CONTACTO Y DE MALLA.

$$E_s = \frac{116 + 0.7 (3,000)}{\sqrt{0.5}} = 3,133 \text{ V}$$

$$E_p = \frac{116 + 0.25 (3,000)}{\sqrt{0.5}} = 1224 \text{ V}$$

$$E_{\text{malla}} = \frac{0.4263 \cdot 23,555 \cdot 9.76}{130} = 757 \text{ V}$$

f).- CALCULO DE LA TENSION EN LA PERIFERIA DE LA MALLA.

$$E_p = K_s K_i \frac{Q \cdot I}{L}$$

Calculando el valor de  $K_p$  :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{1.16 + 0.5} + \frac{1}{2(1.16)} + \dots + \frac{1}{6(1.16)} \right)$$

$$K_s = 0.9079$$

Sustituyendo valores:

$$E_p = (0.9079) \cdot (1.654) \cdot (23,555) \cdot \frac{(9.76)}{130} = 2,976 \text{ V}$$

g).- CALCULO DE LA ELEVACION MAXIMA DE LA RED.

$$E = R \cdot I = 0.5920 \cdot 23555 = 13,944 \text{ V}$$

De lo anterior, se tiene:

$$E_{\text{malla}} < E_T$$

$$E_p < E_s$$

LONGITUD CALCULADA < LONGITUD ESTIMADA

RESISTENCIA ESTIMADA > RESISTENCIA CALCULADA

**CONCLUSIONES:**

La red es segura y adoptará la configuración mostrada en la fig. 6.4. Se podrán conectar: el tablero de distribución, el transformador, el pararrayos y demás equipo que en condiciones normales de operación no conduce corriente.

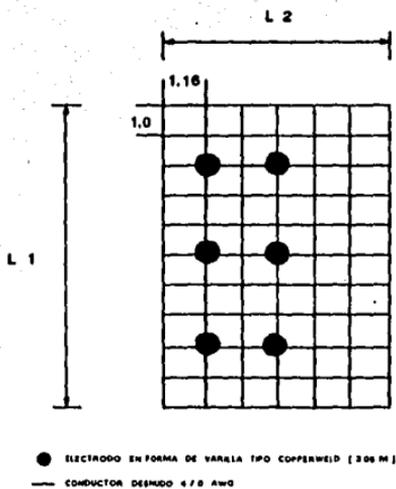


FIG. 6.4 FORMA QUE ADOPTARA LA MALLA DE TIERRAS.

### CONCLUSIONES

La frecuencia de accidentes debidos a los altos gradientes de potencial producidos por las fallas eléctricas en el sistema, han sido disminuidos por la baja probabilidad de coincidencia de todos los factores adversos. No obstante, ha habido muchos accidentes fatales que pudieron haberse prevenido. Los cálculos precisos en este campo son rara vez alcanzados.

Es esperado, sin embargo, que el material aquí presentado pueda ayudar al ingeniero electricista a evitar dos de las más peligrosas situaciones que se presentan en caso de una condición anormal en el sistema: EL POTENCIAL DE TOQUE Y EL POTENCIAL DE PASO. Una resistencia baja en la red de tierras no es una garantía de seguridad cuando se presentan estas dos situaciones de peligro, sin embargo, se puede lograr siempre y cuando dicha resistencia sea tan baja que el máximo error fluctuante no rebase el voltaje de la red de tierra a un valor fatal.

Por lo anterior, la implantación de una red de tierras en una subestación eléctrica ( y en toda instalación eléctrica ) no representa una inversión inútil, ya que la inversión completa sólo es el 5 % del total de toda la obra eléctrica y trae consigo la seguridad de las personas que laboran en el recinto y en la vecindad de éste, la actuación del equipo destinado para proteger a la subestación y la continuidad en el servicio eléctrico.

Este concepto debe extenderse desde casas - habitación, hasta las más grandes instalaciones eléctricas industriales,

incluyendo a la industria generadora de electricidad, para asegurar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico; así como evitar el riesgo por manipulación de la energía eléctrica.

Por lo anterior, al no contar la empresa con una red de tierras para el control de los gradientes generados por una falla en el sistema eléctrico, pone en riesgo, no sólo al equipo que compone la subestación, sino también a todo el personal que labora en la vecindad del recinto; es por esta razón que se llevó a cabo el estudio, diseño y construcción ( en proceso ) de una malla de tierras.

**APENDICE A****" ESTUDIO DEL CORTO - CIRCUITO ".**

El corto - circuito es una situación indeseable en un sistema eléctrico, pero que lamentablemente se puede presentar eventualmente, teniendo como causas: sobretensiones por descarga atmosférica, fallas de aislamiento por envejecimiento prematuro, maniobras erróneas, etc. ; en estas condiciones se debe de estar en posibilidad de conocer en todos los puntos de una instalación las magnitudes de las corrientes de corto - circuito.

**DEFINICION DE CORTO - CIRCUITO.** El corto - circuito es una conexión de baja impedancia entre los bornes o polos de una fuente de tensión o entre los dos lados conductores de un circuito o una línea; en el común de los casos, ocurre por accidente o por falsa maniobra y es causa de una corriente excesivamente grande, capaz de causar daños severos en el circuito y los aparatos conectados a él.

Para efectos de cálculo, es suficiente el estudio de las fallas trifásicas y las de una línea a tierra. La falla trifásica por los esfuerzos severos a que somete a los aparatos y equipos; y la falla de una línea a tierra por su probabilidad de ocurrencia ( ver tabla 1.2 del capítulo I ).

La magnitud de las corrientes de corto - circuito depende de las diversas fuentes que la generan, llamadas elementos pasivos ( generadores, motores, etc. ); y de los elementos

que las limitan, llamados elementos pasivos ( impedancias de conductores, motores, transformadores, etc. ).

Por lo anterior, la corriente de corto - circuito está compuesta por la combinación de las diferentes fuentes que la generan y se divide en :

**CORRIENTE DE CORTO - CIRCUITO SIMETRICA.** Es una combinación de todas las corrientes de corto - circuito de las diferentes fuentes que la generan y se presenta como una onda simétrica respecto del eje cero ( ver fig. A.1 ).

**CORRIENTE DE CORTO - CIRCUITO ASIMETRICA.** Es aquélla que tiene una onda senoidal fuera del eje de simetría debido a la onda de corriente continua sobrepuesta. La componente de corriente continua aumenta, durante los primeros ciclos, la magnitud de la corriente de corto - circuito ( ver fig. A.1 ).

Un estudio de corto - circuito se inicia siempre con un **DIAGRAMA UNIFILAR** del sistema por estudiar, en donde se indiquen todos los elementos que van a intervenir, especialmente las fuentes y los elementos pasivos, dando valores de potencia, tensiones, impedancias y reactancias siempre que sea posible.

En los elementos pasivos como el generador, la corriente es limitada por sus reactancias, siendo éstas :

**REACTANCIA SUBTRANSITORIA (  $X_s''$  ).** Es la reactancia aparente del estator en el instante en que se produce el corto - circuito, y determina la corriente que circula en el devanado

del estator durante los primeros ciclos mientras dura el corto - circuito.

**REACTANCIA TRANSITORIA (  $X_d'$  ).** Es la reactancia inicial aparente del devanado del estator, despreciando los efectos de todos los arrollamientos amortiguadores y sólo se consideran los efectos del arrollamiento del campo inductor. Esta reactancia determina la intensidad de corriente que circula durante el intervalo posterior al que se indicó en el apartado anterior, y en el que la reactancia subtransitoria constituye el factor decisivo.

**REACTANCIA SINCRONA (  $X_d$  ).** Es la reactancia que determina la intensidad de corriente que circula cuando se ha llegado a un estado estacionario.

En los elementos pasivos, la corriente de corto - circuito está limitada por los valores de impedancia, siendo éstos:

**IMPEDANCIA DE LA RED DE ALIMENTACION.** Es la impedancia propia de la red y depende de las características de ésta. De cualquier forma, el valor de la corriente de corto - circuito es un valor que proporciona la compañía suministradora de energía eléctrica.

**IMPEDANCIA DE GENERADORES, MAQUINAS SINCRONAS Y TRANSFORMADORES.** Este valor se obtiene directamente de la placa de datos de la máquina y generalmente se expresa en por ciento en relación a su base de capacidad nominal.

También puede recurrirse a las tablas A.1 y A.2, o por medio de las siguientes expresiones:

**PARA EL TRANSFORMADOR:**

$$X_T = \frac{X}{P_n} \% \text{ MVA}$$

Donde :

$X_T$  = Impedancia en porcentaje sobre MVA.

$X$  = Impedancia de placa o de corto - circuito en %.

$P_n$  = Potencia nominal de la máquina en MVA.

**PARA LA MAQUINA SINCRONA:**

$$X_d = \frac{X_d''}{P_n} \% \text{ MVA}$$

Donde:

$X_d''$  = Reactancia subtransitoria de la máquina en %.

$P_n$  = Potencia nominal de la máquina en MVA.

**IMPEDANCIA DE LOS MOTORES DE INDUCCION.** En este tipo de máquinas, se puede despreciar la resistencia, de manera que la reactancia es del mismo valor que la impedancia. Se calcula como sigue:

$$X_m = \frac{I_n / I_A}{P_n} \times 100 \% \text{ MVA}$$

Donde:

$I_n$  = Corriente nominal del motor o grupo de motores que formen al motor equivalente en amperes.

$I_A$  = Corriente de arranque del motor o motor equivalente de un grupo, que se puede tomar como:

$$I_A = 5 \cdot I_n \text{ como valor promedio.}$$

**IMPEDANCIA EN LOS CABLES.** Para obtener los valores de reactancia y resistencia en distintos cables, se recurre a las tablas proporcionadas por los fabricantes.

Existen diferentes métodos para el cálculo del corto - circuito. Dentro de estos métodos, los más utilizados son:

- a) Método de las Componentes Simétricas ( método exacto ).
- b) Método de las Potencias ( método aproximado ).
- c) Método del Bus Infinito ( método aproximado ).
- d) Método Práctico ( método aproximado ).

**a) METODO DE LAS COMPONENTES SIMETRICAS.** Este método establece que un sistema trifásico desbalanceado puede descomponerse en tres sistemas trifásicos balanceados, llamados de secuencia y son: secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero.

Aplicando estos conceptos al vector voltaje en cada fase, éste será igual a la suma de sus tres componentes de secuencia. En igual forma se relacionan los vectores de corriente.

El método de las componentes simétricas se aplica en sistemas eléctricos donde la precisión de los datos buscados sea un factor determinante.

## CALCULO DE LA FALLA DE FASE A TIERRA.

$$I_{oc} = \frac{3 \cdot E_a}{2 \cdot Z_a + Z_0}$$

## CALCULO DE LA FALLA TRIFASICA.

$$I_{oc} = \frac{E_a}{Z_a}$$

Donde :

$E_a$  = Voltaje base.

$Z_a$  = Impedancia de secuencia positiva ( que en caso de una falla de fase a tierra tiene el mismo valor ).

$Z_0$  = Impedancia de secuencia cero.

**b) METODO DE LAS POTENCIAS ( MVA ).** Es un método práctico de los más empleados en buscar soluciones inmediatas que permitan al ingeniero resolver un problema con cierto grado de aproximación sin emplear mucho tiempo y esfuerzo.

Este método considera al corto - circuito alimentado por una fuente infinita, que incluye a la red, y la impedancia es la suma de las impedancias de sus componentes. Por definición, la admitancia es el recíproco de la impedancia, entonces la admitancia total es la suma de los recíprocos de las impedancias componentes. También por definición, la admitancia de un circuito o componente es la máxima corriente

( en KVA ) a voltaje unitario que circula a través del circuito o componente a un corto - circuito. En otras palabras, las potencias en paralelo se suman y las potencias en serie se reducen igual que las reactancias, hasta obtener una potencia equivalente:

$$MVA_{cc} = \frac{kV^2}{Z}$$

$$\text{Si : } y = \frac{1}{Z_{ohms}}$$

$$MVA_{cc} = \frac{MVA}{Z_{pu}}$$

Donde:

Y = Admitancia del circuito.

$Z_{ohms}$  = Impedancia en ohms.

$Z_{pu}$  = Impedancia en por unidad.

$kVA_{cc}$  = kVA de corto - circuito.

$MVA_{cc}$  = MVA de corto - circuito.

c) **METODO DEL BUS INFINITO.** Este método constituye un caso particular del método de las componentes simétricas, en el cual sólo considera la falla trifásica.

En principio, supone que el corto - circuito en la instalación es alimentado por una fuente infinita que incluye a la red y a las distintas plantas generadoras del sistema,

constituyendo ésto la parte activa, y la parte pasiva serán las impedancias de los distintos elementos.

La corriente máxima en el lado del secundario del transformador se calcula como:

$$I_{sec.} = \frac{kVA \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot V_{sec}}$$

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

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

d) METODO PRACTICO. Se utiliza con fines prácticos en instalaciones de tipo industrial.

En este método, la corriente de corto - circuito en la alimentación es el valor que se puede tener en el punto principal de desconexión, siendo los elementos principales que contribuyen a la corriente de corto - circuito: la red de alimentación y la carga local de los motores:

$$I_{cc} = I_{ccs} + I_{csm}$$

Donde:

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

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

$I_{ccm}$  = Corriente de corto - circuito con que contribuyen los motores. Para fines prácticos, su valor se calcula como:

$$I_{ccm} = 5 \cdot I_n$$

$I_n$  = Corriente nominal del motor.

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

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

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

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

Donde:

$V_s$  = Voltaje del sistema.

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

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

De las expresiones anteriores, se tiene a continuación la expresión para calcular la corriente de corto - circuito en forma analítica:

$$I_{csc} = \frac{V_s}{1,732 \cdot Z_s} + I_{ccm}$$

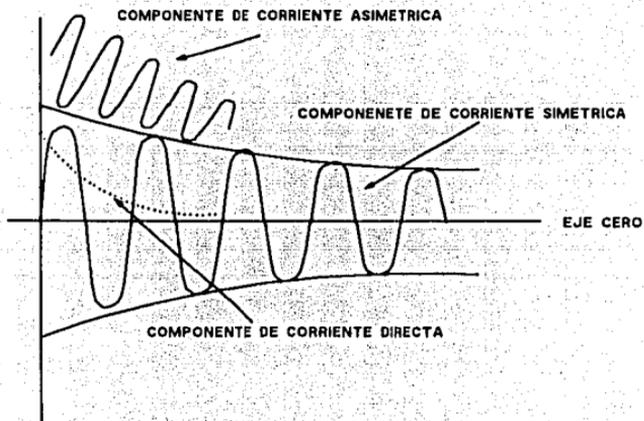


FIG. A - 1 REPRESENTACION DE LAS DIVERSAS COMPONENTES DE LA CORRIENTE DE CORTO - CIRCUITO.

**REACTANCIAS DE MAQUINAS SINCRONAS**

<b>TIPO DE GENERADOR</b>	<b>POLOS LISOS</b>	<b>POLOS SALIENTES CON DEVANADOS DE AMORTIGUAMIENTO</b>	<b>POLOS SALIENTES SIN DEVANADOS DE AMORTIGUAMIENTO</b>
<b>REACTANCIA SUBTRANSITORIA INICIAL</b>	9 A 32 <sup>(1)</sup>	12 - 30 <sup>(2)</sup>	20 - 40 <sup>(2)</sup>
<b>REACTANCIA TRANSITORIA</b>	14 A 35 <sup>(3)</sup>	20 - 45	20 - 40
<b>REACTANCIA SINCRONA</b>	140 A 300	80 - 180	80 - 180
<b>REACTANCIA DE SEC (-)</b>	9-22	10 - 25	30 - 50
<b>REACTANCIA DE SEC (0)</b>	2-10	4 - 20	5 - 25

**TABLA A.1**

- ( 1 ) Los valores aumentan con la capacidad de la máquina y los valores más bajos corresponden a las máquinas que operan con tensiones bajas.
- ( 2 ) Los valores mayores corresponden a máquinas cuyos motores operan con baja velocidad.
- ( 3 ) Para máquinas muy grandes ( 1 000 MVA o mayores ) puede ser de 40 a 45 %.

**VALORES TÍPICOS DE IMPEDANCIAS  
PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**

<b>TENSION PRIMARIA EN kV</b>	<b>Z %</b>
5 - 20	3 - 7.5
24 - 34.5	5 - 8
69	7 - 10
115	9 - 12
230	10 - 13
400	10 - 15

**TABLA A.2**

TABLA B - 1

	<p>HEMISFERA A LA SUPERFICIE DEL TERRENO DE RADIO R</p> $R = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0}$
	<p>DOS VARILLAS CILINDRICAS A UNA DISTANCIA S DE ENTRE-ELAS S &gt; 2L</p> $R = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 L} \left[ \ln \frac{s+L}{r} - 1 \right] + \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 L} \left[ 1 - \frac{2}{3} \frac{L^2}{s^2} - \frac{2}{5} \frac{L^4}{s^4} - \dots \right]$
	<p>DOS VARILLAS CILINDRICAS A UNA DISTANCIA S DE ENTRE-ELAS S &lt; 2L</p> $R = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 L} \left[ \ln \frac{s+L}{r} - \ln \frac{s-L}{s} - 2 - \frac{2}{2L} - \frac{2}{16L^2} - \dots \right]$
	<p>CONDUCTOR HORIZONTAL ENTERRADO A UNA PROFUNDIDAD S/2 DE LONGITUD 2L</p> $R = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 L} \left[ \ln \frac{s+L}{r} - \ln \frac{s-L}{s} - 2 - \frac{2}{16L^2} - \dots \right]$
	<p>CONDUCTOR EN ANGULO RECTO DE LONGITUD DE BRAZOS L A PROFUNDIDAD S/2</p> $R = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 L} \left[ \ln \frac{2L}{r} - \ln \frac{2L}{s} - 0.237 + 0.215 \frac{s}{L} + 0.104 \frac{s^2}{L^2} - 0.042 \frac{s^3}{L^3} \right]$
	<p>ANILLO DE DIAMETRO D, DIAMETRO DE CONDUCTOR d A PROFUNDIDAD h</p> $R = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 L} \left[ \ln \frac{D}{d} - \ln \frac{D}{2h} \right]$

" TABLA DE FORMULAS APROXIMADAS PARA TOMAS DE TIERRA. "

APENDICE B

**G L O S A R I O****ACOMETIDA.**

Línea comprendida entre la red de distribución pública y la caja general de protección. Es propiedad de la empresa suministradora.

**ARQUETA DE CONEXION.**

Elemento de obra que se utiliza para albergar el punto de puesta a tierra, para hacer registrables las conexiones de la línea principal de tierra con la toma de tierra del edificio.

**BARRERA.**

Elemento que asegura la protección ante contactos directos.

**BORNE PRINCIPAL DE TIERRA.**

Borne o barra prevista para la conexión a los dispositivos de puesta a tierra de los conductores de protección.

**CIRCUITO DE PROTECCION.**

Es el circuito formado por conductores, derivaciones y empalmes que forman las diferentes partes de la puesta a tierra.

**CIRCUITO ELECTRICO.**

Conjunto de materiales eléctricos de una instalación, alimentados a partir de un mismo origen y protegidos contra sobrintensidades por un mismo o varios dispositivos de protección.

**CONDUCTIVIDAD.**

Es una característica intrínseca de los materiales, que favorece el paso de la corriente eléctrica.

**CONDUCTOR.**

Genéricamente todo material capaz de conducir la corriente eléctrica.

**CONDUCTOR ACTIVO.**

Es el conductor destinado a transportar la energía eléctrica. La acepción se aplica tanto al conductor de fase como al conductor neutro.

**CONDUCTOR DE FASE.**

Es el conductor que transporta la energía eléctrica y está en tensión respecto de tierra.

**CONDUCTOR DE TIERRA.**

Conductor de protección que une el borne o barra principal de tierra a la toma de tierra.

**CONDUCTOR ENTERRADO.**

Electrodo artificial compuesto por un cable conductor desnudo, que se entierra en el terreno.

**CONDUCTOR NEUTRO.**

Conductor conectado al punto neutro de una red y capaz de contribuir al transporte de energía eléctrica.

**CONTACTO DIRECTO.**

Contacto de personas, animales doméstico o ganado con partes bajo tensión.

**CONTACTO INDIRECTO.**

Contacto de personas, animales doméstico o ganado con partes bajo tensión como resultado de un fallo.

**CORRIENTE.**

Aceptación vulgar con la que se conoce la electricidad o más concretamente la intensidad eléctrica.

**CORRIENTE DE CORTO - CIRCUITO.**

Sobreintensidad producida por un fallo de impedancia despreciable entre dos conductores activos que presentan una diferencia de potencial en servicio normal.

**CORRIENTE DE CHOQUE.**

Corriente que atraviesa el cuerpo humano o de un animal y cuyas características podría provocar efectos patológicos.

**CORRIENTE DE DISEÑO.**

Corriente destinada a ser transportada por un circuito en servicio normal.

**CORRIENTE DE FUGA.**

Corriente que, en ausencia de fallas, se transmite a tierra o a elementos conductores del circuito.

**CORRIENTE DE SOBRECARGA.**

La sobreintensidad que se produce en un circuito en ausencia una falla eléctrica.

**CORRIENTES GALVANICAS.**

Corrientes eléctricas errantes que circulan por el terreno y que pueden ser de diversas precedencias.

**CORROSION.**

Fenómeno químico que afecta a los metales, oxidando su superficie e inclusive llegando a descomponerlos.

**CORTO - CIRCUITO.**

Conexión voluntaria o accidental entre dos puntos de distinto potencial.

**CHOQUE ELECTRICO.**

Efecto patológico resultante del paso de corriente eléctrica a través del cuerpo humano o de un animal.

**DENSIDAD DE CORRIENTE.**

Relación que existe entre la intensidad que circula por el conductor y la sección del mismo.

**ELECTRODO.**

Elemento de puesta a tierra encargado de introducir en el terreno las corrientes de falla o de origen atmosférico.

**FRECUENCIA.**

Concepto ligado a la corriente alterna que refleja el número de veces que la corriente cambia de sentido ( ciclo ) por segundo.

**LINEA DE ENLACE CON TIERRA.**

Parte de la zona de tierra de una instalación que une los electrodos con el punto de puesta a tierra.

**LINEA PRINCIPAL DE TIERRA.**

Es la línea que parte del punto de puesta a tierra y conecta las derivaciones para la puesta a tierra de todas las masas de la instalación.

**MALLA.**

Conjunto de cables conductores desnudos formando una cuadrícula y que se comporta como un electrodo.

**MANGUITO DE ACOPLAMIENTO.**

En una pica, elemento provisto de rosca que se utiliza para unir una o dos picas en una pica con sufridera.

**PARARRAYOS.**

Elemento de protección que se utiliza para canalizar a tierra las descargas de origen atmosférico.

**PICA.**

Electrodo vertical, también llamado varilla.

**PUESTA A TIERRA.**

La denominación " puesta a tierra " comprende toda la ligazón metálica directa, sin fusibles ni protección alguna entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo, con objeto de conseguir que un conjunto de instalaciones, edificio y superficie próxima al terreno no existan diferencias de potencial peligrosas; y al mismo tiempo, se permita el paso a tierra de las corrientes de falta o de descarga de origen atmosférico.

**PUNTA DE PENETRACION.**

En una pica, es el elemento que se coloca en la parte delantera que facilita la penetración de la pica en el terreno.

**RED DE TIERRA.**

Red de protección independiente de la red eléctrica y que unida íntimamente con tierra, tiene como misión evacuar las corrientes de falta o de descarga.

**RESISTENCIA DE PASO A TIERRA.**

Relación existente entre la tensión que alcanza una instalación de puesta a tierra con respecto a un punto potencial 0 y la corriente que lo recorre.

**RESISTIVIDAD.**

Característica intrínseca de los materiales que se oponen al paso de la corriente eléctrica.

**SALINIDAD.**

La cantidad de sales minerales que contiene un terreno.

**SUFRIDERA.**

En una pica, elemento que se coloca en parte posterior.

**TENSION DE CONTACTO.**

Tensión que aparece al ocurrir un fallo de aislamiento entre partes accesibles simultáneamente.

**TENSION NOMINAL.**

Tensión que designa a una instalación o una parte de la misma.

**TERRENO.**

Desde el punto de vista eléctrico, es el elemento de la puesta a tierra de una instalación.

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

- 1.- ADAE; CURSO DE PUESTA A TIERRA, ESPAÑA, ED. PARANINFO, 1991.
- 2.- AGUILAR, MARTINIANO; CRITERIO DE DISEÑO DE PLANTAS TERMoeLECTRICAS, MEXICO, ED. LIMUSA, 1981.
- 3.- ANPASA; FOLLETO EXPLICATIVO SOBRE MATERIAL DE PARARRAYOS.
- 4.- ASEA BROWN BOVERI; CURSO DE CAPACITACION DE DISEÑO Y FABRICACION DE EQUIPO ELECTRICO, UNAM, MEXICO, 1987.
- 5.- CAMARENA, PEDRO; INSTALACIONES ELECTRICAS INDUSTRIALES, MEXICO, ED. C.E.C.S.A., 1989.
- 6.- C. F. E. ; CURSO COORDINACION DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION.
- 7.- C. F. E. ; CURSO DE MEDICION, TOMO II, MEXICO, DEPTO. DE MEDICION Y SERVICIOS, 1990.
- 8.- C. F. E. ; RECOMENDACIONES PARA EL CALCULO PRELIMINAR DE REDES DE TIERRA EN PLANTAS Y SUBESTACIONES ELECTRICAS, ESPECIFICACIONES C.F.E. 00 J00 - 1 Y C.F.E. DSCME - 07.
- 9.- CIA. LUZ Y FUERZA; MANUAL DE DISEÑO DE SUBESTACIONES ELECTRICAS, MEXICO.
- 10.- EDMINISTER, JOSEPH A.; CIRCUITOS ELECTRICOS, MEXICO, 1986.
- 11.- ELECTROTECNICA BALTEU; PRUEBAS A TRANSFORMADORES DE MEDICION.
- 12.- ENRIQUEZ, GILBERTO; FUNDAMENTOS DE INSTALACIONES ELECTRICAS DE MEDIANA Y ALTA TENSION, MEXICO, ED. LIMUSA, 1985.
- 13.- ENRIQUEZ, GILBERTO; CURSO DE TRANSFORMADORES Y MOTORES DE INDUCCION, MEXICO, ED. LIMUSA, 1989.

- 14.- ENRIQUEZ, GILBERTO; ELEMENTOS DE DISEÑO EN SUBESTACIONES ELECTRICAS, MEXICO, ED. LIMUSA, 1988.
- 15.- ENRIQUEZ, GILBERTO; EL ABC DE LAS INSTALACIONES ELECTRICAS INDUSTRIALES, MEXICO, ED. LIMUSA, 1990.
- 16.- GEREZ, VICTOR; MURRAY - LASSO, M.A. ;TEORIA DE SISTEMAS Y CIRCUITOS, TOMO I, MEXICO, ED. SERVICIOS Y REPRESENTACIONES DE INGENIERIA, 1972.
- 17.- HALLIDAY, DAVID; RESNICK, ROBERT; FISICA, PARTE II, ED. C.E.C.S.A., MEXICO, 1977.
- 18.- HORNING/SCHNEIDER; NORMAS VDE 0100 DE PROTECCION ELECTRICA, BARCELONA, ED. MARCOMBO, 1981.
- 19.- IEEE; GUIDE FOR SAFETY IN SUBSTATION OF GROUNDING, NORMA - 80, 1986.
- 20.- ROLDAN, JOSE; ELECTRICIDAD INDUSTRIAL, MADRID, ED. PARANINFO, 1989.
- 21.- SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E INDUSTRIA PARAESTATAL; NORMA OFICIAL MEXICANA NOM - 001 - SEMP - 1994 RELATIVA A LAS INSTALACIONES DESTINADAS AL SUMINISTRO Y USO DE LA ENERGIA ELECTRICA, OCTUBRE DE 1994.
- 22.- SOBERON, RAMON; NERI, RODOLFO; EL INGENIERO EN ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA, ¿ QUE HACE ?, MEXICO, ED. ALHAMBRA, 1984.
- 23.- VASALLO, FRANCISCO; MANUAL DE PUESTAS A TIERRA, BARCELONA, ED. C.E.A.C., 1979.
- 24.- VIQUEIRA, JACINTO; REDES ELECTRICAS TOMO I, MEXICO, ED. REPRESENTACIONES Y SERVICIOS DE INGENIERIA, 1986.