



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

"PROTECCION DE EQUIPOS ELECTRICOS  
POR MEDIO DE RED DE TIERRAS"

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
P R E S E N T A :  
DAVID ROJAS HERNANDEZ

ASESOR: ING. JOSE JUAN CONTRERAS ESPINOSA

284134



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
 INSTITUTO TECNOLÓGICO Y SUPERIOR DE CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
 PRESENTE



ATN. C. Ma. del Carmen García Mijares  
 Jefe del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 23 del Reglamento General de Exámenes, los permitimos comunicar a usted que revisamos el asunto:

"Protección de Equipos Eléctricos por Medio de Red de Tierras"

que solicita el posante David Rojas Hernández  
 con número de cuenta 8824450-1 para obtener el TÍTULO de  
Ingeniero Mecánico Eléctrico

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

ATENTAMENTE  
 "POR MI LAZAR HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuatitlán de los Ríos, Edo. de México, a 12 de Mayo de 2000

- PRESIDENTE Ing. J. Juan Contreras Espinosa
- VOCAL Ing. Esteban Corona Española
- SECRETARIO Ing. Casildo Rodríguez Arguieaga
- PRIMER SUPLENTE Ing. Cleo A. Ibarra Aguilar
- SEGUNDO SUPLENTE Ing. Oscar Cervantes Torres

## **AGRADESIMIENTOS**

**A MIS PADRES:**

**POR DARME LA VIDA Y LAS ENSEÑANZAS NECESARIAS,  
POR SER MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS EN LOS MOMENTOS  
DIFICILES, POR BRINDARME SU AMOR Y CONFIANZA  
POR AYUDARME A REALIZAR OTRO MAS DE MIS SUEÑOS.**

**A MIS HERMANOS:**

**QUIENES SIEMPRE ME ALENTARON Y AYUDARON  
PARA PODER CUMPLIR CON MIS METAS.**

**A UNA PERSONA MUY ESPECIAL:**

**QUE SIN SUS CONSEJOS, AMOR, AYUDA Y APOYO  
SINEROS NO HUBIERA LOGRADO LA REALIZACION  
DE ESTE TRABAJO. GRACIAS POR TODO FINA.**

**A LA FAMILIA COVARRUBIAS ARELLANO:**

**POR SU PACIENCIA, COMPRENSION,  
AYUDA Y SOBRE TODO SU AMIS IAD.**

**A TODOS MIS DEMAS AMIGOS Y PARIENTES  
QUE CON SUS ESTIMULOS Y APOYO ME ALENTARON  
A SEGUIR EN ESTE CAMINO.**

## INDICE

-INTRODUCCION.....	4
-CAPITULO 1 -CONCEPTOS BASICOS	
-DEFINICIÓN.....	5
-CLASIFICACION.....	5
-ELEMENTOS QUE COMPONEN UN SISTEMA DE TIERRAS.....	7
-CAPITULO 2 -PELIGROSIDAD DE LA CORRIENTE ELECTRICA	
-EFECTOS DE LA CORRIENTE ELECTRICA EN EL CUERPO HUMANO SEGUN SU MAGNITUD, DURACION Y FRECUENCIA.....	30
-RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO.....	31
-TENSIONES PELIGROSAS OCASIONADAS POR UNA FALLA. ( TENSIONES DE PASO, DE CONTACTO Y TRANSFERENCIA ) .....	33
-CAPITULO 3 -NATURALEZA DEL TERRENO	
-MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	37
-FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTIVIDAD.....	41
-VALORES PRACTICOS DE LA RESISTIVIDAD .....	45
-DETERMINACION DE LA MAXIMA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA .....	46
-FACTOR DE DECREMENTO.....	50
-EFECTOS DE CAMBIOS FUTUROS.....	51
-COMO LIMITAR LA CORRIENTE DE FALLA.....	52
-RESISTENCIA DE TIERRA.....	52
-GRADIENTE DE POTENCIAL.....	54

-CAPITULO 4 -CONEXION A TIERRA DE EQUIPO Y ANALISIS PARA UN SISTEMA DE TIERRAS

-EQUIPOS QUE DEBEN SER CONECTADOS A TIERRA.....	58
-CONEXION A TIERRA DE ESTRUCTURAS.....	58
-CONEXION A TIERRA DE LAS SUBESTACIONES TIPO INTEMPERIE.....	59
-CONEXION A TIERRA DE LOCALES EN DONDE HAY GENERADORES O MOTORES ELECTRICOS.....	60
-CONEXION A TIERRA DE DUCTOS PARA ALAMBRES CONDUCTORES.....	60
-CONEXION A TIERRA DE MOTORES DIVERSOS.....	61
-CONEXION A TIERRA DE EQUIPO PORTATIL.....	62
-ANALISIS PRELIMINAR PARA UN SISTEMA DE TIERRAS.....	63
-RED DE TIERRAS.....	63
-CONDUCTORES DE LA RED DE TIERRAS.....	68
-RIGIDEZ MECANICA.....	72
-MATERIAL Y LONGITUD DEL CONDUCTOR PARA CONTROLAR EL GRADIENTE DE POTENCIAL.....	72
-FACTOR DE CONFORMIDAD " K <sub>i</sub> ".....	75
-TENSION DE PASO EN LA PERIFERIA DE LA RED.....	77
-DIMENSIONAMIENTO DE LA RED.....	79
-NUMERO DE ELECTRODOS EN UN SISTEMA DE TIERRAS.....	80
-RESISTENCIA POR SISTEMAS DE TIERRA.....	83

-CAPITULO 5 -DISEÑO PRACTICO DE UN SISTEMA DE CONEXION A TIERRAS

-OBSERVACIONES DEL DISEÑO PRELIMINAR.....	85
-DISEÑO PRACTICO DE UN SISTEMA DE CONEXION A TIERRA.....	86
-DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA DE TIERRAS.....	91
-MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE TIERRAS.....	100

# PROTECCION DE EQUIPOS ELECTRICOS POR MEDIO DE RED DE TIERRAS

## INTRODUCCION

POR MAS QUE LA EVOLUCION TECNOLOGICA PONGA EN EL MERCADO APARATOS O DISPOSITIVOS SOFISTICADOS PARA PREVENIR LAS CORRIENTES DE FALLA, UNA EFICIENTE INSTALACION DE TIERRA SIGUE SIENDO UNO DE LOS MEJORES FUNDAMENTOS DE LA SEGURIDAD.

EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION ELECTRICA TANTO EN PLANTAS INDUSTRIALES COMO EN SUBESTACIONES, LA CONEXION CORRECTA A TIERRA DE DICHO SISTEMA ES UN FACTOR DE MAXIMA IMPORTANCIA Y TIENE POR OBJETO REDUCIR AL MAXIMO EL PELIGRO QUE PRESENTA UN SISTEMA ELECTRICO, YA SEA, POR SU PROPIA ENERGIA O POR CAUSAS EXTERNAS, UNAS EVENTUALES Y OTRAS PREVISIBLES; ASI COMO TAMBIEN PROPORCIONAR MAXIMA SEGURIDAD AL PERSONAL Y PROTECCION AL EQUIPO ELECTRICO.

ES POR ESTA RAZON, QUE TODO SISTEMA ELECTRICO DEBE ESTAR DISEÑADO PARA PREVENIR EL PELIGRO DE CUALQUIER CONTACTO ACCIDENTAL DE LAS PARTES METALICAS CIRCUNDANTES CON LOS ELEMENTOS QUE SE ENCUENTREN BAJO TENSION.

ESTE PELIGRO SE PUEDE REDUCIR EVENTUALMENTE, HACIENDO QUE LAS PARTES METALICAS QUE NO ESTEN A POTENCIAL Y AL SUELO, SI SE ESTABLECE UNA CONEXIÓN A TIERRA CONVENIENTE.

A FIN DE LOGRAR LA MAYOR SEGURIDAD POSIBLE EN LAS INSTALACIONES ELECTRICAS, EL ENCARGADO DE REALIZAR EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CONEXION A TIERRA, DEBERA APOYARSE DE CIERTAS TECNICAS PARA ELEGIR EL SISTEMA MAS ADECUADO Y ASI OBTENER LA MAYOR PROTECCION POSIBLE.

PARA EL DESARROLLO DE PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACION HEMOS TRATADO DE OBTENER LA INFORMACION MAS ACTUALIZADA, CON LA FINALIDAD DE QUE DICHO TRABAJO SIRVA DE GUIA AL INGENIERO PROYECTISTA, PARA DETERMINAR Y EJECUTAR UNA CONEXION A TIERRA ADECUADA EN EL SISTEMA ELECTRICO A SU CARGO.

## CAPITULO I

### CONCEPTOS BASICOS

#### -DEFINICIÓN

ES TAN GRANDE LA MASA DEL GLOBO TERRAQUEO QUE SU POTENCIAL SE MANTIENE PRACTICAMENTE INVARIABLE CUALQUIERA QUE SEA LA ENTIDAD DE LAS CARGAS QUE SE LE APLIQUEN, EN ESTA CARACTERISTICA SE BASA EL PRINCIPIO DE LA PUESTA A TIERRA.

SEGUN SEAN LOS FINES QUE SE PRETENDAN ALCANZAR SE DISPONE DE LOS TIPOS DE PUESTA A TIERRA, LOS CUALES SON: PUESTA A TIERRA PARA PROTECCION, PUESTA A TIERRA DE OPERACION Y PUESTA A TIERRA PROVISIONALES, LOS CUALES SE EXPLICARAN MAS ADELANTE.

#### -CLASIFICACION

SISTEMAS DE TIERRA DE PROTECCION.- PERSIGUE DOS OBJETIVOS PRINCIPALES, PROTEGER AL PERSONAL Y PROTEGER AL EQUIPO ELECTRICO EN GENERAL DURANTE LAS FALLAS QUE SE PRESENTAN EN EL EQUIPO ELECTRICO.

SERA FUNCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCION MANTENER NIVELES DE TENSION Y CORRIENTE ACEPTABLES QUE NO RESULTEN DE PELIGRO AL PERSONAL Y AL EQUIPO ELECTRICO QUE PUEDAN SER DAÑADOS POR LOS EFECTOS DESTRUCTIVOS POTENCIALMENTE DE SOBREVOLTAJES Y ELEVADAS CORRIENTES DURANTE LAS FALLAS A TIERRA.

POR LO TANTO, ES UNA NORMA FUNDAMENTAL DE SEGURIDAD QUE TODAS LAS PARTES METALICAS QUE NO SE ENCUENTREN BAJO TENSION NORMALMENTE, PERO QUE PUEDEN TENER DIFERENCIAS DE POTENCIAL A CAUSA DE FALLAS ACCIDENTALES, SE DEBEN CONECTAR A TIERRA LAS SIGUIENTES PARTES:

TABLEROS ELECTRICOS.

TANQUE DE LOS TRANSFORMADORES O INTERRUPTORES.

LAS CARCAZAS DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS.

LAS ESTRUCTURAS METALICAS.

Y EN GENERAL TODOS LOS SOPORTES METALICOS DE EQUIPOS Y APARATOS SISTEMAS DE TIERRA DE OPERACION O DE SERVICIO.- ES EL QUE SE INSTALA DELIBERADAMENTE EN DETERMINADOS PUNTOS DE UNA INSTALACION ELECTRICA CON EL FIN DE MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO, PROPORCIONANDO UNA MAYOR SEGURIDAD O UNA MEJOR REGULARIDAD DE OPERACION. LOS PUNTOS DEL SISTEMA POR CONECTAR A TIERRA PUEDEN SER POR EJEMPLO:

EL NEUTRO DE LOS GENERADORES.

EL NEUTRO DE LOS TRANSFORMADORES CONECTADOS  
EN ESTRELLA.

LA CONEXION A TIERRA DE LOS PARARRAYOS.

HILOS DE GUARDA.

TRANSFORMADORES DE POTENCIAL.

CABLES DE TIERRA.

SISTEMAS DE TIERRAS PROVISIONALES O DE TRABAJO.- SON INSTALACIONES EVENTUALES QUE SE HACEN CON FRECUENCIA DURANTE LAS ACTIVIDADES DE TRABAJO EN UNA INSTALACION ELECTRICA COMO SON; MANTENIMIENTO, AMPLIACIONES, REPARACIONES, ETC

AUNQUE SOLO SE TRATEN DE INSTALACIONES TEMPORALES NO SE DEBEN DESCUIDAR DE NINGUNA MANERA LA SEGURIDAD QUE DEBE PROPORCIONAR UN BUEN SISTEMA DE TIERRA; POR LO TANTO, CUANDO LAS NECESIDADES DE ALGUNA INSTALACION O EQUIPO REQUIERAN UN SISTEMA DE TIERRAS PROVISIONAL, ESTAS DEBERAN OFRECER LAS MISMAS GARANTIAS DE UN SISTEMA PERMANENTE DE TIERRA.

## -ELEMENTOS QUE COMPONEN UN SISTEMA DE TIERRAS

**CONDUCTORES.-** EL CONDUCTOR DE CONEXION A TIERRA, ES UN CONDUCTOR DESNUDO, POR LO GENERAL DE COBRE, SIN AISLADORES, AL DESCUBIERTO, DE FORMA VISIBLE QUE NO RESULTE FACIL SU DETERIORO POR ACCIONES MECANICAS O QUIMICAS. EN LA VIGENTE REGLAMENTACION ESTA PROHIBIDO EL TENDIDO EMPOTRADO DEL CIRCUITO DE CONEXION A TIERRA CUANDO ESTO NO FUERE POSIBLE ( POR EJEMPLO, EL PASO DE TABIQUES, MUROS, ETC. ), EL CONDUCTOR DE TIERRA SE HA DE INSTALAR EN EL INTERIOR DE UN TUBO DE ACERO ( CONDUIT ). SU PRINCIPAL FUNCIÓN ES CONducir UNICAMENTE LA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA; POR LO TANTO, EL CONDUCTOR A TIERRA DEBERA CONducir CORRIENTE EN CONDICIONES NORMALES DE OPERACION DEL SISTEMA ELECTRICO.

**CONECTORES.-** LOS CONECTORES DE UN SISTEMA DE TIERRAS HAN DE TENER UN CONTACTO ELECTRICO PERFECTO, TANTO CON LAS PARTES METALICAS QUE SE DESEAN PONER A TIERRA, COMO LOS PROPIOS CONDUCTORES DEL SISTEMA QUE FORMARAN REDES ( POR EJEMPLO, CUANDO ES NECESARIO HACER UNA DERIVACION, CUANDO HAYA CRUCE DE CONDUCTORES, ETC. ), ASI COMO TAMBIEN CON LA PLACA O ELECTRODO QUE CONSTITUYE LA TOMA DE TIERRA PRINCIPAL. EL DISPOSITIVO QUE PERMITE ESTAS UNIONES ES EL CONECTOR.

ENTRE LOS CONECTORES MÁS USUALES SÉ CUENTAN CON LOS SIGUIENTES:

A) **CONECTORES SOLDABLES.-** SON LOS CONECTORES QUE HACEN UNIONES PERMANENTES A BASE DE FUNDICIONES DE METALES, QUE SE LOGRAN CON MOLDES ESPECIALES.

B) **CONECTORES MECANICOS.-** SON LOS CONECTORES QUE PERMITEN SU COLOCACION A BASE DE TORNILLOS Y DISPOSITIVOS QUE APRISIONAN LAS PARTES A UNIR HASTA LOGRAR UN BUEN CONTACTO.

EN LAS FIGURAS 1, 2, 3, 4 Y 5, SE MUESTRAN ALGUNOS DE LOS CONECTORES MÁS USUALES.

TOMAS DE TIERRA.- UNA CONEXION A TIERRA EN LAS INSTALACIONES ELECTRICAS SE LLEVA ACABO MEDIANTE TOMAS DE TIERRA; QUE SON CUERPOS METALICOS, CONDUCTORES INTRODUCIDOS EN EL SUELO Y QUE FORMAN UNION CONDUCTORA CON EL TERRENO.

LA FORMA DE LA TOMA DE TIERRA, EL VALOR DE SU SUPERFICIE Y LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO DETERMINAN DE QUE MANERA DEBE EFECTUARSE LA DIFUSIÓN DE CORRIENTE.

A CONTINUACION VEREMOS LAS TOMAS DE TIERRA MAS UTILIZADAS EN LA PRACTICA Y QUE SE AJUSTAN A LAS PRESCRIPCIONES REGLAMENTARIAS.

TOMAS DE TIERRA POR MEDIO DE DISPERSORES.- ESTE ES UNO DE LOS SISTEMAS MAS EMPLEADOS EN LA PRACTICA Y CONSISTE EN CLAVAR VERTICALMENTE EN EL TERRENO TUBOS METALICOS, QUE TIENEN COMO FINALIDAD DISPERSAR LA CORRIENTE EN LA TIERRA.

ESTOS DISPERSORES HAN DE SER DE METAL NO FERRICO; DE 2.44 A 3.05 METROS DE LONGITUD ( 8 A 10 PIES ), CON UN RECUBRIMIENTO DE COBRE Y DIAMETRO DE 15.9 MILIMETROS ( 5/8 " ). SE ENCUENTRAN EN EL MERCADO EN 2 PIEZAS PARA FACILITAR SU MANEJO; EL PRIMER ELEMENTO ESTA PROVISTO DE UNA PUNTA DE ACERO TEMPLADO Y LOS DEMAS ELEMENTOS SON ENCAJABLES ENTRE SÍ.

PARA UNA BUENA CONDUCTIVIDAD DEL TERRENO Y PUESTO QUE LOS DISPERSORES SON TUBOS, ESTOS SE LLENAN PERIODICAMENTE CON UNA SOLUCION SALINA LA CUAL ES INTRODUCIDA EN LOS ORIFICIOS QUE VAN DISPUESTOS EN EL DISPERSOR, SATURANDO DE ESTA FORMA LAS REGIONES MAS PROFUNDAS DEL TERRENO LA PARTE MAS ALTA DEL MISMO ES RELLENADA TAMBIEN DE SOLUCION SALINA.

SI CON UN SOLO DISPERSOR NO SE CONSIGUE LA RESISTENCIA DESEADA, SE CLAVAN EN PARALELO OTROS DISPERSORES QUE DEBEN ESTAR A UNA DISTANCIA NO MENOR DE 2 METROS.

EN LAS FIGURAS 6, 7, 8, 9, 10, 11 Y 12 SE MUESTRAN ALGUNOS DISPERSORES.

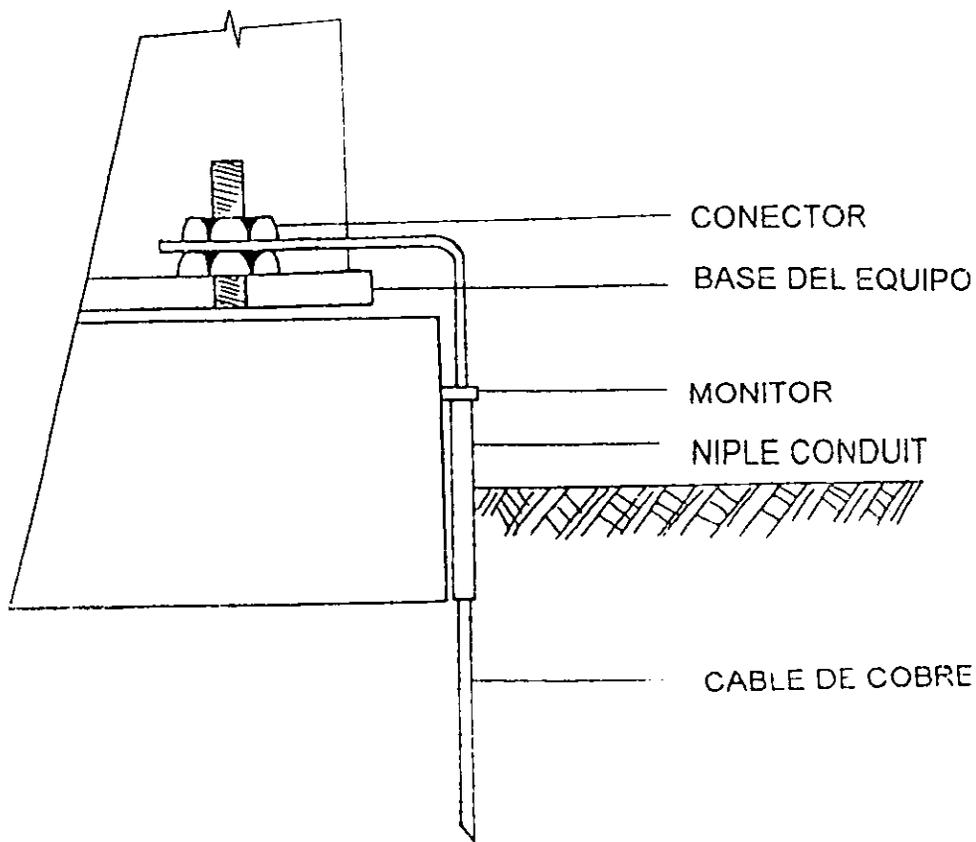


FIG. 1 DETALLE DE CONECTOR A TIERRA

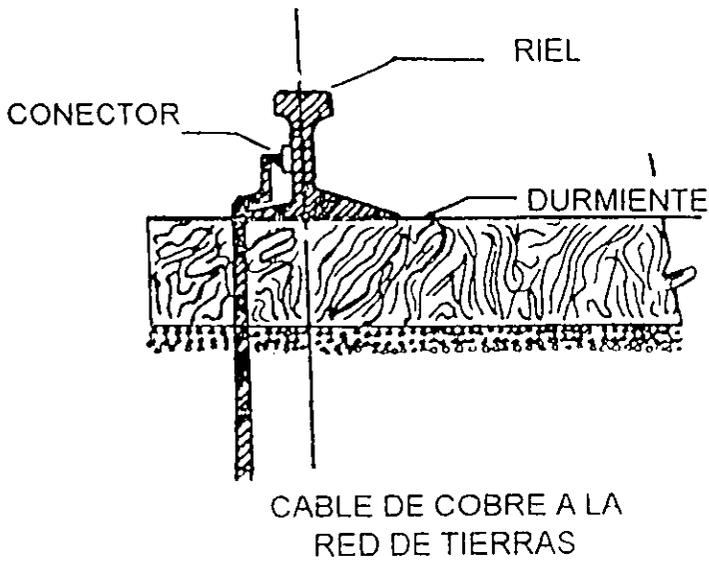
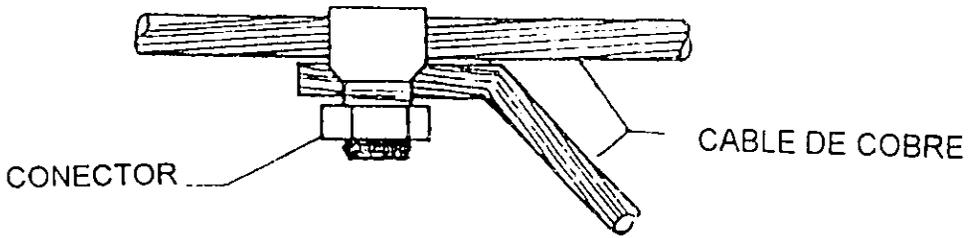
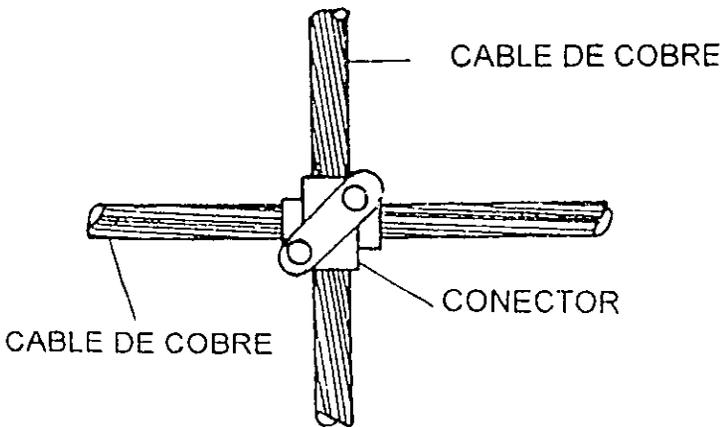


FIG. 2

DETALLE DE CONECTOR A TIERRAS



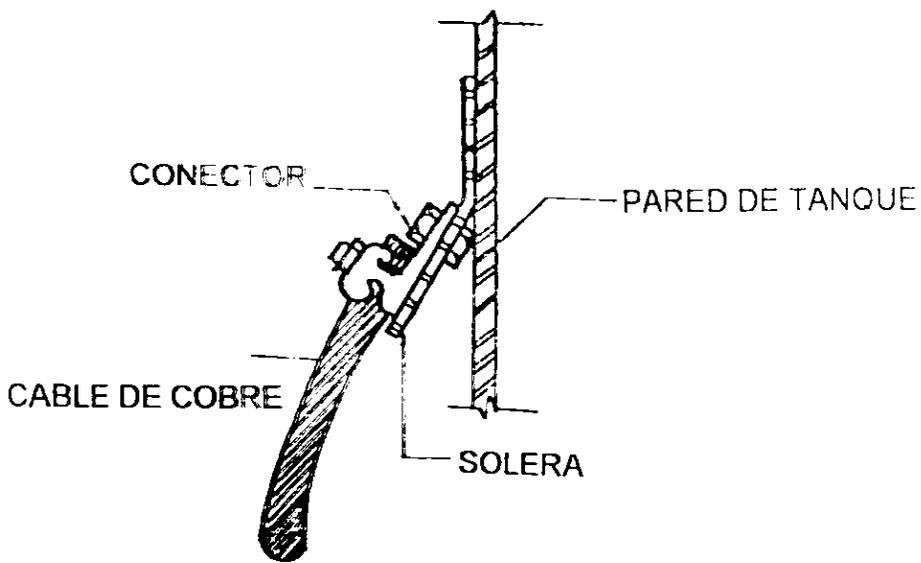
DETALLE DE UNA DERIVACION



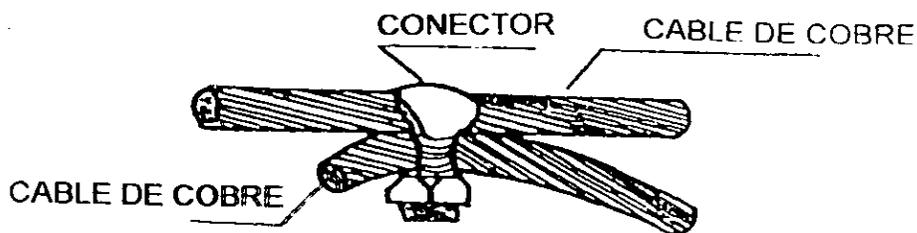
CRUCE DE CABLES

FIG. 3

DETALLE DE CONECTORES



DETALLE DE CONECTOR  
DE CABLE A TANQUE



DETALLE DE CONECTOR  
DE CABLE A CABLE

FIG. 4 DETALLE DE CONECTORES

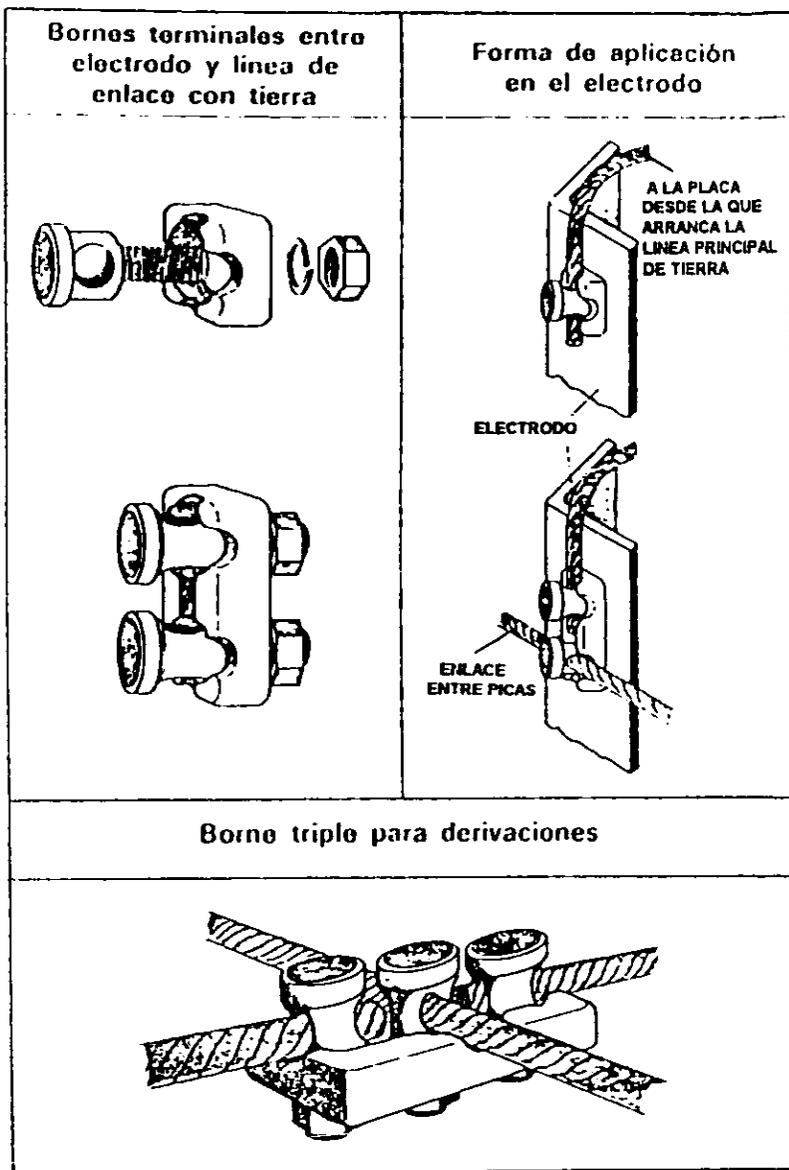


FIG. 5 DETALLE DE CONECTORES

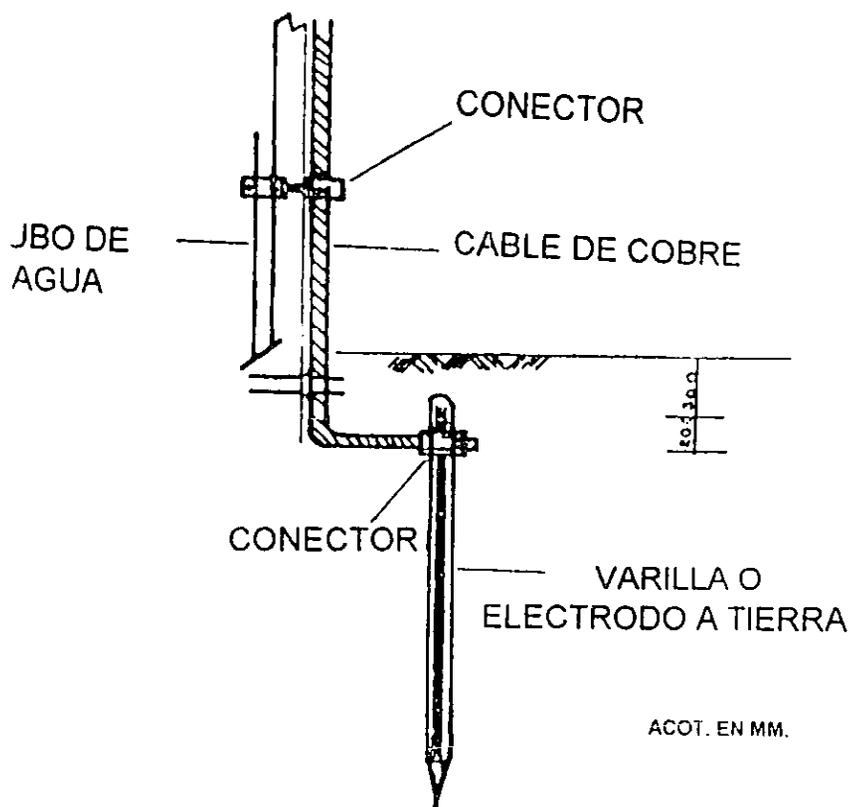


FIG. 6 DISPERSORES MAS USUALES

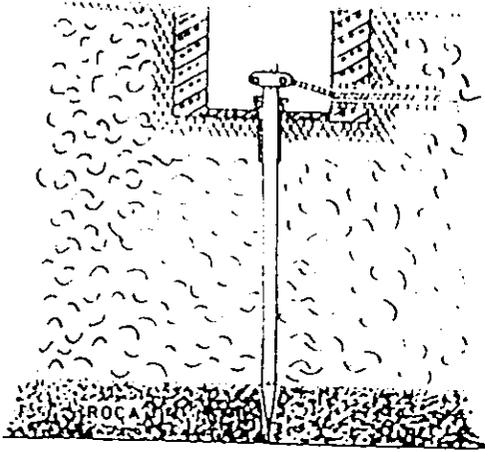
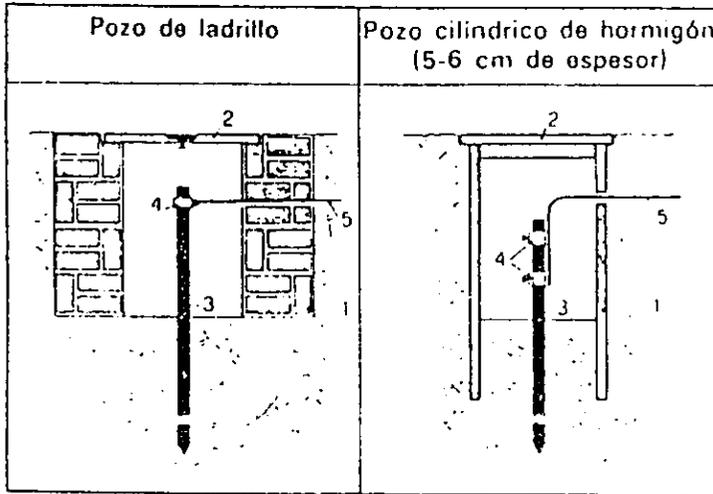
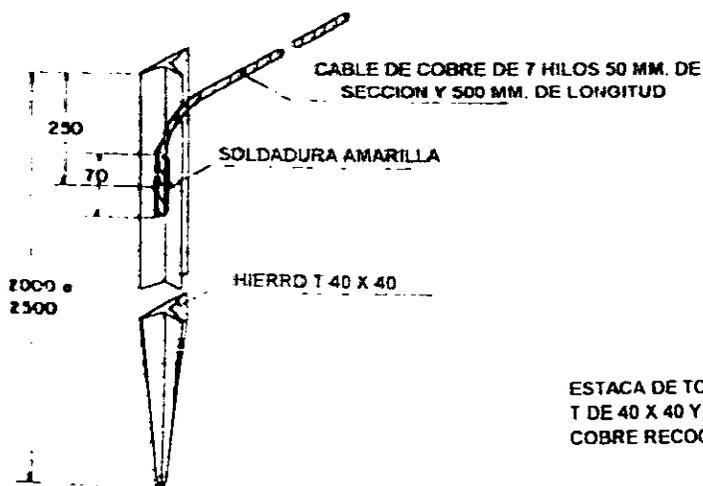


FIG. 7 REALIZACION PRACTICA DE UNA TOMA DE TIERRA DE PICA



- 1.- POZO
- 2.- TAPA DE HORMIGÓN O HIERRO ( EVITASE ESTE ÚLTIMO MATERIAL SIEMPRE QUE SEA POSIBLE )
- 3.- ELECTRODO EN FORMA DE PICA O TUBULAR. PUEDE IGUALMENTE SER LA DERIVACION DE UN ELECTRODO EN MALLA
- 4.- BORNES
- 5.- CABLES DE CORRE O DE ACERO GALVANIZADO

FIG. 8 DISPERSORES MAS USUALES

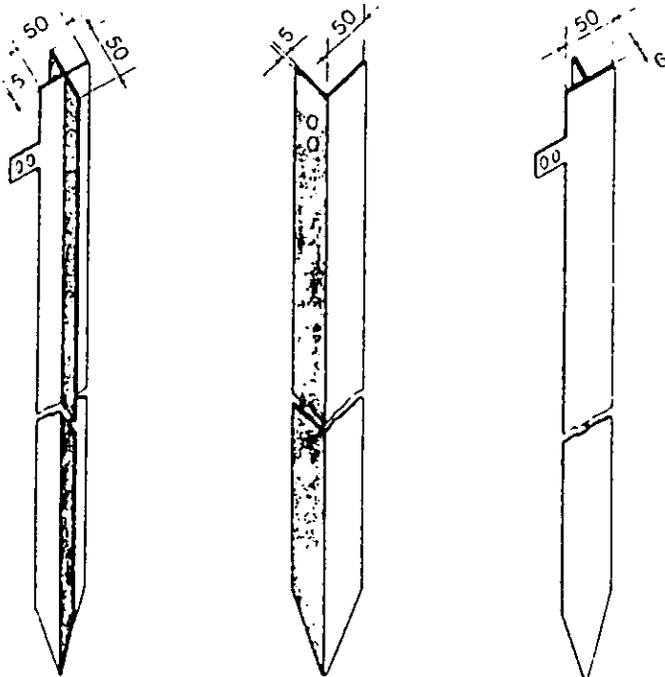


ESTACA DE TOMA DE TIERRA CON HIERRO T DE 40 X 40 Y CONDUCTOR DE CONEXIÓN COBRE RECOCIDO

ACOT EN MM.

FIG. 9 DISPERSORES MAS USUALES

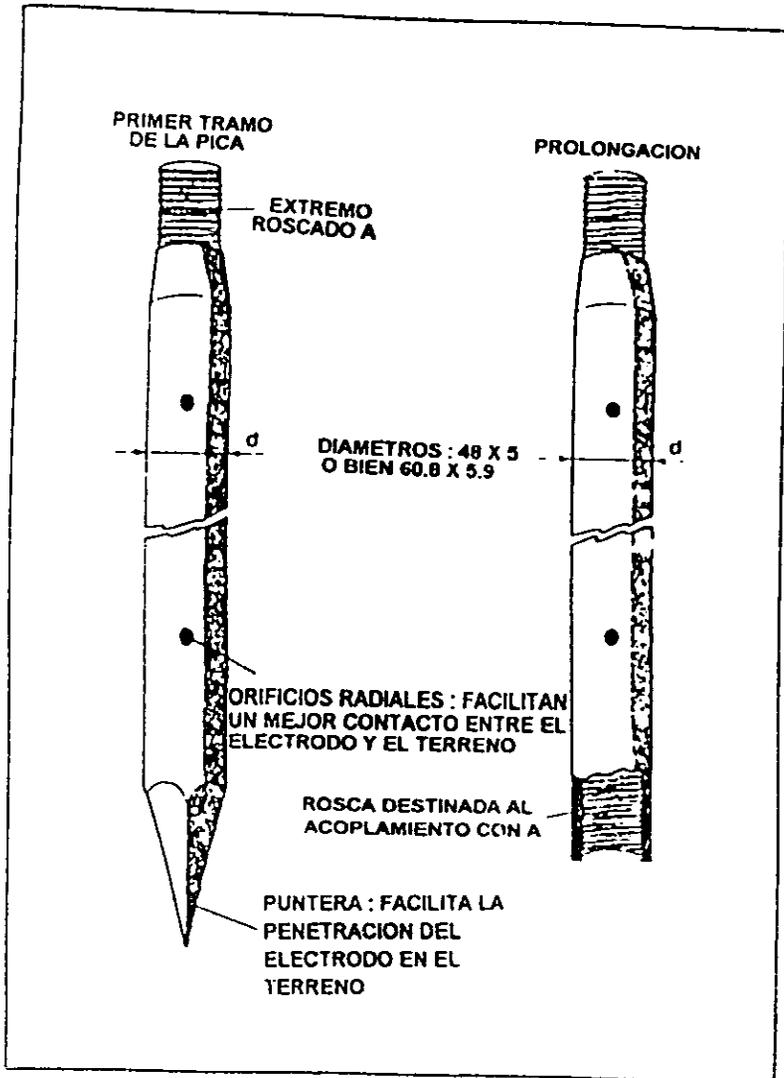
Perfiles de acero galvanizado en baño caliente



Longitudes aproximadas (en metros)  
que se encuentran en el mercado

+	L	T
1.00	1.00	1.00
1.50	1.50	1.50
2.00	2.00	2.00
3.00	3.00	3.00
4.00	4.00	4.00

FIG. 10 DISPERSORES MAS USUALES



LONGITUD COMERCIAL DE CADA ELEMENTO : 1.5 MTRS.

FIG. 11 DISPERSORES MAS USUALES

TOMA DE TIERRA EN FORMA DE PLACA.- ESTE TIPO DE TOMA SE RECOMIENDA EN LOS TERRENOS DONDE LA PROFUNDIDAD VEGETAL ES IMPORTANTE, SE INSTALAN POR LO GENERAL DE 0.5 A 1.0 METROS DE PROFUNDIDAD. EL EMPLEO DE ESTAS TOMAS DE TIERRA NO SON DE MUCHO USO, DEBIDO A SU ALTO COSTO Y AL INCONVENIENTE DE QUE LA MAYOR PARTE DE CORRIENTE DE PASO SÉ CONCENTRA EN LAS ARISTAS, QUE TIENEN UNA SUPERFICIE TOTAL MUY PEQUEÑA Y QUE PUEDE SER DE PELIGRO AL PERSONAL DEBIDO A LA POCA PROFUNDIDAD A LA QUE ESTA ENTERRADA. NO OBSTANTE ESTAN INCONVENIENTE PUEDE REMEDIARSE, EN PARTE, PERFORANDO LAS PLACAS PARA AUMENTAR LA LONGITUD DE LAS ARISTAS VIVAS. SI EL TERRENO PRESENTA CARACTERISTICAS VARIANTES CON RESPECTO A LA RESISTENCIA DE TIERRA, SE RECOMIENDA PARA LA TOMA DE TIERRA EL SISTEMA DE DISPERSORES. A CONTINUACION SE PRESENTAN ALGUNAS RECOMENDACIONES PARA UNA TOMA DE TIERRA EN FORMA DE PLACA.

A) LAS PLACAS SE ENTERRARAN PERFECTAMENTE EN FORMA VERTICAL A UNA PROFUNDIDAD SUFICIENTE PARA ENCONTRAR UN TERRENO BASTANTE HUMEDO.

B) CUANDO EXISTAN CAPAS DE ROCA, GRAVA, ETC. LA PLACA SE INSTALARA HORIZONTALMENTE A UNA PROFUNDIDAD MENOR DE 2 METROS. VER FIGURAS 13 Y 14

TOMA DE TIERRA EN FORMA DE PLETINA.- ESTA TOMA DE TIERRA CONSISTE EN UNA PLETINA O BANDA METALICA, SE INSTALA A POCA PROFUNDIDAD Y HORIZONTALMENTE COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA 15.

SE UTILIZA EN LAS INSTALACIONES A LA INTEMPERIE Y EN DONDE NO SE PUEDEN EMPLEAR OTROS SISTEMAS A TIERRA. SE FIJAN LAS SIGUIENTES DIMENSIONES COMO MINIMAS PARA ESTAS TOMAS DE TIERRA:

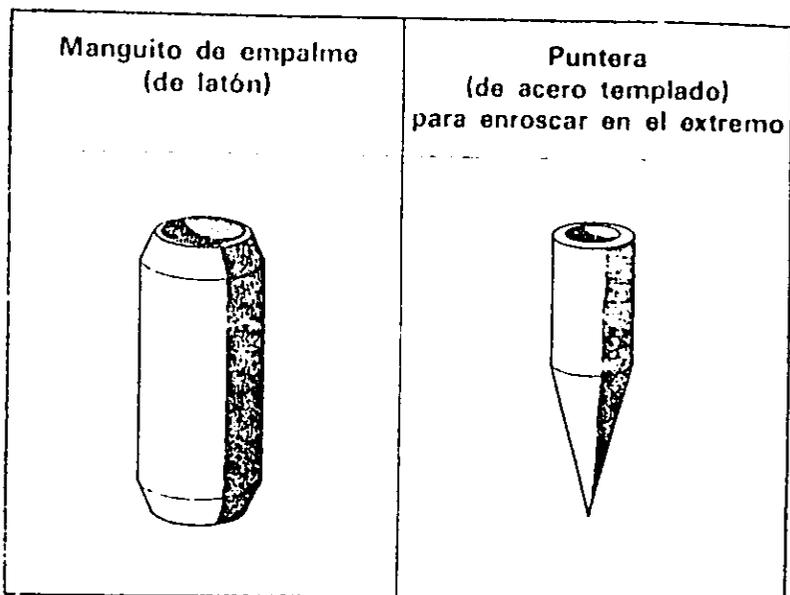


FIG. 12 ACCESORIOS DE DISPERSORES

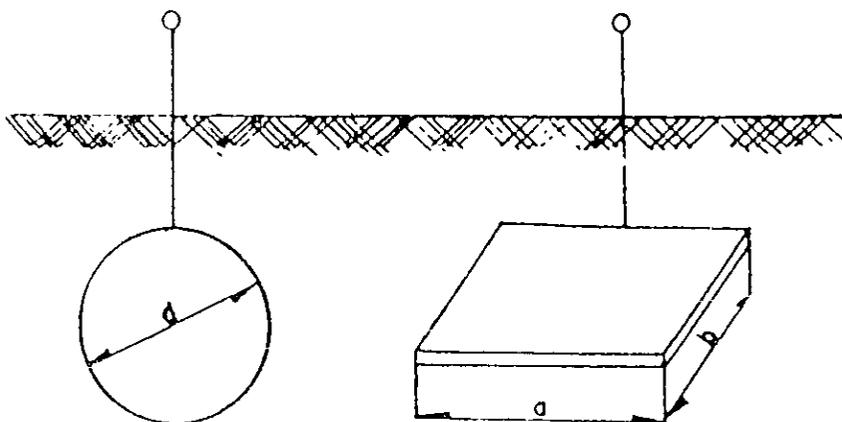


FIG. 13 TOMAS DE TIERRA EN FORMA DE PLACA

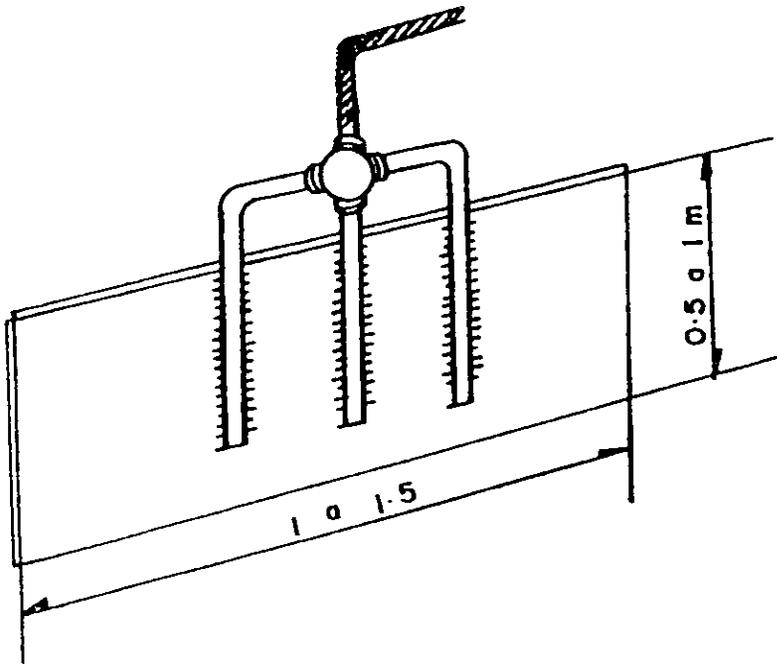


FIG. 14 DIMENSIONES DE UNA TOMA DE TIERRA EN FORMA DE PLACA

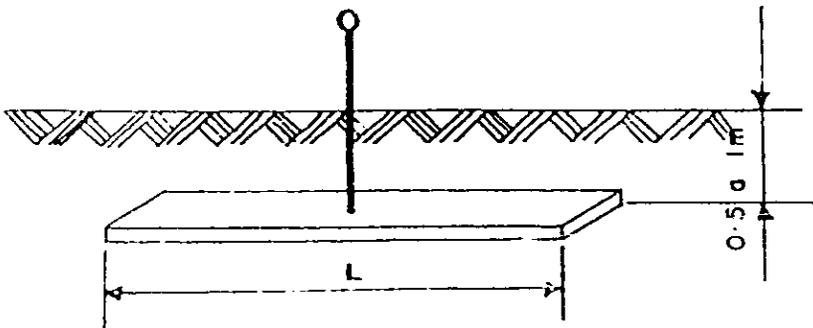
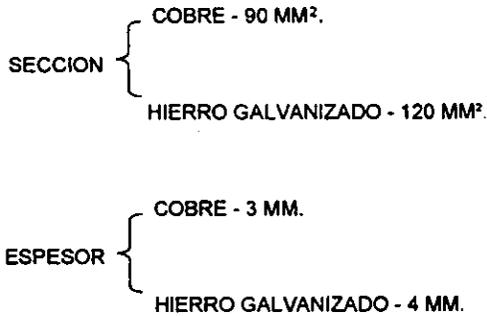


FIG. 15 TOMA DE TIERRA EN FORMA PLETINA

LONGITUD 5 METROS



EN LAS FIG. 16, 17, 18 Y 19 SE MUESTRAN OTROS SISTEMAS DE TOMA DE TIERRA.

REGISTROS.- LOS REGISTROS SON EXCAVACIONES ACONDICIONADAS PARA TENER ACCESO A CIERTOS PUNTOS DEL SISTEMA DE TIERRA.

SON GENERALMENTE TUBOS DE 30 CENTIMETROS DE DIAMETRO MINIMO EN DONDE ESTA ALOJADO UN DISPERSOR UNIDO AL CONDUCTOR. ESTOS REGISTROS PERMITEN HACER MEDICIONES DE CONTINUIDAD Y RESISTENCIA AL SISTEMA DE TIERRAS. EN LAS FIGURAS 20, 21, 22, 23, 24 Y 25 SE MUESTRAN LOS REGISTROS TÍPICOS DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

CUANDO LA CONDUCTIVIDAD DEL TERRENO ES MUY BAJA, SE PUEDEN HACER MEZCLAS DE TIERRAS Y LLENAR EL REGISTRO CON ELLAS, Y ASÍ AYUDAR A UNA MÁS RÁPIDA Y EFICIENTE DISPERSIÓN DE LA CORRIENTE EN LA TIERRA.

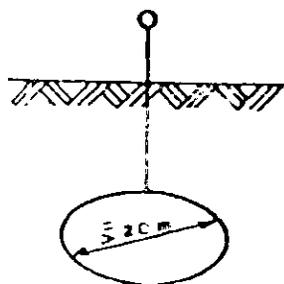


FIG. 16 TOMA DE TIERRA EN FORMA DE BUCLE

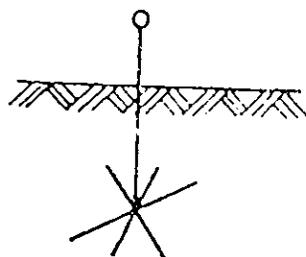


FIG. 17 TOMA DE TIERRA EN FORMA DE ESTRELLA

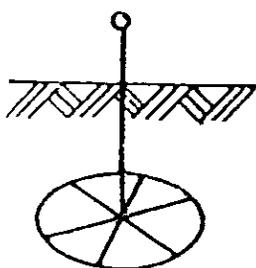


FIG. 18 TOMA DE TIERRA DE RED ESTRELLADA EN BUCLE

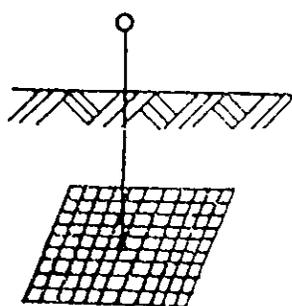


FIG. 19 TOMA DE TIERRA DE RED EN MALLA

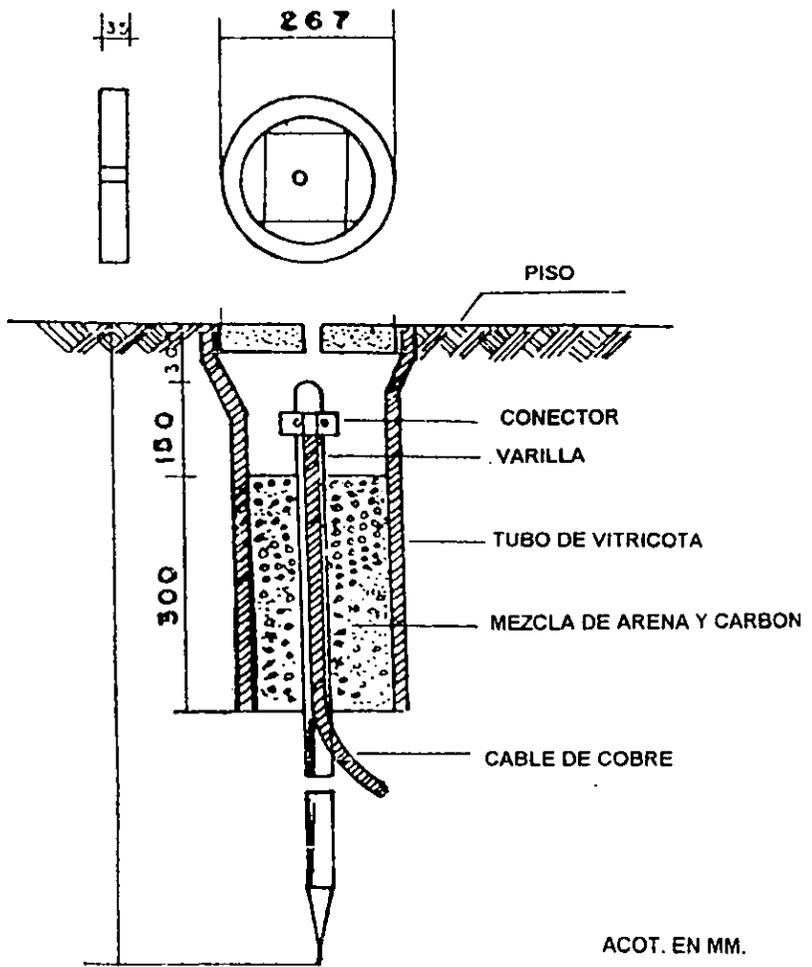


FIG. 20 DETALLE DE REGISTRO

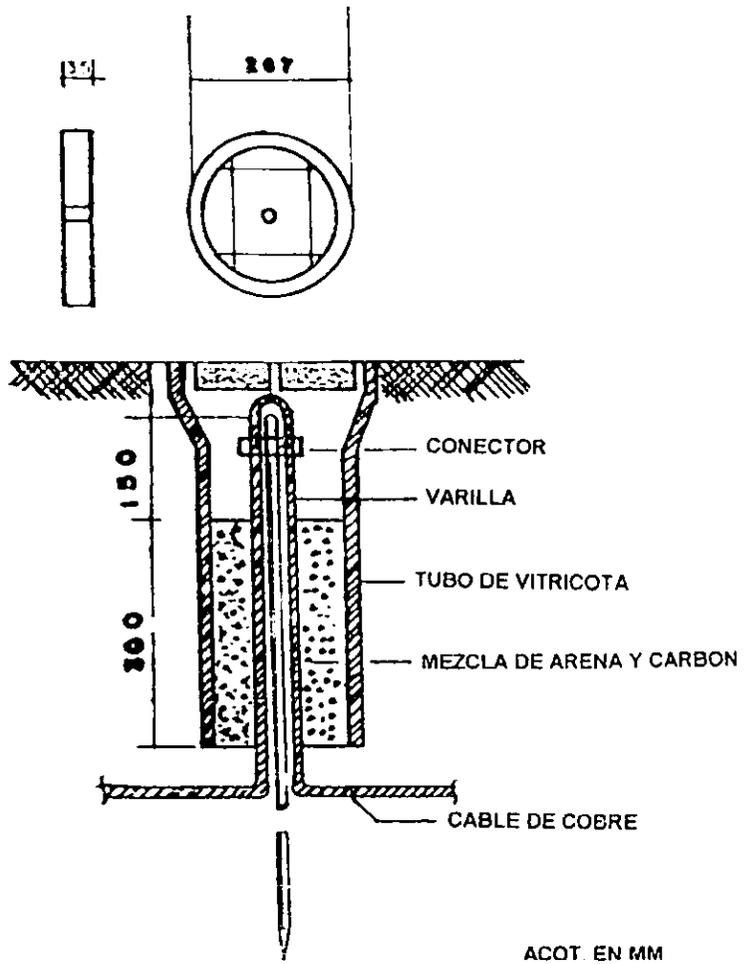


FIG. 21 DETALLE DE REGISTRO

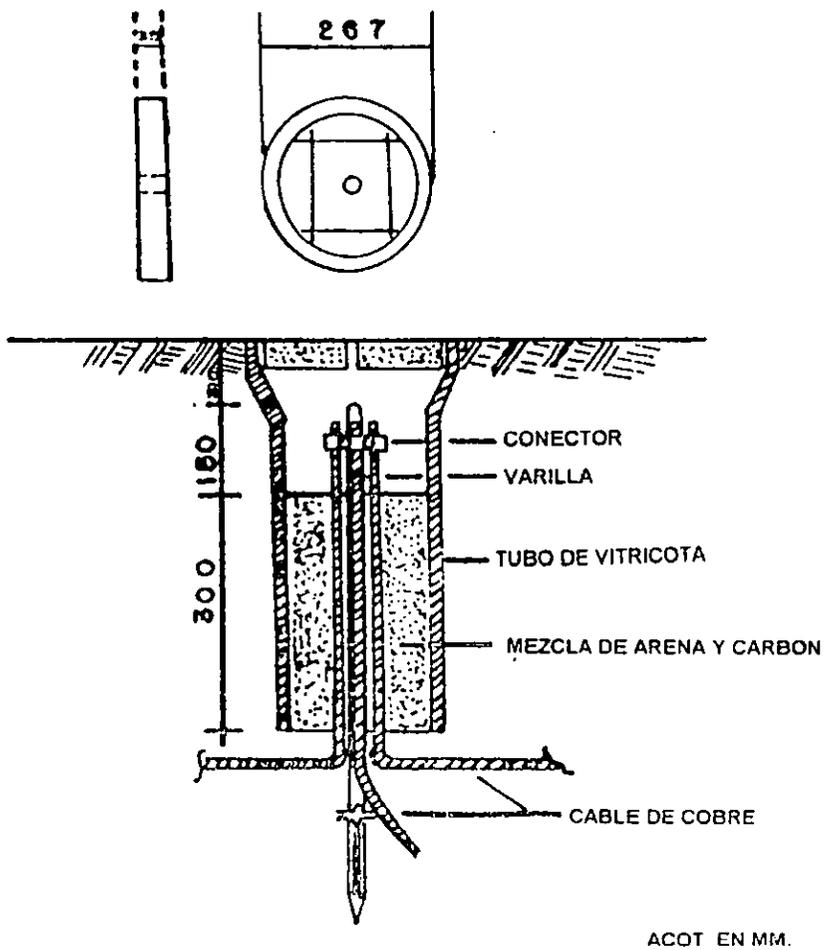


FIG. 22 DETALLE DE REGISTRO

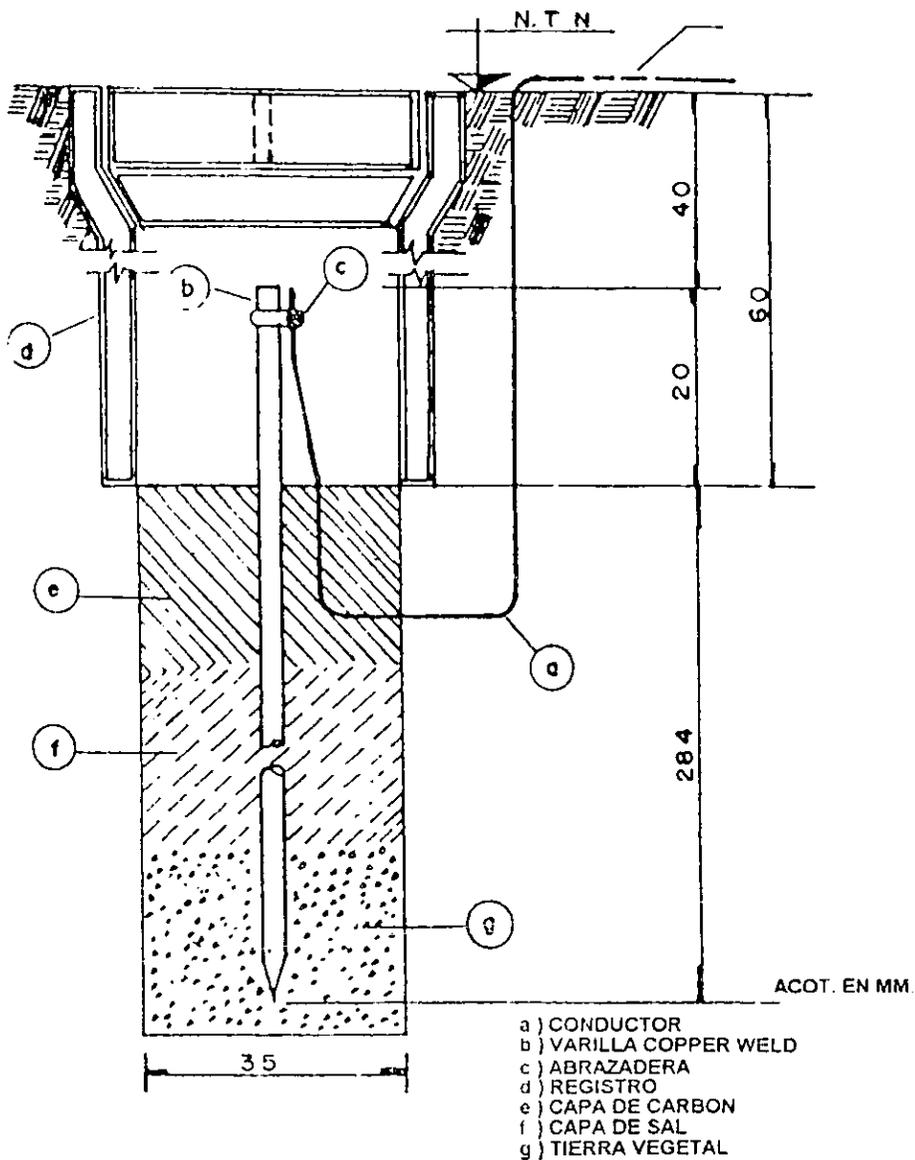


FIG. 23 REGISTRO DE TIERRAS

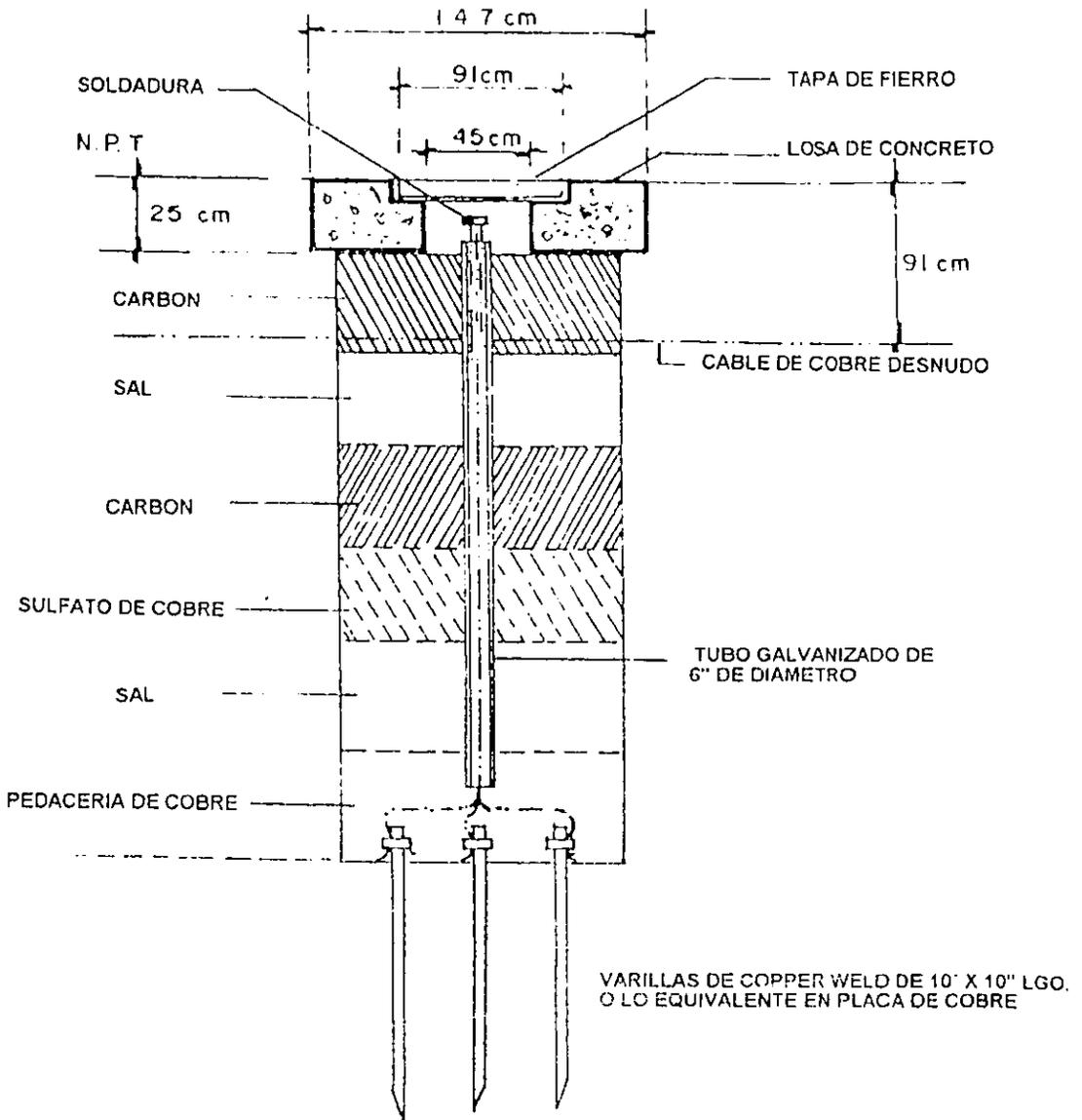


FIG. 24 DETALLE DE POZO DE TIERRAS

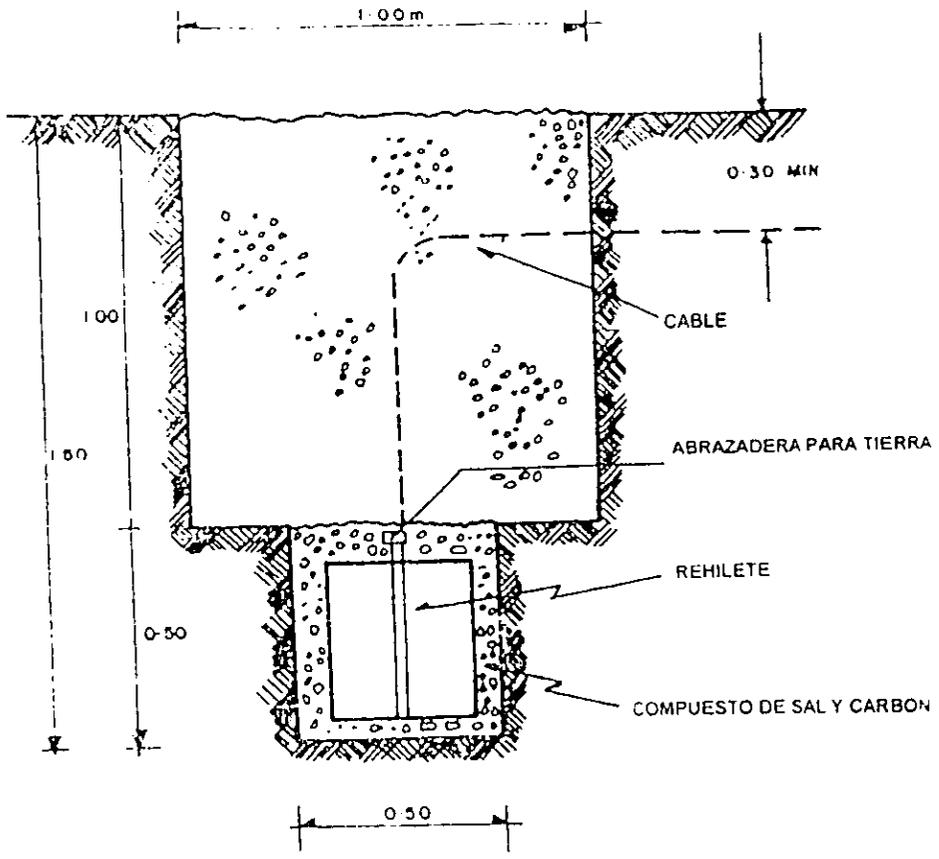


FIG. 25 DETALLE DE FOSA PARA REHILETE



DE LA ECUACION 2 SE OBSERVAN LOS SIGUIENTES VALORES:

165 MILIAMPERES PARA 1 SEGUNDO Y 520 MILIAMPERES PARA 0.1 SEGUNDOS, O SEA 6 CICLOS DE LA FRECUENCIA COMERCIAL DE 60 HERTZ.

COMO LA ECUACION FUE OBTENIDA CON DATOS BASADOS EN EXPERIMENTOS DE 3 SEGUNDOS DE DURACION MAXIMA, ESTA ECUACION NO ES VALIOSA PARA DURACIONES DE FALLAS MAYORES.

COMO SE PUEDE VER ÉL LIMITE DE LAS CORRIENTES PELIGROSAS AUMENTA SI LA DURACION DISMINUYE.

SEGUN SU FRECUENCIA.- EN ESTA TESIS, CONSIDERAMOS DATOS PARA DISEÑO PRINCIPALMENTE TOMADOS DE LAS FRECUENCIAS COMERCIALES DE 50 Y 60 HERTZ. AUNQUE MENCIONAREMOS QUE EL CUERPO HUMANO NO SOPORTA CORRIENTES MAYORES DE LOS 25 HERTZ.

#### -RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO

EN PRUEBAS HECHAS CON ELECTRICIDAD ESTATICA Y CON PERSONAS CON LAS MANOS MOJADAS Y LOS PIES SUMERGIDOS EN AGUA CON SAL ( PARA SIMULAR CONDICIONES DESFAVORABLES ): LOS VALORES OBTENIDOS USANDO 60 HERTZ, PARA HOMBRES FUERON 9 MILIAMPERES CON LOS VOLTAJES CORRESPONDIENTES DE 21 VOLTS MANO - MANO Y 10.2 VOLTS MANO - PIE, POR LO TANTO LA RESISTENCIA EN CORRIENTE ALTERNA MANO - MANO ES DE  $21 / 0.009 = 2333.33$  OHMS Y LA RESISTENCIA MANO - PIE  $10.2 / 0.009 = 1133.33$  OHMS.

DE ACUERDO A ESTAS DEDUCCIONES TOMAREMOS UN VALOR DE 1000 OHMS PARA LA RESISTENCIA DEL CUERPO, EL CUAL NOS DARA UN AMPLIO MARGEN DE SEGURIDAD BAJO CUALQUIER CIRCUNSTANCIA ORDINARIA

EFFECTOS SEGUN SU MAGNITUD.- SE INDICAN EN TABLA 1 Y GRAFICA 1 LA REACCION FISIOLÓGICA DE UN HOMBRE CON UNA CORRIENTE APLICADA EXTERNAMENTE DE UNO A OTRO EXTREMO DE LOS BRAZOS, PASANDO POR EL PECHO, EN CONTACTO EXTERNO POR LA PIEL, DURANTE UN SEGUNDO. ( LOS VALORES PARA LAS MUJERES SON 30 % MENORES )

DE LA GRAFICA OBSERVAMOS QUE UN MILIAMPERE ES LA MAGNITUD DE CORRIENTE MINIMA QUE SOPORTA EL CUERPO HUMANO SIN SUFRIR CONSECUENCIAS CORRIENTES DE 9 A 25 MILIAMPERES RESULTAN DOLOROSAS Y SE PIERDE EL CONTROL MUSCULAR HACIENDO DIFICIL O IMPOSIBLE LIBERARSE DEL OBJETO AGARRADO POR LA MANO

EL VALOR DE LA CORRIENTE QUE PRODUCE EFECTOS MORTALES HA SIDO DETERMINADO ENTRE 50 Y 500 MILIAMPERES

GRAFICA NUMERO 1 - EFECTOS DE LA CORRIENTE ELECTRICA EN EL CUERPO HUMANO

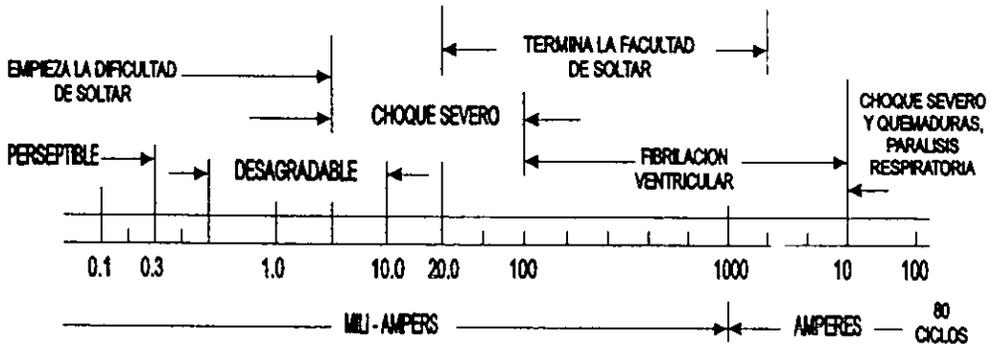
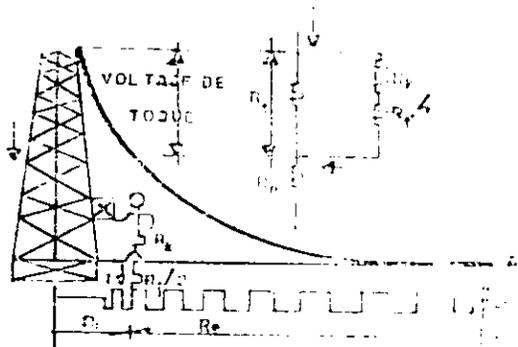
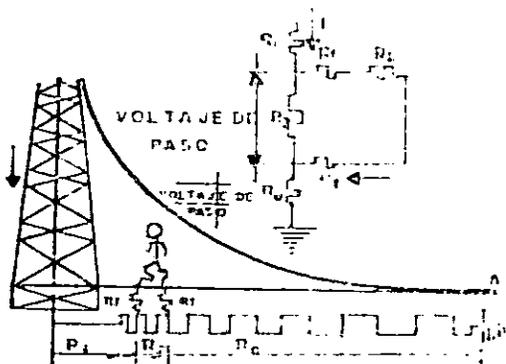


TABLA NUMERO 1 - EFECTOS DE LA CORRIENTE ELECTRICA EN EL CUERPO HUMANO

CORRIENTE QUE ATRAVIESA EL CUERPO HUMANO (mA.)	EFECTOS
HASTA 1	IMPERCEPTIBLE PARA EL HOMBRE
2 A 3	SENSACION DE HORMIGUEO.
3 A 10	EL SUJETO CONSIGUE GENERALMENTE, DESPRENDERSE DEL CONTACTO ( LIBERACION ) DE TODAS FORMAS LA CORRIENTE NO ES MORTAL.
10 A 50	LA CORRIENTE NO ES MORTAL SI SE APLICA DURANTE INTERVALOS DECRECIENTES A MEDIDA QUE AUMENTA SU INTENSIDAD. DE LO CONTRARIO, LOS MUSCULOS DE LA RESPIRACION SE VEN AFECTADOS POR CALAMBRES QUE PUEDEN PROVOCAR LA MUERTE POR ASFIXIA
50 A 500	CORRIENTE DECIDIDAMENTE PELIGROSA, EN FUNCION CRECIENTE LA DURACION DEL CONTACTO, QUE DA LUGAR A LA FIBRILACION CARDIACA ( FUNCIONAMIENTO IRREGULAR CON CONTRACCIONES MUY FRECUENTES E INEFICACES ) POSIBLE DEFUNCION DEL INFORTUNADO
MAS DE 500	DECRECE LA POSIBILIDAD DE FIBRILACION PERO AUMENTA EL RIESGO DE MUERTE POR PARALISIS DE LOS CENTROS NERVIOSOS O A CAUSA DE FENOMENOS SECUNDARIOS



**FIG. 26** POTENCIAL DE TOQUE CERCA DE UNA ESTRUCTURA ATERRIZADA



**FIG. 27** POTENCIAL DE PASO CERCA DE UNA ESTRUCTURA ATERRIZADA

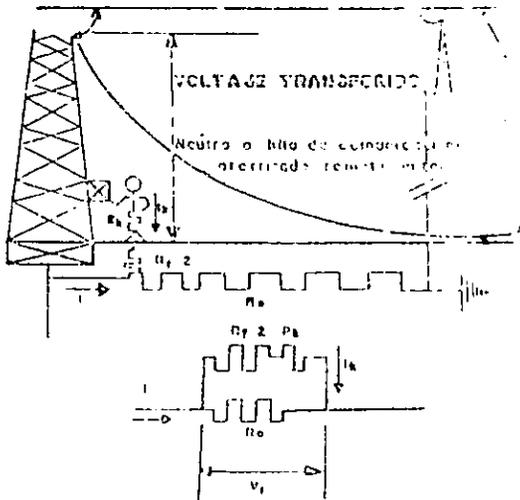


FIG. 28 EJEMPLO DE VOLTAJE TRANSFERIDO

SERIE ( PASO ) ES APROXIMADAMENTE 6ρ OHMS, Y LA RESISTENCIA DE LOS PIES EN PARALELO ( CONTACTO ) ES APROXIMADAMENTE DE 1.5ρ OHMS. DE LO ANTERIOR EXPUESTO, Y SUSTITUYENDO LA ECUACION 2 EN

$$R_f = 3\rho_s$$

$$E_c = R I$$

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

$$E_c = (1000 + 1.5 \rho_s) \frac{0.165}{1}$$

$$E_c = \frac{165 + 0.25 \rho_s}{1} \dots \dots \dots EC.3$$

SIMILARMENTE

$$E_p = (1000 + 6\rho_s) \frac{0.165}{1}$$

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

$$E_p = \frac{165 + \rho_s}{1} \dots \dots \dots EC.4$$

DONDE :

$E_c$  = TENSION DE CONTACTO

$E_p$  = TENSION DE PASO

$\rho_s$  = RESISTIVIDAD DEL SUELO

$I_k$  = CORRIENTE EN EL CUERPO HUMANO.

$R_f$  = RESISTENCIA DEL TERRENO EN FUNCION DE SU RESISTIVIDAD

## CAPITULO III

### NATURALEZA DEL TERRENO

#### -MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

SABEMOS QUE LA RESISTENCIA Y LA RESISTIVIDAD SON TERMINOS QUE DEFINEN DOS PROPIEDADES FISICAS DE TODOS LOS CUERPOS QUE EXISTEN EN LA NATURALEZA, SEAN O NO CONDUCTORES. ELECTRICAMENTE HABLANDO, NO ES POSIBLE AISLAR UN TERMINO DEL OTRO, YA QUE AMBOS SON IMPLICITOS Y COMPLEMENTARIOS. LA RESISTIVIDAD ( O RESISTENCIA ESPECIFICA ), ES LA MAGNITUD CARACTERISTICA DE TODA MATERIA QUE EXPRESA SU APTITUD PARA LA CONDUCCION DE CORRIENTES ELECTRICAS. REPRESENTA LA RESISTENCIA DE UNA MUESTRA DE LA MATERIA CONSIDERADA, CUYAS DIMENSIONES SON LA UNIDAD, POR EJEMPLO, UN CUBO DE UN METRO DE LADO, DICHO CUBO SE SITUA ENTRE DOS PLACAS Y SE MIDE SU RESISTENCIA QUE CONSECUENTEMENTE, SE EXPRESARA EN OHMIOS POR METRO ( $\Omega \cdot M$ ). EN OTRAS PALABRAS ES ÉL INDICE OHMICO CARACTERÍSTICO QUE TIENEN TODOS Y CADA UNO DE LOS CUERPOS, POR UNIDAD DE LONGITUD Y AREA. LA RESISTENCIA ES LA OPOSICION DIRECTA QUE OFRECEN LOS CUERPOS AL PASO DE LA CORRIENTE ELECTRICA A TRAVES DE ELLOS.

CONVIENE AFIRMAR QUE, LAS DOS PROPIEDADES AL SER FISICAS, SON AFECTADAS PROPORCIONALMENTE POR LA TEMPERATURA A LA QUE SE VEAN SOMETIDOS LOS CUERPOS EN CUESTION, EN ESTE CASO, EL TERRENO Y SU LOCALIZACION GEOGRAFICA, POR EJEMPLO, UN TERRENO A LA ALTURA DEL NIVEL DEL MAR DONDE LA TEMPERATURA ES ALTA, NO TENDRA LA MISMA RESISTIVIDAD QUE UNO LOCALIZADO A 2240 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO ES EL FACTOR BASICO QUE AFECTA LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE TIERRAS Y POR LO TANTO. VARIA EL TIPO DE SUELO DE QUE SE TRATE.

DEBIDO A LA GRAN RESISTIVIDAD DE LA TIERRA, TODAS LAS CORRIENTES QUE FLUYEN POR ELLA, PRODUCEN UNA CAIDA DE TENSION CONSIDERABLE Y POR LO TANTO SE HACE NECESARIO ROMPER CON EL CONCEPTO POPULAR DE QUE EL POTENCIAL DE LA TIERRA, ES SIEMPRE CERO. POR EL CONTRARIO, PUEDEN DESARROLLARSE EN SU SENO FUERTES INTENSIDADES DE CAMPO ELECTRICO O GRADIENTES DE POTENCIAL QUE AFECTAN A EXTENSAS REGIONES DEL TERRENO. ESTO SE ACENTUA EN VISTA DE QUE LA TIERRA NO ES HOMOGENEA Y SUFRE VARIACIONES ESTACIONALES CON LA LLUVIA, EL HIELO Y OTRAS CAUSAS, QUE DIFICULTAN LOS CALCULOS PRECISOS.

UNA MANERA PRACTICA DE OBTENER LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO ES MEDIANTE EL USO DE TABLAS QUE NOS PROPORCIONEN VALORES APROXIMADOS DE LA RESISTIVIDAD DE LOS DIVERSOS TIPOS DE SUELOS DONDE SE VAYA A REALIZAR UNA INSTALACION DE TIERRAS, PERO LO IDEAL, ES HACER UNA MEDICION FISICA EN EL TERRENO Y EN VARIOS PUNTOS DEL MISMO, MARCANDO LAS DIFERENCIAS IMPORTANTES EN LOCALIZACION SUPERFICIAL Y EN PROFUNDIDAD.

DENTRO DE LOS METODOS MÁS EMPLEADOS PARA MEDIR LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO, EL METODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS ES UNO DE LOS MÁS EFECTIVOS EN LA MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA; EL CUAL CONSISTE EN ENTERRAR ELECTRODOS COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA 29, ALIMENTADOS Y SEPARADOS A UNA DISTANCIA " D " UNO DE OTRO RESPECTIVAMENTE.

DE LA FIGURA 29, LOS ELECTRODOS C1 Y C2 SON LLAMADOS ELECTRODOS DE CORRIENTE DEBIDO A QUE POR ELLOS SE HACE CIRCULAR UNA CORRIENTE " I " A TIERRA. LOS ELECTRODOS P1 Y P2 COMUNMENTE SON LLAMADOS DE POTENCIAL.

DE MODO QUE PARA OBTENER LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN CONSIDERACION, SE MIDE EL VOLTAJE ENTRE LOS ELECTRODOS P1 Y P2, Y ES DEBIDO POR LA CORRIENTE QUE CIRCULA A TRAVES DE LOS ELECTRODOS C1 Y C2 OBTENIÉNDOSE LA SIGUIENTE EXPRESION:

$$\rho = \frac{4\pi DR}{1 + \frac{2D}{D^2 + 4h^2} - \frac{2D}{4D^2 + 4h^2}} = \frac{4\pi DR}{n} \dots \dots \dots EC.5$$

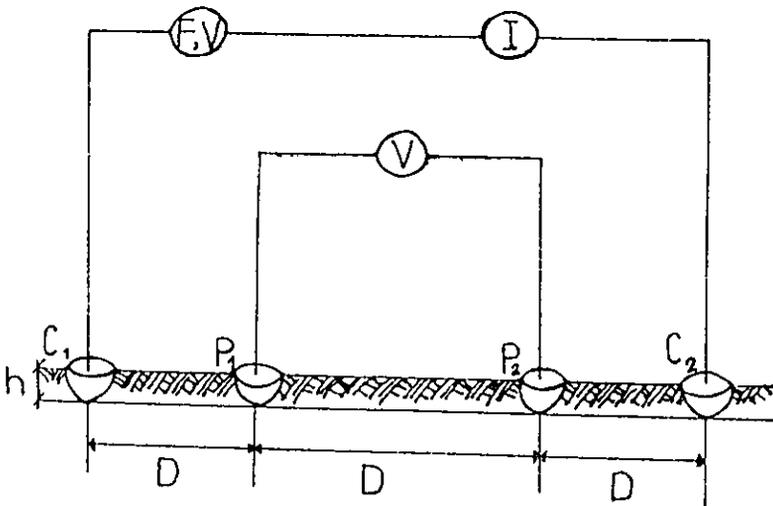


FIG. 29 METODO DE LOS 4 ELECTRODOS

DONDE :

$\rho$  = RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN OHMS - METRO

R = RESISTENCIA MEDIDA EN OHMS

D = DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS EN METROS

h = PROFUNDIDAD DE PENETRACION DE LOS ELECTRODOS

n = FACTOR APROXIMADO QUE TIENE UN VALOR ENTRE 1 Y 2

( DEPENDE DE LA RELACION  $\frac{h}{D}$  ; SI  $h = D$ ,  $n = 1.187$  ; SI  $h = 2D$ ,

$n = 1.03$  ; SI  $h = 4D$ ,  $n = 1.003$  ; ETC.)

DICHA EXPRESION PUEDE APROXIMARSE A :

$$\rho = 4\pi DR, \text{ SI } h \gg D$$

$$\rho = 2\pi DR, \text{ SI } h \ll D \dots\dots\dots EC.6$$

AL REALIZAR MEDICIONES CONJUNTAS EN UNA MISMA AREA DEBEN EMPLEARSE PARA DETERMINAR LA HOMOGENEIDAD DEL TERRENO; EN CASO DEL SUELO HOMOGENEO SE OBTENDRA:

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

$$R_1 = R_2 + R_3$$

PARA ESTA PRACTICA SE HAN CONSIDERADO ELECTRODOS DE FORMA SEMIESFERICA, PERO TAMBIEN SE PUEDEN USAR VARILLAS CORTAS OBTENIÉNDOSE EL MISMO RESULTADO.

SE RECOMIENDA QUE AL MEDIR LA RESISTIVIDAD Y LA RESISTENCIA DE UN TERRENO DEBE EVITARSE EL EMPLEO DE INSTRUMENTOS DE CORRIENTE CONTINUA, YA QUE LA CONDUCCION DE LA CORRIENTE EN LA TIERRA, VERIFICA UN PROCESO ANALOGO AL QUE OCURRE EN UN LIQUIDO. AL CIRCULAR CORRIENTE EN UN SOLO SENTIDO, SE ACUMULA GAS SOBRE UNO DE LOS ELECTRODOS, DEBIDO AL FENOMENO DE POLARIZACION, PRODUCIENDO, EN CONSECUENCIA, UN AUMENTO APARENTE DE LA RESISTIVIDAD DE AQUEL ELECTRODO. AL EMPLEAR CORRIENTE ALTERNA PARA ESTAS MEDIDAS SE ELIMINA POR COMPLETO DICHO EFECTO. EXISTEN APARATOS QUE

CONTIENEN EN SI MISMOS TODOS LOS DISPOSITIVOS NECESARIOS, INCLUIDA FUENTE DE TENSION ALTERNA, PARA LA MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DE UNA TOMA DE TIERRA. VER FIG. 30.

#### -FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTIVIDAD

LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO VARIA CONSIDERABLEMENTE SEGUN SU NATURALEZA. ESPECIALMENTE EN REGIONES EN QUE UNAS CAPAS DE TERRENO SE HAN SOBREPUESTO A OTRAS, PRESENTÁNDOSE EL FENOMENO DE ESTRATIFICACION. SE PUEDE ENCONTRAR CASI CUALQUIER TIPO DE COMBINACION DE ESTRATOS, TALES COMO CAPAS SUPERFICIALES DE BAJA RESISTIVIDAD QUE PUEDEN ESTAR SOBRE GRAVAS DE ALTA RESISTIVIDAD. ARCILLAS DE BAJO VALOR PUEDEN ESTAR DEBAJO DE ARENISCAS DE ALTO VALOR DE RESISTIVIDAD.

EN ALGUNOS LUGARES NO SOLO SE ENCUENTRAN VARIACIONES VERTICALES, SINO TAMBIEN HORIZONTALES, ESTO OCURRE EN TIERRAS QUE HAN SIDO EXPLANADAS O EN RELLENOS DE CONSTRUCCIONES.

NATURALMENTE, CUANDO MENOR ES LA RESISTIVIDAD, MEJOR RESULTA EL TERRENO PARA EL SISTEMA DE TIERRAS. POR ESTA RAZON, MUCHAS VECES, HAY QUE DESPLAZAR LAS TOMAS DE TIERRA HASTA ENCONTRAR TERRENO HUMEDO. SI RESULTA DIFICIL ENCONTRAR TERRENOS ADECUADOS EN LAS PROXIMIDADES DE LA LIMITACION, HABRA QUE EFECTUAR UN TRATAMIENTO QUIMICO DE CORRECCION DEL TERRENO, Y DE SER POSIBLE, SÉ DISPONDRA DE UNA CANALIZACION QUE PERMITA REGAR LAS TOMAS DE TIERRA EN LAS ESTACIONES CALUROSAS.

NORMALMENTE, EL HECHO DEL ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS DEL TERRENO Y LA COMPOSICION DEL SUELO HASTA UNA PROFUNDIDAD RAZONABLE, SE CONSIDERA EL SUELO TODO HOMOGENEO.

EFFECTO DE LA HUMEDAD.- COMO SE MUESTRA EN LA GRAFICA 2, LA RESISTIVIDAD EN MUCHOS TERRENOS SE PUEDE VER NOTABLEMENTE INFLUIDA POR SU CONTENIDO DE HUMEDAD. LO CUAL INDICA QUE LA MAYOR HUMEDAD DEL TERRENO HABRA UNA MENOR RESISTIVIDAD EN EL MISMO. LA RESISTIVIDAD EXPERIMENTA UN

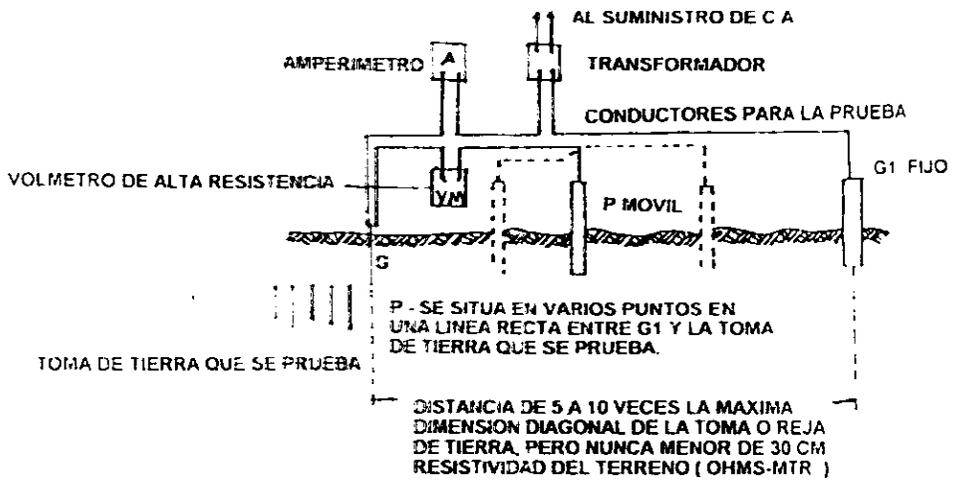
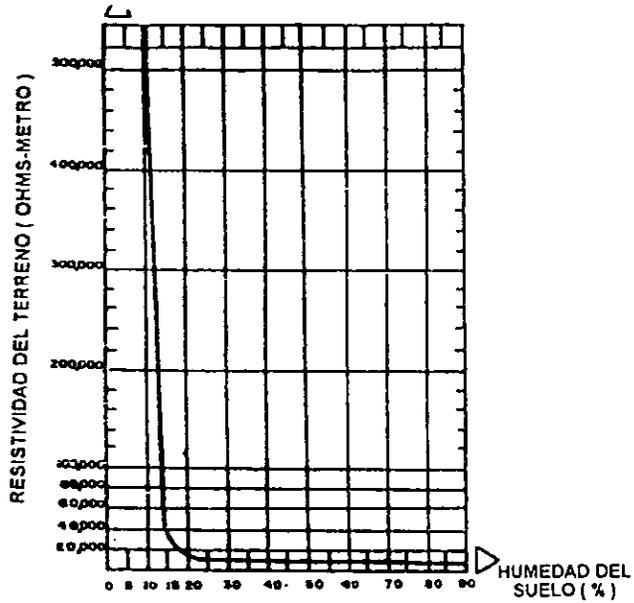
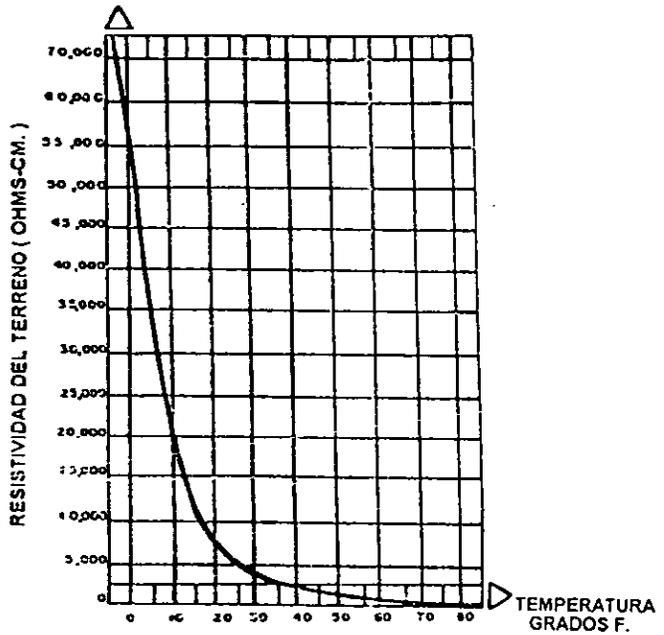


FIG. 30 METODO DE LA CAIDA DE TENSION



GRAFICA NUMERO 2.- VARIACION DE LA RESISTIVIDAD DE UN SUELO CON SU CONTENIDO DE HUMEDAD. ARCILLA ROJA



GRAFICA NUMERO 3.- VARIACION CON LA TEMPERATURA DE LA RESISTIVIDAD DE UN TERRENO. ARCILLA ROJA, 18% DE HUMEDAD

LIGERO AUMENTO AL DISMINUIR LA HUMEDAD EN UN 15%. POR DEBAJO DE ESTE VALOR, LA RESISTIVIDAD AUMENTA RAPIDAMENTE A MEDIDA QUE EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DISMINUYE.

EFFECTO DE LA TEMPERATURA.- SE PUEDE OBSERVAR EN LA GRAFICA 3, QUE LA RESISTIVIDAD AUMENTE LENTAMENTE A MEDIDA QUE LA TEMPERATURA DESCENDE HASTA 0 °C; POR DEBAJO DE ESTE PUNTO, LA RESISTIVIDAD CRECE RAPIDAMENTE AL DESCENDER A UN MÁS LA TEMPERATURA. ES POR ESTA RAZON QUE MUCHAS VECES SERA CONVENIENTE PROFUNDIZAR LAS TOMAS DE TIERRA HASTA ENCONTRAR CAPAS DE TERRENOS SITUADAS BAJO ZONA SUSCEPTIBLES DE CONGELACION EN LAS ESTACIONES FRIAS.

TRATAMIENTO DEL TERRENO.- LOS TERRENOS FORMADOS POR DEPOSITOS DE MATERIAS TRANSPORTADAS POR LOS RIOS DESBORDADOS, OFRECEN LAS MEJORES CONDICIONES PARA LA REALIZACION DE INSTALACIONES DE TIERRA DE MUY BAJA RESISTENCIA. SU " HUMUS " ( PARTE DEL TERRENO QUE CONTIENE DIVERSAS SUBSTANCIAS ORGANICAS EN DESCOMPOSICION ) ES, GENERALMENTE POCO PROFUNDO.

LAS ZONAS RICAS EN VEGETACION O QUE ACARREAN AGUAS PLUVIALES O RESIDUALES SON ASI MISMO APROPIADAS DADA LA ELEVADA HUMEDAD DEL TERRENO.

EXISTEN METODOS PARA REDUCIR LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO. POR EJEMPLO SE PUEDE RECURRIR A LAS SALES MINERALES ( CLORURO DE SODIO, SULFATO DE MAGNESIO, CLORURO DE CALCIO Y SULFATO DE COBRE ), DISUELTAS EN AGUA Y VERTIDAS SOBRE EL TERRENO O EN EL ELECTRODO SI ESTE ES TUBULAR. SIN EMBARGO, LOS RESULTADOS NO SIEMPRE SE CORRESPONDEN EN LO PREVISTO Y EN ALGUNOS CASOS SE PRODUCEN FENOMENOS DE CORRUSION. ES MUCHO MEJOR, SIEMPRE QUE ELLO SEA POSIBLE, HACER USO DE TERRENOS QUE TENGAN CONTENIDO ORGANICO.

SIGUIENDO CON LA IDEA DE MODIFICAR LA NATURALEZA QUIMICA DEL TERRENO, SE PUEDE RECURRIR A LA COLOCACION DE CAPAS DE CARBON (O GRAFITO EN POLVO), SITUADAS DIRECTAMENTE EN CONTACTO CON LOS ELECTRODOS. ESTE PROCEDIMIENTO, ES DE DIFICIL APLICACION CUANDO LOS ELECTRODOS TIENEN FORMA

DE PICA, PUEDE SER UTILIZADO CUANDO SE RECURRA A ELECTRODOS EN FORMA DE PLACA, ANILLO O MALLA.

EN LOS COMERCIOS SE PUEDE ADQUIRIR PRODUCTOS ESPECIALES PARA ROCIAR EL TERRENO INMEDIATO AL ELECTRODO. SE TRATA DE SOLUCIONES QUE ORIGINAN PRECIPITADOS INATACABLES POR LOS ACIDOS DEL TERRENO Y QUE DAN LUGAR A LA FORMACION DE MASAS GELATINOSAS QUE SE DERRAMAN PRODUCIENDO NUMEROSAS RAMIFICACIONES DE AGUA. DE ESTA FORMA, NO SOLO RESULTA AUMENTADA LA CONDUCTIVIDAD DEL TERRENO SINO TAMBIEN LA SUPERFICIE DE CONTACTO ENTRE EL ELECTRODO Y EL TERRENO. SIN EMBARGO, NO ESTA GARANTIZADA SU DURACION EN EL TIEMPO; POR OTRA PARTE, ALGUNAS DE ESTAS SOLUCIONES CONTIENEN PRODUCTOS TOXICOS CUYA MANIPULACION EXIGE CAUTEJA.

DENTRO DE ESTOS TRATAMIENTOS, EL MAS UTILIZADO, ES EL TRATAMIENTO DE SAL COMUN, LA CUAL ACTUA SOBRE EL AGUA HACIÉNDOLA MEJOR CONDUCTORA, Y ADEMAS, A CAUSA DE SER UNA SUBSTANCIA HIGROSCOPICA, LA SAL RETIENE LA HUMEDAD DEL TERRENO.

EL TRATAMIENTO DEBERA RENOVARSE PERIODICAMENTE DEPENDIENDO DE LA NATURALEZA, EL TRATAMIENTO QUIMICO Y DE LAS CARACTERISTICAS DEL TERRENO.

#### -VALORES PRACTICOS DE LA RESISTIVIDAD

CON EL PROPOSITO DE DAR UNA IDEA DE LOS VALORES DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO SE DAN LOS SIGUIENTES VALORES APROXIMADOS EN LAS SIGUIENTES TABLAS.

TABLA NUMERO 2. - RESISTIVIDAD PROMEDIO DE LA TIERRA

TERRENO	RESISTIVIDAD EN OHMS-CM.		
	PROMEDIO	MINIMO	MAXIMO
RELLENOS ( CENIZAS, ESCORIAS, DESECHOS SALINOS )	2370	590	7000
ARCILLAS, EXQUISITOS SUELOS ARCILLOSOS, MARGAS.	4060	340	16300
MISMOS CON ARENA Y GRAVA	15800	1020	135000
GRAVAS, ARENAS, PIEDRAS CON CONTENIDOS DE DESECHOS	94000	59000	458000

TABLA NUMERO 3. - RESISTIVIDAD APROXIMADA DE LA TIERRA

TERRENO	RESISTIVIDAD EN OHMS-CENTIMETRO
HUMEDO O SUELO ORGANICO	10 - 50
DE CULTIVO ARCILLOSO	1000
TIERRA ARENOSA HUMEDA	3000
TIERRA ARENOSA SECA	1000
TIERRA CON GUIJARROS Y CEMENTO	1000
SUELO ROCOSO	3000
ROCA COMPACTA	1000

TABLA NUMERO 4. - EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA

TEMPERATURA EN GRADOS CENTIGRADOS	RESISTIVIDAD EN OHMS-CENTIMETROS
20	7200
10	9900
0 ( AGUA )	13800
0 ( HIELO )	30000
- 5	79000
-15	330000

TABLA NUMERO 5. - EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA

CONTENIDO DE HUMEDAD EN % DE PESO	RESISTIVIDAD EN OHMS-CM SUELO SUPERFICIAL	ARENA MOLDEABLE
0.0	1000000000	1000000000
2.5	250000	150000
5.0	165000	43000
10.0	5300	18500
15.0	1000	10500
20.0	2000	6300
30.0	6400	4200

-DETERMINACION DE LA MAXIMA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA

GENERALMENTE LOS ESTUDIOS QUE SE REALIZAN DE CORTO CIRCUITO SE REFIEREN A FALLAS OCASIONADAS DE LINEA A TIERRA O FALLAS TRIFASICAS, ESTO SE REFIERE A QUE LA PRIMERA TIENE MAYOR PROBABILIDAD DE OCURRENCIA Y LA SEGUNDA ES LA QUE SE PUEDE SOMETER A LOS EQUIPOS, MAQUINAS Y APARATOS AL ESFUERZO SEVERO DESDE EL PUNTO DE VISTA TERMICO Y DINAMICO.

SIN EMBARGO, POR LOS FINES DE ESTA TESIS, SE ANALIZARA UNICAMENTE LA FALLA DE LINEA A TIERRA DEBIDO A LA RAZON ANTES MENCIONADA.

EL METODO EMPLEADO PARA HACER UN ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO, EN PARTICULAR DEPENDE DE VARIOS FACTORES TALES COMO:

- TAMAÑO DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO.
- PRECISION DE LOS DATOS BUSCADOS.
- APLICACION DE LOS DATOS OBTENIDOS.

LOS METODOS MÁS USUALES PARA HACER UN ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO SON:

- 1) METODO DE LOS COMPONENTES SIMETRICOS.
- 2) METODO DEL BUS INFINITO.
- 3) METODO DE LAS POTENCIAS O DE LOS MVA.

DE ESTOS TRES METODOS SE PUEDE CONSIDERAR COMO INADECUADO EL METODO DEL BUS INFINITO, YA QUE SOLO ANALIZA UNA FALLA TRIFASICA ( DIAGRAMA DE SECUENCIA POSITIVA ). ENTONCES, SE PUEDE DISPONER DE LOS METODOS DE COMPONENTES SIMETRICOS Y DE LOS MVA. SE RECOMIENDA EL PRIMERO PARA SISTEMAS INDUSTRIALES DE CAPACIDAD CONSIDERABLE DONDE LA PRECISION DE LOS DATOS BUSCADOS ES UN FACTOR MUY IMPORTANTE, Y EL DE LOS MVA PARA SISTEMAS DE CAPACIDAD MEDIANA Y PEQUEÑA.

DEBEMOS HACER NOTAR QUE LOS SISTEMAS PORCENTUAL, OHMICO O POR UNIDAD NO SON METODOS DE CALCULO, SINO FORMAS DE REPRESENTAR LAS IMPEDANCIAS DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA.

EL SISTEMA OHMICO GENERALMENTE NO SE USA DEBIDO A LA DIFICULTAD DE CONVERTIR OHMS DE UNA TENSION A OTRA SIN ERROR Y PORQUE TODOS LOS PEQUEÑOS NUMEROS QUE HACEN DIFICIL UN CALCULO RAPIDO Y PRECISO. DEBIDO A ESTO, SON MÁS USUALES LOS SISTEMAS PORCENTUAL Y POR UNIDAD. NOSOTROS PARA NUESTRO EJEMPLO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONEXION A TIERRA UTILIZAREMOS EL SISTEMA POR UNIDAD DEBIDO A LAS VENTAJAS QUE SE TIENEN SOBRE EL SISTEMA PORCENTUAL.

UN SISTEMA POR UNIDAD ES UN MEDIO DE EXPRESAR AL NUMERO PARA FACILITAR SU COMPARACION CON OTROS. UN VALOR POR UNIDAD ES UNA RELACION:

POR UNIDAD = UN NUMERO / NUMERO BASE

LAS VENTAJAS QUE PRESENTA EL SISTEMA POR UNIDAD SOBRE EL SISTEMA PORCENTUAL SON LAS SIGUIENTES:

- 1) SE CONSIDERA QUE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA PUEDEN VARIAR EN TAMAÑO, TIENEN CAIDAS DE TENSION Y EXISTEN PERDIDAS DE POTENCIAL. TODAS ESTAS VARIACIONES SE PUEDEN REPRESENTAR FACILMENTE BAJO EL SISTEMA POR UNIDAD.
- 2) AL USAR EL FACTOR  $\sqrt{3}$  EN EL CALCULO DE SISTEMAS TRIFASICOS Y EMPLEANDO VALORES EN POR UNIDAD SE REDUCE CONSIDERABLEMENTE EL CALCULO.
- 3) GENERALMENTE EN TODOS LOS SISTEMAS ELECTRICOS SE TIENEN DIFERENTES NIVELES DE TENSION Y DE POTENCIA; Y ADEMAS, DIFERENTES IMPEDANCIAS Y REACTANCIAS. PARA TRATAR DE UNIFORMIZAR TODOS ESTOS VALORES, SE PUEDE EMPLEAR EL SISTEMA DE POR UNIDAD REDUCIENDO DE ESTA MANERA EL TRABAJO.
- 4) CUANDO SE ANALIZAN SISTEMAS DE POTENCIA INTERCONECTADOS EL ANALISIS DE LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO SE DIFICULTA MANUALMENTE. ES NECESARIO, INTRODUCIR HERRAMIENTAS AUXILIARES COMO LA COMPUTADORA. POR EL METODO POR UNIDAD FACILITA LA INTRODUCCION DE DATOS AL PROGRAMA.

COMO NO ES EL PROPOSITO DE ESTA TESIS PROFUNDIZAR EN EL ANALISIS DE LOS DIFERENTES METODOS QUE SE APLICAN PARA LA OBTENCION DE LA MAXIMA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA; MENCIONAMOS A CONTINUACION UNO DE LOS

METODOS CONVENCIONALES ( METODO DE LOS COMPONENTES SIMETRICOS ) DEL CUAL EL INGENIERO PROYECTISTA PODRA ECHAR MANO, PARA DETERMINAR LA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA.

$$I_f = \frac{3E}{3R + 3R_f - (R_1 + R_2 + R_0) + (X_1 + X_2 + X_0)} \dots EC.7$$

EN LA MAYORIA DE LOS CASOS, LOS VALORES DE LA RESISTENCIA, RESULTAN INSIGNIFICANTES, POR LO QUE LA ECUACION ANTERIOR SE PUEDE REDUCIR COMO SIGUE:

$$I_f = \frac{3E}{X_1 + X_2 - X_0} \text{ AMPERES} \dots EC.8$$

DONDE :

$I_f$  = VALOR DE LA CORRIENTE SIMETRICA DE FALLA A TIERRA AL INSTANTE DEL INICIO DE LA FALLA ( AMPERES ).

E = VOLTAJE FASE - NEUTRO ( VOLTS ).

R = RESISTENCIA ESTIMADA A TIERRA DEL SISTEMA LOCAL DE TIERRAS (  $\Omega$  ).

$R_f$  = RESISTENCIA MINIMA ESTIMADA DE LA FALLA MISMA (  $\Omega$  ).

$R_1$  = RESISTENCIA DE SECUENCIA POSITIVA (  $\Omega$  - FASE ).

$R_2$  = RESISTENCIA DE SECUENCIA NEGATIVA (  $\Omega$  - FASE ).

$R_0$  = RESISTENCIA DE SECUENCIA CERO (  $\Omega$  - FASE ).

$X_1$  = REACTANCIA DE SECUENCIA POSITIVA (  $\Omega$  - FASE ).

$X_2$  = REACTANCIA DE SECUENCIA NEGATIVA (  $\Omega$  - FASE ).

$X_0$  = REACTANCIA DE SECUENCIA CERO (  $\Omega$  - FASE )

SE RECOMIENDA AGREGAR A EL SISTEMA ELECTRICO EN CUESTION NUEVAS CARGAS Y CAPACIDADES, YA QUE SI NO SE TOMA UNA PROVIDENCIA EL SISTEMA PUEDE DEJAR DE SER SEGURO, Y ADEMAS, CUALQUIER MODIFICACION POSTERIOR PUEDE RESULTAR MUY COSTOSA. ES POR ESTA RAZON QUE SE ACONSEJA APLICAR UN AUMENTO DE CARGA PARA EL SISTEMA QUE SÉ ESTA DISEÑANDO.

-FACTOR DE DECREMENTO

EN GENERAL, LOS CORTOS CIRCUITOS COINCIDEN CASUALMENTE CON LA ONDA DE TENSION. POR OTRA PARTE, EL CHOQUE DE CONTACTO PUEDE EXISTIR EN EL MOMENTO EN EL QUE LA FALLA SE INICIA. POR LO TANTO, EN LAS MÁS SEVERAS CONDICIONES SE DEBE ASUMIR UN 100% DE COMPENSACION POR ONDA ASIMETRICA DE CORRIENTE DE FALLA A TIERRA, POR LA DURACION DEL CHOQUE. YA QUE LOS DATOS EXPERIMENTALES EN EL UMBRAL DE LA FIBRILACION ESTAN BASADOS EN ONDAS SENOIDALES SIMETRICAS DE AMPLITUD CONSTANTE, ES NECESARIO PARA DETERMINAR UN VALOR EFICAZ ( RMS ) DE UNA ONDA DE CORRIENTE SENOIDAL SIMPLE " I ", QUE ES EQUIVALENTE A LA MÁS COMPLEJA ONDA DE CORRIENTE DE FALLA ASIMETRICA.

ESTE VALOR " I " PUEDE SER DETERMINADO COMO SIGUE:

$$I = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i_f^2 dt_1} = \text{Del}'' \dots \dots \dots \text{EC} 9$$

$$De = \frac{1}{I''} \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i_f^2 dt_1} \dots \dots \dots \text{EC} 10$$

DONDE

- I = VALOR COMPUESTO EFICAZ DE LA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA, EN AMPERES SIMETRICOS, PARA APLICACION DE CALCULOS
- t = TIEMPO DE DURACION DE LA FALLA ( Y, POR LO TANTO, DEL CHOQUE EN SEGUNDOS. ).
- t<sub>1</sub> = TIEMPO TRANSCURRIDO APARTIR DE LA DURACION DE LA FALLA EN SEGUNDOS.
- i<sub>f</sub> = VALOR EFICAZ DE LA CORRIENTE DE FALIA A TIERRA, AL TIEMPO " t " SEGUNDOS DESPUES DE LA INICIACION DE LA FALLA.
- De = FACTOR DE MULTIPLICACION, EN LO POSTERIOR FACTOR DE DECREMENTO, PARA CONSIDERAR EL DEFASAMIENTO POR EFECTO DE LA CORRIENTE DIRECTA Y LA ATENUACION DE CORRIENTE ALTERNA Y LAS COMPONENTES TRANSITORIAS POR CORRIENTE DIRECTA DE LA CORRIENTE DE FALLA.

EL VALOR INTEGRAL ANTERIOR DEPENDE DEL VALOR DE ATENUACION POR AMBAS CORRIENTES DE C.A. Y C.D., Y LA SOLUCION COMPLETA ES VERDADERAMENTE COMPLEJA.

LA SOLUCION AL PROBLEMA ANTERIOR FUE DADO A CONOCER POR LAS NORMAS AMERICAN STANDARD C37.5. LAS CUALES ESTABLECIERON UN METODO SIMPLIFICADO PARA DETERMINAR EL VALOR EFICAZ ( RMS ) DE CORRIENTE, PARA TIEMPOS DESPUES DE INICIADA LA FALLA, USANDO MULTIPLICADORES. POR EJEMPLO, EL MULTIPLICADOR DE AMERICAN STANDARD PARA EL FINAL DE LA PRIMERA MEDIA ONDA ( PRIMER MEDIO CICLO ) ES 1.6 Y ASI SUCESIVAMENTE. 1.4, 1.2, 1.1, 1.0, PARA TIEMPOS DE 1, 2, 3 Y 4 CICLOS RESPECTIVAMENTE

IGUALMENTE SE APLICA UNA SOLUCION SIMILAR PARA LA ECUACION DE FACTOR DE DECREMENTO. TENDRIAMOS LOS FACTORES DE DECREMENTO DADOS EN LA SIGUIENTE TABLA:

TABLA NUMERO 6.- FACTORES DE DECREMENTO

DURACION DEL CHOQUE Y DE LA FALLA ( SEG. )	CICLOS ( 60 HZ. C.A. )	FACTOR DE DECREMENTO D
0.008	½	1.65
0.1	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 O MÁS	30 O MÁS	1.00

PARA VALORES INTERMEDIOS DE DURACION DE LA FALLA, LOS FACTORES DE DECREMENTO SE PUEDEN OBTENER POR INTERPOLACION.

SÉ DEBERA TENER PRESENTE QUE LA CORRIENTE DE FALLA EN EL SECUNDARIO DE UN TRANSFORMADOR PUEDE SER MAYOR QUE LA CORRIENTE DE FALLA EN EL PRIMARIO. EN TAL CASO SÉ DEBERA OPTAR LA DE MAYOR VALOR PARA EFECTOS DE CALCULO.

#### -EFECTOS DE CAMBIOS FUTUROS

ES COMUN AGREGAR A CUALQUIER SISTEMA NUEVAS CARGAS Y CAPACIDADES, Y SI NO SE TOMAN LAS PROVIDENCIAS NECESARIAS PERTINENTES PARA EL DISEÑO, UN

SISTEMA PUEDE DEJAR DE SER SEGURO, ADEMAS CUALQUIER MODIFICACION POSTERIOR PUEDE RESULTAR MUY CARA, POR LO TANTO, SE RECOMIENDA ESTUDIAR ESTA POSIBILIDAD Y PREVER UN AUMENTO DE CARGAS PARA UN SISTEMA QUE SE ESTE DISEÑANDO, ASI MISMO TOMAR EN CONSIDERACION ESTE AUMENTO AL INICIO DE LA OPERACION DEL SISTEMA, PUESTO QUE LA IMPEDANCIA PUEDE REDUCIRSE.

**-COMO LIMITAR LA CORRIENTE DE FALLA**

- 1.- INSTALACION DE TRANSFORMADORES EN PARALELO, EL ARREGLO ES MÁS COSTOSO, AUNQUE SE OBTIENE MAYOR FLEXIBILIDAD EN ÉL SISTEMA.
2. - AUMENTAR LA TENSION DE DISTRIBUCION.
3. - SELECCIÓN DE TRANSFORMADORES CON ALTA IMPEDANCIA.
4. - INSTALACION DE REACTORES EN LOS TABLEROS DE DISTRIBUCION. PERO NO EN LOS TRANSFORMADORES. LA DESVENTAJA DE ESTE METODO ES EL ALTO COSTO DE ESTE TIPO DE EQUIPO.

**-RESISTENCIA DE TIERRA**

LA RESISTENCIA IDEAL DE LAS TOMAS DE TIERRA ES CERO SIENDO ASI, LAS CORRIENTES QUE CIRCULAN POR ELLAS NO PRODUCEN AUMENTO DE TENSION ENTRE EL PUNTO DE LA TOMA Y OTROS PUNTOS DE LA TIERRA DISTANTES DE ÉL. PERO DE ANTEMANO SABEMOS QUE ES IMPOSIBLE HACER UNA TOMA DE TIERRA CERO, NI AUN DISPONIENDO DE GRANDES RECURSOS ECONOMICOS Y DE TRABAJO.

AUNQUE ES DIFICIL SABER CUAL ES LA RESISTENCIA ADECUADA DE UNA TOMA DE TIERRA SE RECOMIENDA SIEMPRE UN VALOR PEQUEÑO.

DEBIDO A LA RESISTENCIA DE TIERRA, LA CORRIENTE QUE CIRCULA POR ELLA DA LUGAR A UN AUMENTO DE TENSION EN EL EQUIPO CONECTADO A LA TOMA, EN RELACION CON LOS PUNTOS DISTANTES, Y A GRADIENTES DE POTENCIAL ELECTRICO EN SENTIDO HORIZONTAL SOBRE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA, ESPECIALMENTE EN

LAS CERCANIAS DEL SISTEMA DE TIERRAS. AMBAS CIRCUNSTANCIAS REPRESENTAN UN PELIGRO DE CHOQUE ELECTRICO PARA EL PERSONAL Y DE DAÑO EN EL AISLAMIENTO DEL EQUIPO. ESTOS PELIGROS SON MENORES SI SE REDUCE LA RESISTENCIA DE LAS TOMAS, LO CUAL, ES IMPOSIBLE DE ELIMINAR POR COMPLETO.

EN LA GRAN MAYORIA DE LOS CASOS, ES SUFICIENTE CON ENCONTRAR LA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA, CON LOS VALORES DE LAS REACTANCIAS, DESECHAMOS LA RESISTENCIA DEL SISTEMA, LA RESISTENCIA DEL TERRENO Y LA RESISTENCIA DE FALLA. EL ERROR ASI PROVOCADO ES PEQUEÑO Y SIEMPRE DENTRO DE LOS MARGENES DE SEGURIDAD.

CUANDO LA RESISTENCIA ES MAYOR EN RELACION CON LA REACTANCIA, ENTONCES DEBE TOMARSE EN CUENTA Y UTILIZAR LA ECUACION NUMERO 7.

PARA EFECTOS PRACTICOS, LA RESISTENCIA DEL TERRENO REQUERIDA PARA LA RED DE TIERRAS DE UNA SUBESTACION, UNA VEZ QUE LA RESISTIVIDAD A SIDO DETERMINADA, DEPENDE DEL TERRENO Y DEL ÁREA QUE VA A SER OCUPADA POR LA RED, Y SE CALCULA MEDIANTE LA SIGUIENTE ECUACION:

$$R_t = \frac{\rho}{4r} \dots \dots \dots EC 11$$

DONDE :

- $R_t$  = RESISTENCIA DEL TERRENO EN OHMS
- $\rho$  = RESISTENCIA PROMEDIO DEL TERRENO EN OHMS - METRO.
- $r$  = RADIO EQUIVALENTE EN METROS, DE UN CIRCULO QUE CUBRE LA MISMA AREA QUE LA OCUPADA POR LA RED.

DADO QUE EL AREA DEL CIRCULO ES:

$$A = \pi (r^2)$$

DESPEJANDO  $r$  TENEMOS

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

DONDE :

$$r = 0.564 \sqrt{A}$$

SUSTITUYENDO ESTE ULTIMO VALOR EN LA ECUACION 11 TENEMOS:

$$R_t = \frac{\rho}{4(0.564)^2 \sqrt{A}} \dots\dots\dots EC.12$$

**-GRADIENTE DE POTENCIAL**

CUANDO UN DISPERSOR DE TIERRA CONDUCE UNA CORRIENTE ELECTRICA SE ESTABLECE ENTORNO AL MISMO UNA ZONA DE POTENCIAL NO NULA, LLAMADA ZONA DE INFLUENCIA. LA FORMA DE ESTA ZONA DE INFLUENCIA DEPENDERA DE LA FORMA DEL ELECTRODO, Y SU EXTENSION CORRESPONDERA A LA CORRIENTE QUE CONDUCE EL DISPERSOR Y A LA RESISTENCIA DEL TERRENO.

SUPONIENDO QUE UNIERAMOS ENTRE SI TODOS LOS PUNTOS QUE DURANTE EL FUNCIONAMIENTO DEL DISPERSOR SE ENCUENTRAN AL MISMO POTENCIAL OBTENDRIAMOS SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES, COMO LO MUESTRA LA FIGURA 31.

LA ZONA DE INFLUENCIA DEL DISPERSOR QUEDARA DEFINIDA POR LOS PUNTOS EN LOS QUE YA NO RESULTA PRÁCTICAMENTE MEDIBLE UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL CON EL TERRENO CIRCUNDANTE.

EL AREA DE SUPERFICIE DEL TERRENO COMPRENDIDA DENTRO DE LA ZONA DE INFLUENCIA ( VER FIGURA 32 ), ASUME UNA IMPORTANCIA PRACTICA ENORME, YA QUE DURANTE EL FUNCIONAMIENTO DEL DISPERSOR DENTRO DEL AREA DE INFLUENCIA SE PUEDEN MANIFESTAR, COMO VEREMOS A CONTINUACION, PELIGROSO PARA LA SEGURIDAD DE LAS PERSONAS.

COMO YA DIJIMOS EL POTENCIAL ELECTRICO SE DISTRIBUYE EN EL TERRENO QUE CIRCUNDA UN DISPERSOR DE TIERRA SIGUIENDO UN ORDEN QUE DEPENDE LA NATURALEZA DEL TERRENO Y DE LA FORMA DEL ELECTRODO, TODO EL TERRENO QUE

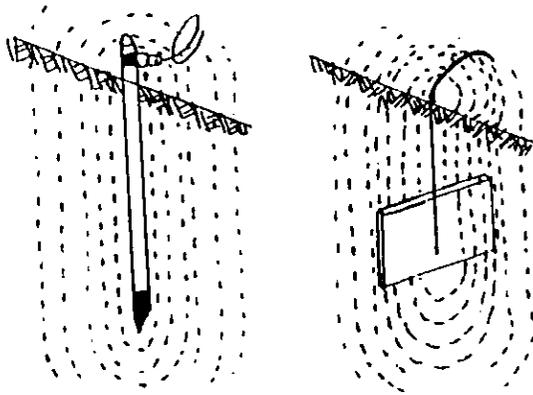


FIG. 31 SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

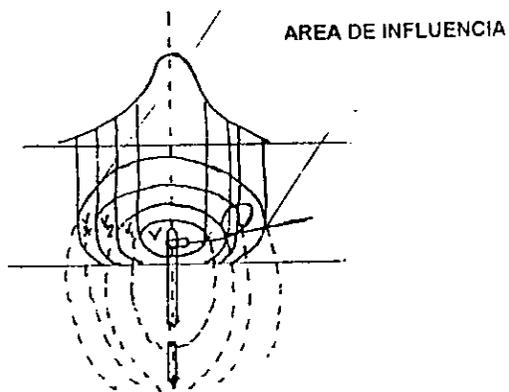


FIG. 32 ZONA DE INFLUENCIA

CIRCUNDA AL ELECTRODO SERA PUES, ASIENDO DE UN CAMPO ELECTRICO CUYA INTENSIDAD QUEDARA MEDIDA EN CADA PUNTO DEL GRADIENTE DE POTENCIAL. SE DEFINE CON ESTE TERMINO A LA RELACION ENTRE UNA VARIACION DE TENSION Y LA CORRESPONDIENTE VARIACION DE DISTANCIA, PARA VARIACIONES TENDIENDO A CERO.

EVIDENTEMENTE EL GRADIENTE DE POTENCIAL DE UN DETERMINADO TIPO DE ELECTRODO Y EN CORRESPONDENCIA A UNA DETERMINADA CORRIENTE DISPERSA HACIA TIERRA SERA TANTO MAYOR CUANDO MÁS BAJA SEA LA CONDUCTIVIDAD DEL TERRENO QUE RODEA AL ELECTRODO. POR EL CONTRARIO EN UN TERRENO DETERMINADO Y PARA UN ELECTRODO EN PARTICULAR, EL GRADIENTE DE POTENCIAL SERA TANTO MAS ELEVADO CUANTO MAYOR SEA LA CORRIENTE CONDUcida A TIERRA. POR LO TANTO, Y TOMANDO EN CONSIDERACION LO ANTES MENCIONADO LA CORRIENTE " I " DISPERSA POR MEDIO DEL CONDUCTOR NO ES UNIFORME PARA TODA LA MALLA; ESTA AUMENTA LLEGANDO A VALORES DE 2 O 3 VECES SUPERIORES, APARTANDOCE DEL CENTRO CONTRA LA PERIFERIA Y AUMENTANDO ENTONCES LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO. TAL HECHO DEBERA TENERSE EN CUENTA CON LA RELACION A LAS MEDIDAS QUE SE DEBEN ADOPTAR PARA ELIMINACION DE GRADIENTES DE POTENCIAL PELIGROSOS EN LA PERIFERIA DE LA RED.

EL GRADIENTE EN LA SUPERFICIE Y LA PERIFERIA DE LA MALLA, ESTA DETERMINADO POR LA SIGUIENTE ECUACION

$$G_p = \frac{4I_f \rho}{D^2} \text{ VOLTS / METRO..... EC.13}$$

DONDE :

$G_p$  = GRADIENTE DE POTENCIAL.

$I_f$  = CORRIENTE DE FALLA A TIERRA.

$\rho$  = RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

$D$  = DIAGONAL DE LA SUPERFICIE OCUPADA POR LA MALLA EN METROS.

PARA DISMINUIR EL RIESGO DERIVADO POR EVENTUALES GRADIENTES PELIGROSOS SE RECOMIENDAN ALGUNAS SOLUCIONES TALES COMO:

- 1) AUMENTAR LA RESISTENCIA SUPERFICIAL DEL TERRENO AGREGANDO PIEDRA DE ROCA SOBRE LA SUPERFICIE DE LA MALLA ANTES DEL PISO COLADO.
- 2) AUMENTAR EL AREA DE CONTACTO DEL COBRE DE LA MALLA CON ÉL SUELO SIEMPRE QUE EL TERRENO LO PERMITA.
- 3) LIMITAR LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO A TIERRA MEDIANTE ELEMENTOS LIMITADORES DE CORRIENTE COMO ES EL CASO DE LOS REACTORES O DE LA RESISTENCIA DISEÑADA PARA ESTE FIN.

## CAPITULO IV

### CONEXIÓN A TIERRA DE EQUIPO Y ANALISIS PARA UN SISTEMA DE TIERRAS

-EQUIPOS QUE DEBEN SER CONECTADOS A TIERRA

EN UNA PLANTA INDUSTRIAL CARACTERÍSTICAMENTE REPRESENTATIVA SE  
INCLUYE LA CONEXIÓN A TIERRA DEL SIGUIENTE EQUIPO:

ESTRUCTURA.

SUBESTACIONES TIPO INTEMPERIE.

CUARTOS GRANDES PARA LA INSTALACIÓN DE GENERADORES Y

MOTORES.

DUCTOS PARA ALAMBRES O CABLES CONDUCTORES.

MOTORES DIVERSOS Y EQUIPO PORTÁTIL.

-CONEXIÓN A TIERRA DE ESTRUCTURAS

TODOS LOS MIEMBROS ESTRUCTURALES DE METAL TIENEN QUE CONECTARSE  
CON UNA BARRA O CABLE COLECTOR UNIDO A TIERRA QUE PUEDA SERVIR TAMBIÉN  
PARA LA CONEXIÓN A TIERRA DE MOTORES Y GENERADORES DE GRAN TAMAÑO.

LAS ESTRUCTURAS DE ACERO DE EDIFICIOS DEBEN CONECTARSE A TIERRA EN  
LA BASE DE CADA UNA DE LAS COLUMNAS QUE FORMAN ESQUINA Y EN LAS  
INTERMEDIAS A DISTANCIAS NO MAYORES DE 18 METROS, LAS DERIVACIONES DE UNIÓN  
TIENEN QUE SER DE CABLE DE COBRE DE UN CALIBRE NO MENOR QUE ÉL NUMERO 2/0  
A.W.G. TODAS LAS CONEXIONES OCULTAS DEBEN DE CONECTARSE POR MEDIO DE  
SOLDADURA DE LATÓN, O POR OTRO PROCESO DE CONSISTENCIA EQUIVALENTE, NO SE  
PERMITE SOLDADURA DE ESTAÑO.

LAS ESTRUCTURAS Y CAJAS METÁLICAS DE LOS MECANISMOS DE CONTROL, PARARRAYOS, INTERRUPTORES, TRANSFORMADORES, REJAS Y ELEMENTOS SIMILARES, SE CONECTAN INDIVIDUALMENTE A LA BARRA O CABLE CENTRAL DE TIERRA EN FORMA ANÁLOGA A LA ESTRUCTURA DEL EDIFICIO. LOS BASTIDORES DE LAS CUCHILLAS INTERRUPTORAS O DESCONECTADAS QUE SE ATORNILLAN DIRECTAMENTE SOBRE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE ACERO, NO REQUIEREN CONEXIONES ADICIONALES A TIERRA, EXCEPTO EN EL CASO DE LA TUBERÍA DE OPERACIÓN DE LOS INTERRUPTORES DE MANIOBRAS MÚLTIPLES SEAN CONECTADAS A TIERRA POR MEDIO DE UN CABLE DE COBRE EXTRAFLEXIBLE DEL NUMERO 1/0 A.W.G O EQUIVALENTE, QUE SEA UNA DE LA PARTE MÁS CERCANA DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE YA CONECTADA A TIERRA.

#### -CONEXIÓN A TIERRA DE LAS SUBESTACIONES TIPO INTEMPERIE.

PARA LAS INSTALACIONES EN GENERAL, LA BARRA O CABLE CONECTOR DE TIERRA TIENE QUE CALCULARSE DE TAL FORMA QUE LA RESISTENCIA MÁXIMA DE LA LÍNEA A TIERRA NO EXCEDA DE 2 OHMS EN SUBESTACIONES CHICAS, INSTALADAS A LA INTEMPERIE Y DE 0.5 OHMS EN SUBESTACIONES GRANDES. LAS ESTRUCTURAS DE LAS SUBESTACIONES SE UNIRÁN A TIERRA SEGÚN LO DICHO ANTERIORMENTE. EN GENERAL ES MUY RECOMENDABLE LA UNIÓN A TIERRA DE CADA UNA DE LAS COLUMNAS DE SOPORTE DE LA ESTRUCTURA DE ACERO. EN LAS ESTRUCTURAS DE MADERA SE INTERCONECTAN TODOS LOS HERRAJES METÁLICOS O SE UNEN EN UNA FORMA CONVENIENTE POR MEDIO DE UNA O VARIAS BAJADAS DE CABLES DE COBRE DE CALIBRE NO MENOR DEL NUMERO 1/0 A.W.G., O EQUIVALENTE.

UNA CERCA METÁLICA COLOCADA ALREDEDOR DE UNA SUBESTACION TIPO INTEMPERIE TIENE QUE ESTAR CONECTADA A TIERRA. SI LA CERCA SE ENCUENTRA EN LA INMEDIATA CERCANÍA DE LA SUBESTACION Y EL CABLE COLECTOR DE UNIÓN A TIERRA TIENE MENOS DE 1 OHMS, LA CERCA PUEDE CONECTARSE A ESTE CABLE A INTERVALOS DE 7.63 METROS. MEDIANTE CABLE DE CALIBRE MÍNIMO DEL NUMERO 1/0

A.W.G. SI LA CERCA ESTÁ ALEJADA DE LA INSTALACIÓN O SI LA RESISTENCIA DEL CABLE COLECTOR ES MAYOR DE 1 OHMS, LA CERCA NO DEBERÁ CONECTARSE A ESTE CABLE.

EN ESTE CASO SE INSTALARÁ UNA SERIE DE VARILLAS O ELECTRODOS DE  $\frac{3}{4}$  " DE DIÁMETRO POR 10 PIES DE LONGITUD A LO LARGO DE LA CERCA CON UN ESPACIAMIENTO MÁXIMO DE 7.63 METROS. EL EXTREMO SUPERIOR DE CADA UNA DE ESTAS VARILLAS ESTARÁ ENTERRADO A UNOS 30 CENTÍMETROS DE LA SUPERFICIE DEL SUELO Y SE CONECTARÁ UNO CON LA CERCA USANDO CABLE DE COBRE DEL NÚMERO 1/0 A.W.G. COMO MÍNIMO.

-CONEXIÓN A TIERRA DE LOCALES EN DONDE HAY GENERADORES O MOTORES ELÉCTRICOS.

LOS LOCALES EN DONDE SE INSTALAN GENERADORES O MOTORES, DEBEN CONTAR CON UN CABLE COLECTOR DE CONEXIÓN A TIERRA TENDIDO DE ACUERDO CON LAS REGLAS PARA LA INSTALACIÓN DE BARRAS O CABLES INTERIORES, Y LOS MIEMBROS DE ACERO ESTRUCTURAL, TUBERÍA GENERAL DE AGUA DEL EDIFICIO, SE DEBERÁN CONECTAR A ESTE CABLE COLECTOR.

LAS CONEXIONES A TIERRA DE GENERADORES, MOTORES, TRANSFORMADORES Y MECANISMOS DE CONTROL TIENEN QUE EJECUTARSE CON CABLE DEL NÚMERO 1/0 A.W.G., COMO CALIBRE MÍNIMO; PERO DEBEN TENER POR LO MENOS UNA CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN DEL 25% DE LA MÁXIMA CORRIENTE DE RÉGIMEN EN SERVICIO CONTINUO DE CUALQUIER ELEMENTO DE CARGA A LO QUE SE HA CONECTADO LA LÍNEA DE TIERRA. LA UNIÓN DE LAS CONEXIONES A LAS CAJAS DE LOS APARATOS QUE SE COMUNICAN CON TIERRA DEBERÁN SER SOLDADAS CON LATÓN O TAMBIÉN SE PODRÁN USAR CONECTORES ESPECIALES DE PRESIÓN, SIN SOLDADURA.

-CONEXIÓN A TIERRA DE LOS DUCTOS PARA ALAMBRES CONDUCTORES.

TODO EL MATERIAL EXPUESTO A CRUZAMIENTOS TIENE QUE SER CONECTADO A TIERRA, SE COMPRENDEN EN ESTE RENGLÓN TODO EL EQUIPO QUE SIRVE PARA

PROTEGER Y CONDUCIR LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS Y SE INCLUYEN LOS GABINETES DE CONEXIÓN Y TABLEROS, CAJA DE CONEXIONES, CAJA DE DERIVACIÓN, CAJA DE APARATOS DE CONTROL, DUCTOS DE LAS LÍNEAS DE SERVICIO, TUBERÍAS, TUBERÍA CONDUIT, ACOPLAMIENTOS, ACCESORIOS PARA TUBOS Y DUCTOS, CABLE ARMADO, FORRO DE PLOMO PARA CABLES Y ENREJADOS.

ADEMÁS TIENE QUE CONSIDERARSE TAMBIÉN LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL, TRANSFORMADORES, ARMAZONES PARA TABLERO, MOTORES, GENERADORES Y EQUIPO ELÉCTRICO PORTÁTIL.

EN GENERAL SE DEBEN CONECTAR A TIERRA TODA CLASE DE CAJAS, GAVETAS, ACCESORIOS U OTROS ELEMENTOS METÁLICOS QUE NO CONDUCEN CORRIENTE Y CUALQUIER EQUIPO FIJO, SI TIENE ALGÚN CONTACTO METÁLICO CON CABLE ARMADO O DUCTOS METÁLICOS QUE CONTIENEN CONDUCTOS ELÉCTRICOS.

EN LAS INSTALACIONES A BASE DE TUBO CONDUIT, CABLE ARMADO O DUCTOS METÁLICOS, LA CONEXIÓN A TIERRA DEBE EJECUTARSE LO MÁS CERCA POSIBLE DEL LUGAR EN DONDE LOS CONDUCTORES RECIBEN EL SUMINISTRO DE CORRIENTE EN LOS SISTEMAS DE DUCTOS O TUBERÍAS.

TODAS LAS CONEXIONES DE TIERRA DEBEN ESTAR BIEN APRETADAS Y TENER SUPERFICIE PERFECTAMENTE LIMPIAS, Y TODOS LOS MATERIALES AISLANTES DE RECUBRIMIENTO DE PROTECCIÓN, COMO ESMALTE, OXIDO, ETC., DEBEN SER REMOVIDOS DE LOS PUNTOS EN DONDE SE CONECTA A TIERRA. NORMALMENTE SE UTILIZA UN CONECTOR DE PRESIÓN APROBADO, PARA EJECUTAR LAS CONEXIONES SIN SOLDADURA. DEBEN EVITARSE EL EMPLEO DE CONEXIONES A BASE DE SOLDADURA DE ESTAÑO.

#### -CONEXIÓN A TIERRA DE MOTORES DIVERSOS

TODOS LOS ARMAZONES DE MOTORES DEBEN CONECTARSE A TIERRA MEDIANTE UN CONDUCTOR EQUIPADO CON UN MATERIAL DE COBRE UNIDA MEDIANTE SOLDADURA DE LATÓN O POR UN CONECTOR DE PRESIÓN CONFIABLE, SIN SOLDADURA, SUJETO AL MOTOR POR DEBAJO DE LA CABEZA DE UNO DE LOS TORNILLOS DE LA

CARCAZA. EL OTRO EXTREMO DEL CONDUCTOR DE TIERRA SE CONECTA POR MEDIO DE ABRAZADERAS, O TERMINALES AL TUBO CONDUIT METÁLICO O AL ELEMENTO DE UNIÓN A TIERRA MÁS PRÓXIMO.

#### -CONEXIÓN A TIERRA DE EQUIPO PORTÁTIL.

EL EQUIPO PORTÁTIL QUE OPERA CON VOLTAJE ARRIBA DE 500 VOLTS, SE ENTREGA CON CABLE PARA SU CONEXIÓN FIJA EN AMBOS EXTREMOS DE LA LÍNEA. TODO ESTE EQUIPO INCLUIDO LA CARCAZA O ESTRUCTURA, NECESITA ESTAR CONECTADO A TIERRA A TRAVÉS DE UN CONDUCTOR, O CONDUCTORES, A TIERRA INCLUIDO EL CABLE DE SUMINISTRO DE ENERGÍA, CUYA CAPACIDAD DE AMPERES DEBE SER EQUIVALENTE A LA DEL CONDUCTOR MÁS GRANDE DE LA LÍNEA. EL EQUIPO PORTÁTIL QUE TRABAJA CON VOLTAJE DE 600 VOLTS O MENOS SE CONECTARÁ A TIERRA MEDIANTE UN ALAMBRE O ALAMBRES ESPECIALES CON UNA CAPACIDAD CONDUCTIVA DE CORRIENTE IGUAL A LA DE MAYOR DE LOS CONDUCTORES DEL APARATO. LOS CONDUCTORES NEUTROS DEL SISTEMA, NO OBSTANTE QUE EN LA FUENTE MISMA DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA ESTÁN CONECTADOS A TIERRA, NO DEBEN USARSE POR NINGÚN CONCEPTO COMO UNIÓN A TIERRA EN EQUIPOS Y APARATOS.

LA CONEXIÓN A TIERRA DEL EQUIPO PORTÁTIL PUEDE SIGNIFICAR PELIGRO EN VEZ DE UN MEDIO DE SEGURIDAD SI NO SE LE INSTALA Y MANTIENE EN FORMA CORRECTA. LAS HERRAMIENTAS ELÉCTRICAS PORTÁTILES DEBEN REVISARSE PARA TENER LA SEGURIDAD DE QUE ESTÁN CONECTADAS CORRECTAMENTE AL HILO DE TIERRA ANTES DE ENTREGÁRSELAS AL OPERADOR, Y LOS CABLES PARA EQUIPO PORTÁTIL, ASÍ COMO LAS EXTENSIONES QUE SE USAN EN ÉL MISMO, JUNTO CON SUS ELEMENTOS DE CONEXIÓN TIENE QUE SER PERIÓDICAMENTE REVISADOS.

## -ANÁLISIS PRELIMINARES PARA UN SISTEMA DE TIERRA.

EN ÉSTA SECCION ESTUDIAREMOS EL SISTEMA DE TIERRA MÁS COMÚN UTILIZADO EN LAS SUBESTACIONES DE LAS COMPAÑÍAS SUMINISTRADORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y EN LAS INDUSTRIAS QUE CONSUMEN DICHA ENERGÍA. SE ESCOGIÓ ÉSTE SISTEMA POR SER EL MÁS COMPLICADO Y PELIGROSO POR LO TANTO, ENTENDIENDO Y APLICANDO CORRECTAMENTE LAS INDICACIONES CORRESPONDIENTES, SE PODRÍA APLICAR A TODA CLASE DE INMUEBLES O EQUIPOS DE MENOR CAPACIDAD.

LAS SUBESTACIONES DEBEN CONTAR CON UN ADECUADO SISTEMA DE TIERRAS, AL CUAL SE DEBEN CONECTAR TODOS LOS ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN QUE REQUIERA DICHA CONEXIÓN, SIENDO DE SUMA IMPORTANCIA OBTENER UN VALOR DE RESISTENCIA DE TIERRA TAN BAJO COMO SEA POSIBLE A FIN DE ASEGURAR TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO DENTRO DE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES POR LAS DISPOSICIONES DE SEGURIDAD, QUE SE PUEDE OBTENER CON LA COLOCACIÓN DE UNA MALLA DE CONDUCTORES.

## -RED DE TIERRAS.

LA RED O MALLA DE TIERRAS ESTÁN BÁSICAMENTE FORMADA POR CONDUCTORES QUE SE ENCUENTRAN HORIZONTALMENTE ENTERRADOS EN LA TIERRA A UNA PROFUNDIDAD QUE USUALMENTE VARIA ENTRE 0.5 METROS Y 1.0 METROS. ESTA PRÁCTICA ES MÁS COMÚN Y QUE OFRECE MUCHAS VENTAJAS; TALES COMO LAS QUE MENCIONAMOS A CONTINUACIÓN:

- 1.- PROPORCIONA UN CIRCUITO DE MUY BAJA IMPEDANCIA PARA LA CIRCULACIÓN DE LAS CORRIENTES DE TIERRA, YA SEA DEBIDO A UNA FALLA A TIERRA DEL SISTEMA ELÉCTRICO O A LA OPERACIÓN DE UN APARATO APARTA RAYOS

- 2.- EVITA QUE DURANTE LA CIRCULACIÓN DE LA CORRIENTE DE TIERRAS. PUEDAN PRODUCIRSE DIFERENCIAS DE POTENCIAL ENTRE DISTINTOS PUNTOS DE UNA SUBESTACION ( YA SEA SOBRE EL PISO CON RESPECTO A PARTES METÁLICAS PUESTAS A TIERRA ). QUE PUEDAN SER PELIGROSAS PARA EL PERSONAL.
- 3.- EN UNA SUBESTACION, UN SOLO CONDUCTOR NO ES SUFICIENTE PARA PROPORCIONAR LA CONDUCTIVIDAD NECESARIA, SÍ A ESTO HAY QUE AGREGARLE LA CONEXIÓN DE ESTRUCTURAS, MOTORES, MAQUINARIA, ETC., UNA RED RESULTA ADEMAS DE IDEAL ELEMENTAL. SI ESTA BIEN ENTERRADA Y CON VARILLAS SUFICIENTES, ES POR SÍ MISMA UN EXCELENTE SISTEMA DE TIERRAS.

SE RECOMIENDA QUE UN CABLE CONTINUO FORME EL PERIMETRO EXTERIOR DE LA MALLA, CON UNA SEPARACION DE 3 A 5 METROS DE LA PARED EXTERIOR Y TOMANDO EN CUENTA LAS CONCENTRACIONES DE CARGA, LA MALLA QUEDARA CONSTITUIDA POR CABLES COLOCADOS PARALELA Y PERPENDICULARMENTE CON UN ESPACIAMIENTO RAZONABLE, EN QUE SEA POSIBLE, LOS CABLES QUE FORMAN LA MALLA DEBEN COLOCARSE A LO LARGO DE LAS HILERAS DE ESTRUCTURAS O EQUIPOS, PARA FACILITAR LA CONEXION DE LOS MISMOS.

ES IMPORTANTE TAMBIEN QUE EN CADA CRUCE DE CONDUCTORES DE LA MALLA ESTOS DEBAN CONECTARSE RIGIDAMENTE ENTRE SÍ Y EN LOS PUNTOS ADECUADOS, CONECTARSE A ELECTRODOS DE TIERRA, CLAVADOS VERTICALMENTE. DONDE SEA POSIBLE, SE RECOMIENDA CONSTRUIR REGISTROS EN LOS MISMOS PUNTOS.

CABE HACER LA ACLARACION, QUE EL EXCESO DE CRUCES DE CABLES Y CONEXIONES, REDUCE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA, PUESTO QUE EN CADA CONEXION SE AGREGAN RESISTENCIAS DE CONTACTO. UNA RED TIPICA SE MUESTRA EN LAS FIG. 33, 34 Y 35.

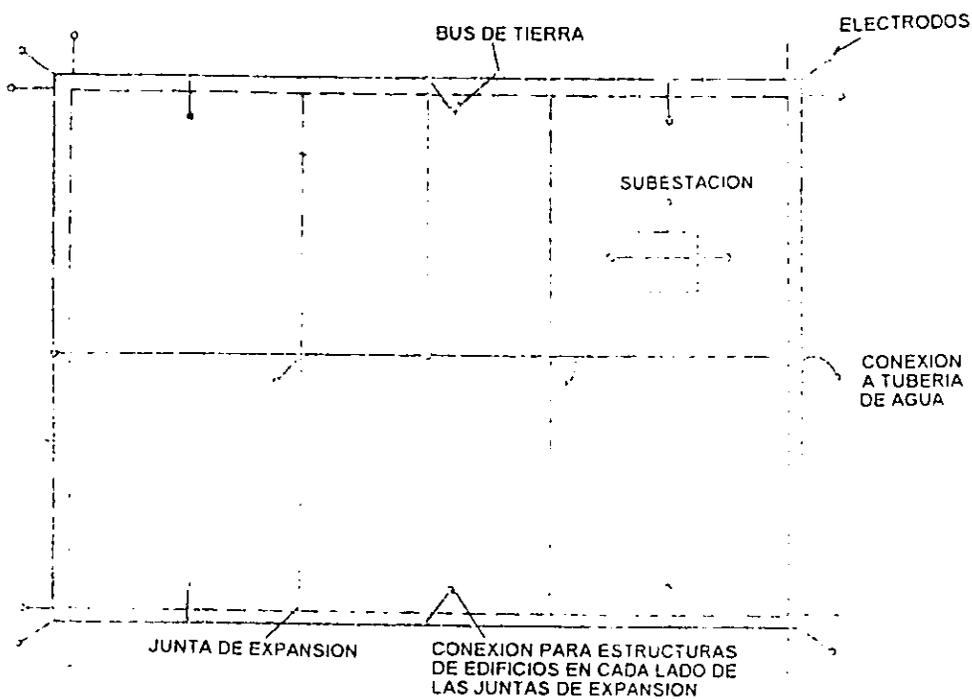


FIG. 33 BUS DE TIERRA TÍPICO

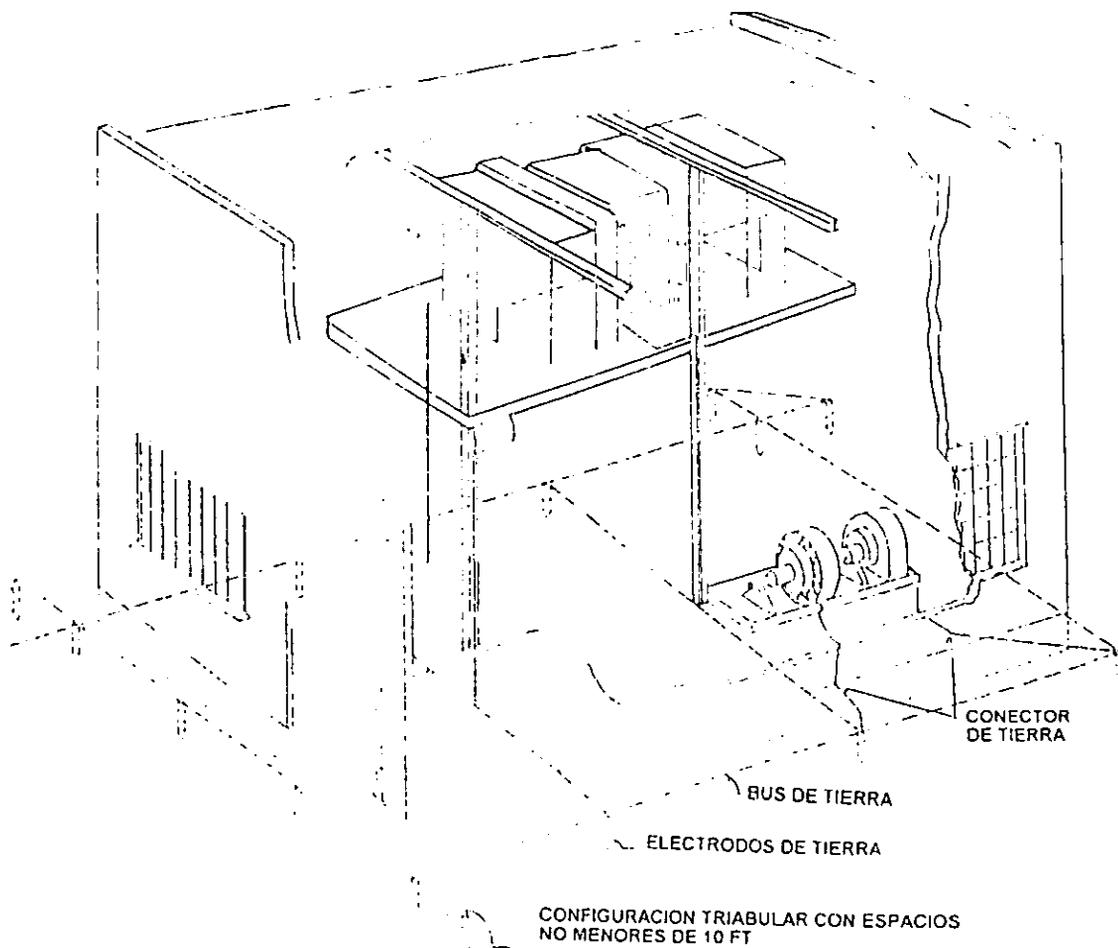


FIG. 34

SISTEMA DE TIERRA ( TIPO ) PARA EDIFICIOS Y EQUIPO ELECTRICO

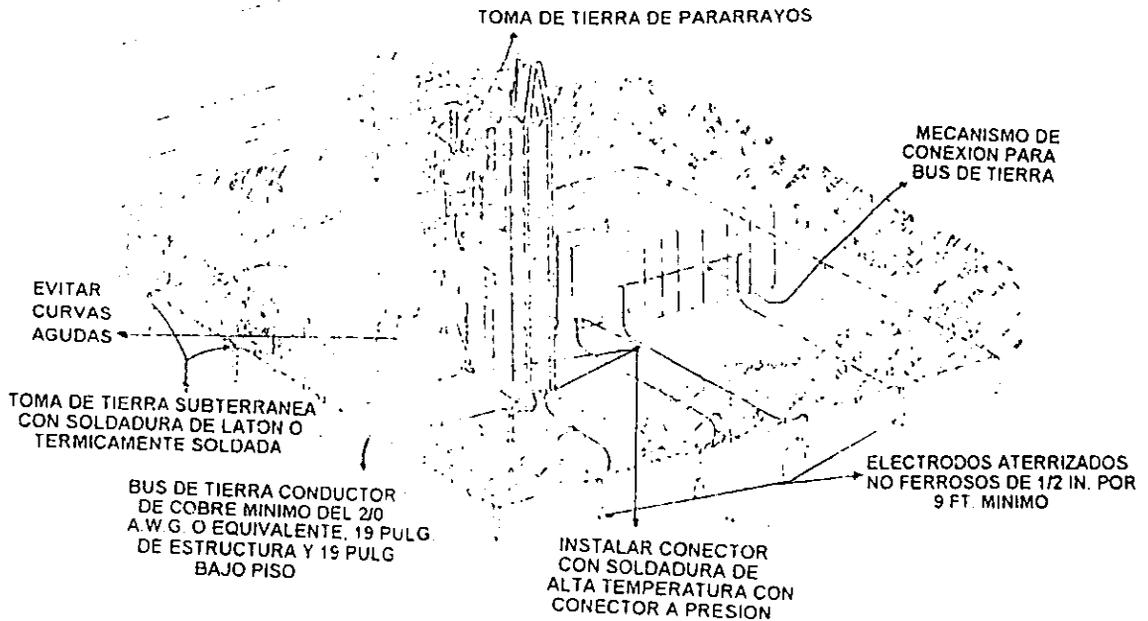


FIG. 35 SISTEMA DE TIERRA PARA SUBESTACIONES TIPO INTEMPERIE

## -CONDUCTORES DE LA RED DE TIERRAS

SI EL SISTEMA DE DISPERSION CONSISTE EN UNA MALLA O RED DE TIERRA, QUE ES EL CASO QUE NOS INTERESA POR SER ÉL MAS IDONEO Y EL QUE NOS LLEVA A REFERIR DURANTE ESTE TRABAJO: ESTA DEBE SER DISEÑADA BAJO LAS SIGUIENTES CONDICIONES:

- 1) PARA RESISTIR FUSION O DETERIORO DE JUNTAS ELECTRICAS BAJO LAS CONDICIONES MÁS SEVERAS DE COMBINACION DE MAGNITUDES DE CORRIENTES DE FALLA Y DURACION DE FALLA, A LAS CUALES PUEDE ESTAR SUJETA.
- 2) ALTO GRADO DE RIGIDEZ MECANICA, ESPECIALMENTE EN LUGARES EXPUESTOS A DAÑOS FISICOS.
- 3) TENER SUFICIENTE CONDUCTIVIDAD DE MODO QUE NO CONTRIBUYA A FORMAR DIFERENCIAS DE POTENCIAL LOCALES PELIGROSAS.

PARA CUMPLIR LOS REQUERIMIENTOS ANTES MENCIONADOS, HAREMOS USO DE LA ECUACION DESARROLLADA POR OMERDONK, LA CUAL NOS DA A CONOCER EL CALIBRE MINIMO DEL CONDUCTOR DE COBRE Y SUS UNIONES RESISTENTES A FUSION.

$$I = \sqrt[3]{\frac{s \cdot \log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{33t}} \dots\dots\dots EC 14$$

DONDE :

- I = CORRIENTE EN AMPERES.
- s = SECCION TRANSVERSAL DEL CONDUCTOR DE COBRE EN CIRCULAR MIL.
- t = TIEMPO EN SEGUNDOS DE DURACION DE LA FALLA.
- T<sub>m</sub> = MAXIMA TEMPERATURA PERMISIBLE EN °C
- T<sub>a</sub> = TEMPERATURA AMBIENTE EN °C.

PARA LA APLICACION DE ESTA ECUACION, HAREMOS LAS SIGUIENTES CONSIDERACIONES:

TEMPERATURA AMBIENTE 40°C.

TEMPERATURA PERMISIBLE EN UNIONES MECANICAS 450 °C.

TEMPERATURA PERMISIBLE EN UNIDADES SOLDABLES 250 °C.

PUNTO DE FUSION DEL COBRE 1083 °C

LA TABLA 7 MUESTRA ALGUNOS VALORES DE LA ECUACION DE LOS CONDUCTORES REQUERIDOS Y QUE FUERON OBTENIDOS DE LA ECUACION ANTERIOR.

SE DICE QUE SE TIENE UN C.M. ( CIRCULAR MIL ) CUANDO EL AREA TRANSVERSAL TIENE UNA MILESIMA DE PULGADA. ( 0.001 INCHES ).

TABLA NUMERO 7.- CALIBRE MINIMO DEL CONDUCTOR PARA EVITAR LA FUSION

TIEMPO DE DURACION DE LA FALLA	CIRCULAR MILLS POR AMPERE		
	CABLE SOLO	CON UNIONES MECANICAS	CON UNIONES SOLDABLES
30 SEGUNDOS	40	60.0	65.0
4 SEGUNDOS	14	20.0	24.0
1 SEGUNDO	7	10.0	12.0
0.5 SEGUNDOS	3	6.5	8.5

LA RELACION ENTRE EL CIRCULAR MIL Y EL AREA EN MM². PARA UN CONDUCTOR SE OBTIENE COMO SIGUE:

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

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

SIENDO EL CIRCULAR MIL UN AREA:

$$1 \text{ C.M.} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.0254)^2}{4} = \frac{3.14 (0.0254)^2}{4} = 5.0645 \times 10^{-4} \text{ MM}^2.$$

$$1 \text{ MM}^2 = \frac{104}{5.0645} = 1974.5 \text{ C.M.}$$

EN FORMA APROXIMADA:

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

PARA CONDUCTORES CON UN AREA MAYOR DEL DESIGNADO COMO 4/0, SE HACE UNA DESIGNACION QUE ESTA EN FUNCION DE SU AREA, PARA LO CUAL SE EMPLEA LA UNIDAD DENOMINADA EN CIRCULAR MIL, SIENDO HACI COMO UN CONDUCTOR DE 250 M.C.M. CORRESPONDERA A AQUEL CUYA SECCION ES DE 250 000 C.M.Y ASI SUCESIVAMENTE. EN LA TABLA SIGUIENTE SE INDICAN LAS DIMENSIONES DE LOS CONDUCTORES ELECTRICOS DESNUDOS.

TABLA NUMERO 8.- DIMENSIONES DE CONDUCTORES ELECTRICOS DESNUDOS

CALIBRE A.W.G. M.C.M.	SECCION		DIAMETRO	
	C.M.	MM. <sup>2</sup>	PULG.	MM.
20	1022	0.5176	0.03196	0.812
18	1624	0.8232	0.04030	1.024
16	2583	0.3090	0.05082	1.291
14	4107	2.0810	0.06408	1.628
12	6530	3.3090	0.08081	2.053
10	10380	5.2610	0.10190	2.588
8	16510	8.3670	0.12850	3.264
6	26258	13.3030	0.16200	4.115
4	41740	21.1480	0.20430	5.189
2	66370	33.6520	0.25760	6.543
1	83690	42.4060	0.28930	7.348
0	105500	53.4770	0.32490	8.252
00	133100	67.4190	0.36480	9.266
000	167800	55.0320	0.40960	10.403
0000	211600	107.2250	0.46000	11.684

NOTA.- LOS CALCULOS DE C.M. SE HICIERON TOMANDO EL DATO DE

$$1\text{MM.}^2 = 1974.5 \text{ C.M.}$$

CONTINUACION DE LA TABLA NUMERO 8

CALIBRE A.W.G. M.C.M.	SECCION		DIAMETRO	
	C.M.	MM. <sup>2</sup>	PULG.	MM.
250		126.644	0.575	14.605
300		151.999	0.630	16.002
350		177.354	0.681	17.297
400		202.709	0.728	18.491
500		253.354	0.814	20.675
600		303.999	0.893	22.682
700		354.708	0.964	24.685
750		379.383	0.998	25.349
800		405.160	1.031	26.187
900		455.805	1.093	27.762
1000		506.450	1.152	29.260
1250		633.063	1.289	32.741
1500		759.677	1.412	35.865
1750		886.286	1.526	38.760
2000		1012.901	1.631	41.467

OTRA ECUACION DE LA CUAL SE PUEDE HACER USO PARA CALCULAR AL CONDUCTOR DE TIERRA Y QUE NOS OFRECE UN BUEN MARGEN DE SEGURIDAD CUANDO SE DESCONOCEN LAS CONDICIONES ANTERIORES. ES AQUELLA EN LA QUE EN ÉL CALCULO INTERVIENEN UNICAMENTE LA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA Y LA DENSIDAD DE LA CORRIENTE DEL MATERIAL USADO, ES DECIR:

$$S = \frac{I}{\delta} \dots\dots\dots EC.15$$

DONDE :

S = SECCION TRANSVERSAL DEL CONDUCTOR EN MM<sup>2</sup>.

I = CORRIENTE DE FALLA EN AMPERES.

δ = DENSIDAD DE CORRIENTE EN  $\frac{\text{AMPERES}}{\text{MM}^2}$ .

EMPLEÁNDOSE LAS SIGUIENTES EXPRESIONES:

$$S = \frac{I}{160} \text{ ( CON UN MÍNIMO DE } 16 \text{ MM}^2 \text{.) PARA CONDUCTORES DE COBRE.}$$

$$S = \frac{I}{100} \text{ ( CON UN MÍNIMO DE } 35 \text{ MM}^2 \text{.) PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO.}$$

$$S = \frac{I}{60} \text{ ( CON UN MÍNIMO DE } 50 \text{ MM}^2 \text{.) PARA CONDUCTORES DE ACERO.}$$

PARA LA CONEXION A TIERRA DE LOS APARTARRAYOS LA SECCION DE LOS CONDUCTORES NO DEBE SER INFERIOR A LOS SIGUIENTES VALORES:

$$S = 24 + 0.4 E \text{ ( MM}^2 \text{.) PARA CONDUCTORES DE COBRE.}$$

$$S = 40 + 0.6 E \text{ ( MM}^2 \text{.) PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO.}$$

DONDE:

E = TENSION NOMINAL DEL APARTARRALLOS EN KV.

S = SECCION TRANSVERSAL DEL CONDUCTOR EN MM<sup>2</sup>.

- RIGIDEZ MECANICA

LAS NORMAS DE INSTALACION RECOMIENDAN GENERALMENTE EL USO DE CABLES DE CALIBRES 1/0 A.W.G. PARA JUNTAS MECANICAS Y 2/0 A.W.G. PARA JUNTAS SOLDABLES. PARA PROCEDIMIENTOS PRACTICOS SE HA ADOPTADO EL USO DE CABLE 4/0 A.W.G. COMO MINIMO EN INSTALACIONES INDUSTRIALES.

LOGICAMENTE EL PROPIO CALCULO NOS INDICARA EL CALIBRE NECESARIO, AUNQUE EN CIERTOS CASOS ES NECESARIO ADOPTAR CALIBRES MENORES, EN BRAZOS DERIVADOS DE LA RED PRINCIPAL, PROCURANDO QUE LAS CONDICIONES DE TRABAJO NO LOS DAÑEN.

-MATERIAL Y LONGITUD DEL CONDUCTOR PARA CONTROLAR EL GRADIENTE DE POTENCIAL

LA MAYOR PARTE DE LOS CONDUCTORES EMPLEADOS EN LOS SISTEMAS DE TIERRA ESTAN HECHOS DE COBRE, QUE ES EL MATERIAL CON MAYOR CONDUCTIVIDAD Y CON UN COSTO SUFICIENTE BAJO COMO PARA QUE RESULTE ECONOMICO; TENIENDO COMO CARACTERISTICAS LA ALTA CONDUCTIVIDAD, GRAN RESISTENCIA MECANICA Y SE CORROE MUY POCO EN CONTACTO CON LA TIERRA.

EXISTEN TRES TIPOS DE CONDUCTORES SEGUN SU TEMPLE:

- 1) CONDUCTORES DE COBRE SUAVE O RECOCIDO.- POR SU MISMA SUAVIDAD, TIENEN BAJA RESISTENCIA MECANICA, ALTA ELONGACION, SU CONDUCTIVIDAD ELECTRICA ES DE 100%.

USOS.- CON O SIN AISLAMIENTO PROTECTOR, SE UTILIZA EN INSTALACIONES TIPO INTERIOR, DENTRO DE DUCTOS, TUBOS CONDUIT, ENGRAPADOS SOBRE MUROS.

- 2) CONDUCTORES DE COBRE SEMIDURO.- TIENE MAYOR RESISTENCIA MECANICA QUE LOS CONDUCTORES DE COBRE SUAVE, MENOR ELONGACION Y SU CONDUCTIVIDAD ELECTRICA ES DE APROXIMADAMENTE 98.66 %.

USOS.- SIN AISLAMIENTO PROTECTOR, PARA LINEAS DE TRANSMISION DE DISTANCIAS ENTRE POSTES, PARA REDES DE DISTRIBUCION Y PARA SISTEMAS DE TIERRAS.

- 3) CONDUCTORES DE COBRE DURO.

USOS.- SÉ UTILIZAN NORMALMENTE EN LINEAS DE TRANSMISION DE AREAS.

PARA CONOCER LA LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR DE LA MALLA, QUE NOS PERMITA CONSERVAR LOS VALORES DE SEGURIDAD EN UN SISTEMA DE CONEXION A TIERRA; UTILIZAREMOS PARA ESTE CALCULO LOS VOLTAJES DE CONTACTO, EN LUGAR DE LOS DE PASO O TRANSFERENCIA POR LAS SIGUIENTES RAZONES:

- 1.- LOS VOLTAJES DE PASO EN INSTALACIONES INDUSTRIALES, SON MENORES QUE LOS DE CONTACTO. LAS RESISTENCIAS DE TIERRA ESTAN EN SERIE Y NO EN PARALELO; LO TANTO LIMITAN MEJOR LA CORRIENTE AL CUERPO.
2. - LOS VOLTAJES INDUCIDOS O TRANSFERIDOS SON MAS DIFICILES DE LIMITAR Y REQUIEREN DE AISLAMIENTOS U OTRO TRATAMIENTO PARA LOGRARLO.

POR LO GENERAL SE ESCOGEN LAS TENSIONES DE CONTACTO, DE ESTRUCTURAS CONECTADAS A TIERRA AL CENTRO DEL RECTANGULO DE LA MALLA, YA QUE EXISTEN GRANDES POSIBILIDADES DE QUE EL OBJETO TOCADO A DISTANCIAS SUPERIORES A UN METRO, ESTE CONECTADO DIRECTA O INDIRECTAMENTE A LA MALLA.

DEFINIMOS LA TENSION DE MALLA COMO LA DIFERENCIA DE POTENCIAL EXPRESADA EN VOLTS, DEL CONDUCTOR DE LA MALLA Y LA SUPERFICIE DEL TERRENO

AL CENTRO DEL RECTANGULO DE LA MALLA, POR LO GENERAL ES UN VALOR SUPERIOR A LAS TENSIONES DE TOQUE A UN METRO DE DISTANCIA DEL CONDUCTOR DE LA RED.

PARA VALORES COMUNES DE CONDUCTOR, ELECTRODOS, PROFUNDIDAD Y ESPACIAMIENTO; LAURENT ESTABLECIO EN FORMA APROXIMADA QUE LOS VALORES DE LAS TENSIONES DE PASO, CONTACTO Y MALLA SERIAN DEL ORDEN:

$$E_{\text{PASO}} = 0.1 A 0.15 \rho i \dots\dots\dots EC.16$$

$$E_{\text{CONTACTO}} = 0.6 A 0.8 \rho i \dots\dots\dots EC.17$$

$$E_{\text{MALLA}} = \rho i \dots\dots\dots EC.18$$

DONDE :

$i$  = ES LA CORRIENTE EN AMPERES POR CADA METRO DEL CONDUCTOR ENTERRADO  $\left(i = \frac{I}{L}\right)$  QUE FLOTE A TIERRA.

LAS FORMULAS ANTERIORES SON APROXIMADAS Y PARA TOMAR EN CUENTA LA PROFUNDIDAD DEL ENTERRAMIENTO, LA IRREGULARIDAD EN EL FLUJO DE LA CORRIENTE EN PARTES DIFERENTES DE LA RED, EL DIAMETRO DE LOS CONDUCTORES Y ESPACIAMIENTO PUEDE USARSE LA SIGUIENTE ECUACION:

$$E_{\text{MALLA}} = \frac{K_m K_i \rho I}{L} \dots\dots\dots EC.19$$

DONDE:

$K_m$  = COEFICIENTE QUE TOMA EN CUENTA EL EFECTO DEL NUMERO DE CONDUCTORES PARALELOS "n", EL ESPACIAMIENTO "d", EL DIAMETRO "D" Y LA PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO "h" DE LOS CONDUCTORES QUE FORMAN LA RED.

ESTE VALOR EN TERMINOS DE LOS FACTORES MENCIONADOS, ES COMO SIGUE:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16 h d} + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{7}{8}\right) \dots\dots ETC. \right] \dots EC.20$$

ÉL NUMERO DE FACTORES EN EL SEGUNDO TERMINO ES DOS VECES MENOS QUE ÉL NUMERO DE CONDUCTORES EN PARALELO EN LA RED BASICA, EXCLUYENDO LAS CONEXIONES DE CRUCES.

$$K_i = 0.65 + 0.172 n \dots\dots\dots EC.21$$

DONDE:

- n = NUMERO DE CONDUCTORES EN PARALELO EN LA MALLA EXCLUYENDO LAS CONEXIONES DE CRUCES.
- $\rho$  = RESISTIVIDAD PROMEDIO DEL TERRENO EN OHMS - METRO.
- I = ES LA CORRIENTE MAXIMA ( RMS ) EN AMPERES, QUE FLUYE ENTRE LA RED DE TIERRAS Y LA TIERRA, AJUSTADA POR LOS FACTORES DE DECREMENTO Y AMPLIACION FUTURA.
- L = LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR ENTERRADO EN METROS.

-FACTOR DE UNIFORMIDAD \*  $K_i$  \*

CON RESPECTO AL FACTOR DE UNIFORMIDAD \*  $K_i$  \* SE PUEDE DECIR LO SIGUIENTE; EN ALGUNOS CASOS PARA LOS CALCULOS, LA INFORMACION SE TOMA BAJO LAS CONDICIONES IDEALES TALES COMO LA UNIFORMIDAD DEL SUELO, REDES SIMETRICAS COMPUESTAS POR MALLAS CUADRADAS O RECTANGULARES DE TAMAÑO UNIFORME, PERO AUN PARA ESTAS REDES IDEALES, LA CORRIENTE QUE FLUYE POR LA RED VARIARA, ENCONTRÁNDOSE QUE ES MAS ALTO QUE EL FLUJO EN LOS LADOS QUE EN EL CENTRO Y AUN MAS EN LAS ESQUINAS, CON LO QUE LOS GRADIENTES DE POTENCIAL VARIAN DIRECTAMENTE.

EN LAS INSTALACIONES PRACTICAS, ES DIFICIL CONFORMAR ESTAS IDEALIZACIONES, POR LO QUE ES NECESARIO CONSIDERAR FACTORES QUE TOMEN EN CUENTA ESTAS IRREGUI ARIDADES Y ANALIZAR, SU MODO DE OPERAR.

OTRO FACTOR QUE PODRIA AFECTAR LA EXACTITUD DE LOS RESULTADOS, ES LA NO UNIFORMIDAD DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO. SI LA RESISTIVIDAD DE LA SUPERFICIE ES MENOR QUE LAS CAPAS PROFUNDAS, ESTO PERMITIRA QUE SEA MAS CONDUCTOR QUE LAS CAPAS DE ABAJO, DE TAL MANERA QUE LA CORRIENTE DE FALLA

PODRIA CANALIZARSE POR LA SUPERFICIE; LO OPUESTO PODRIA LOGRARSE SI LAS CAPAS PROFUNDAS SON MÁS CONDUCTIVAS ESPECIALMENTE CUANDO LA RED HACE CONTACTO EFECTIVO CON ESTAS.

SI LA RESISTIVIDAD USADA EN LOS CALCULOS ES CERCANA AL VALOR MEDIO EFECTIVO DEL AREA, LAS VARIACIONES LOCALES DE LOS POTENCIALES PODRIAN EN PARTE SER COMPENSADOS YA QUE LAS CORRIENTES TIENDEN A FLUIR POR LAS AREAS DE MÁS BAJA RESISTIVIDAD Y POR ESO MISMO SE LOGRA TAMBIEN UNA TENSION DE PASO MAS BAJA. POR OTRO LADO, LOS CAMBIOS BRUSCOS DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO PODRIAN TRAER CONSIGO RESULTADOS DE INESPERADA ELEVACION DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.

UNA VEZ QUE SE HAN CALCULADO LAS TENSIONES DE PASO, DE CONTACTO, DE MALLA Y UTILIZANDO LA LONGITUD APROXIMADA DEL DISEÑO PRELIMINAR DE LA RED SE COMPARAN LOS VALORES DE TENSIONES CON LOS VALORES TOLERABLES DEL CUERPO HUMEDO Y EN ESTA FORMA SE SABE SI EL DISEÑO QUEDA DENTRO DE LOS LIMITES DE SEGURIDAD REQUERIDOS. EN CASO DE NO SER ASÍ, SE PROCEDE A CALCULAR LA LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR NECESARIO PARA ENTRAR A LOS LIMITES DE SEGURIDAD.

AHORA SI IGUALAMOS EL VALOR DE LA TENSION DE MALLA DE LA ECUACION 19 CON EL VALOR TOLERABLE DE LA TENSION DE CONTACTO DE LA ECUACION 3 DEL CAPITULO 2, Y SÉ OBTIENE:

$$\frac{K_m K_i \rho l}{L} = \frac{165 + 0.25 \rho s}{t} \dots \dots \dots EC 22$$

DE ESTAS ECUACIONES PODEMOS DEDUCIR LA LONGITUD DEL CONDUCTOR A ENTERRAR, QUE FORMARA LA RED CAPAZ DE MANTENER LAS TENSIONES DE MALLA DENTRO DE LOS LIMITES DE SEGURIDAD COMO SIGUE:

$$L = \frac{K_m K_i \rho l \cdot t}{165 + 0.25 \rho s} \dots \dots \dots EC.23$$

LA CORRIENTE DE FALLA NO PENETRA SOLAMENTE LA TIERRA A TRAVES DE LOS CONDUCTORES HORIZONTALES DE LA RED, SI NO TAMBIEN POR LAS VARILLAS VERTICALES, POR LAS TUBERIAS DE AGUA DE POCO PROFUNDO, ETC. DE LO ANTERIOR EN LOS CASOS EN QUE LA LONGITUD DEL CABLE ENCONTRADO EN LA ECUACION ANTERIOR RESULTE ANTIECONOMICO, PUEDEN CONSIDERARSE LAS LONGITUDES DE DICHS ELECTRODOS CONECTADOS FIRMEAMENTE A LA RED Y ENTONCES CONSIDERAR UNA RED DE TIERRAS MÁS PEQUEÑA, SIEMPRE QUE SU RESISTENCIA TOTAL CONSIDERE ESTOS NUEVOS ELEMENTOS, DE MANERA QUE ASEGURE QUE NO SE CONSIDERAN GRADIENTES DE POTENCIAL FUERA DE LOS TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO.

EN LOS CASOS DONDE LOS VALORES DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO Y LA CORRIENTE DE FALLA SEAN TAN BAJOS, LA LONGITUD DEL CONDUCTOR CALCULADO POR LA ECUACION ANTERIOR RESULTA TAN PEQUEÑA QUE SE HACE DIFICIL EFECTUAR LAS CONEXIONES DE LOS EQUIPOS A LA RED, EN TALES CASOS, SE EMPLEA MAS CONDUCTOR QUE EL NECESARIO PARA EL CONTROL DE LOS GRADIENTES DE POTENCIAL.

#### -TENSIONES DE PASO EN LA PERIFERIA DE LA RED

DENTRO DE LA RED, LAS TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO SON MÁS FACTIBLES DE CONTROLAR A CUALQUIER VALOR DESEADO, DISMINUYENDO EL ESPACIAMIENTO DE LOS CONDUCTORES QUE FORMAN LA MALLA, INCLUSO TEORICAMENTE PUEDEN LLEGAR A SER CERO, EN EL CASO DE USAR UNA PLACA METALICA SOLIDA.

LA SITUACION ES DIFERENTE EN EL CASO DE ZONAS INMEDIATAS A LA PERIFERIA DE LA RED, DONDE EL PROBLEMA PODRIA EXISTIR AUN CON EL USO DE LA PLACA SOLIDA. ESTE PROBLEMA LLEGA A SER AUN MÁS SERIO EN EL CASO DE LAS SUBESTACIONES PEQUEÑAS, DONDE LA RED SOLO CUBRE UNA AREA LIMITADA.

POR LO QUE RESPECTA A LAS TENSIONES DE PASO, LAS SUBESTACIONES SE DISEÑAN GENERALMENTE ELIMINANDO EN LO POSIBLE LOS CONTACTOS EN LA PERIFERIA O EN TODO CASO MANTENER SUS VALORES DENTRO DE LOS LIMITES DE SEGURIDAD. POR EJEMPLO: EL TRATO ESPECIAL QUE SE LES DA A LAS CERCAS COLOCADAS EN LA PERIFERIA DE LA RED, COMO YA SE HA MENCIONADO.

POR LO TANTO PARA CALCULAR LOS POTENCIALES DE PASO EN LA PERIFERIA LO HAREMOS DE LA SIGUIENTE FORMA:

$$E_{\text{PASO}} = \frac{K_s K_i \rho I}{L} \dots\dots\dots EC.24$$

DONDE:

$K_s$  = COEFICIENTE QUE TOMA EN CUENTA EL EFECTO DEL NUMERO "h", EL ESPACIAMIENTO "D" Y LA PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO "h" DE LOS CONDUCTORES DE LA RED.

SU VALOR SE CALCULA COMO SIGUE:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots ETC. \right) \dots\dots\dots EC.25$$

EL VALOR TOTAL DE TERMINOS DENTRO DEL PARENTESIS, ES IGUAL AL NUMERO DE CONDUCTORES PARALELOS EN LA RED BASICA, EXCLUYENDO LAS CONEXIONES TRANSVERSALES.

$K_i$  = FACTOR DE CORRECCION DE IRREGULARIDAD PARA PERMITIR EL FLUJO DE CORRIENTE A TIERRA NO UNIFORME EN TODA LA RED  
 $I$  = CORRIENTE TOTAL DE FALLA, EXPRESADA EN AMPERES.  
 $L$  = LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR ENTERRADO, EN METROS.

UN VALOR DE 1.2 A 1.3 FUE PROPUESTO POR MIE MANN, SIN EMBARGO, ESTE VALOR PODRIA SER INSUFICIENTE PARA CUBRIR LAS PROYECCIONES AGUDAS EN LAS REDES, POR LO QUE SE SUGIERE QUE SE TOMEN VALORES MÁS CONSERVATIVOS

# ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

PARA ESTE FACTOR YA QUE LA DENSIDAD DE CORRIENTE Y GRADIENTES SUPERFICIALES PODRIAN TENDER A VALORES MUY ALTOS EN ESAS ZONAS.

POR OTRA PARTE, SI EL DISEÑO ES TAL QUE OFREZCA POTENCIALES INTERNOS DENTRO DE LOS LIMITES TOLERABLES Y ADEMAS LA RESISTIVIDAD SUPERFICIAL ES SIMILAR TANTO DENTRO DE LA MALLA COMO FUERA DE ELLA. LAS TENSIONES DE PASO RARA VEZ LLEGAN A SER UN PROBLEMA.

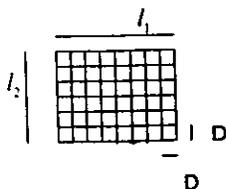
SIN EMBARGO, ESTA SEGURIDAD SE CONSIGUE SOLO CON UN TRATAMIENTO ESPECIAL DEL SUELO, TAL COMO COLOCAR ROCA TRITURADA EN TODA LA SUPERFICIE DEL AREA DE LA RED, ADEMAS SE RECOMIENDAN COLOCAR LA ROCA TRITURADA MÁS ALTA DE DICHA AREA, CON EL FIN DE EVITAR ACCIDENTES AL HACER CONTACTO CON LAS CERCAS, PUES AQUI SÉ PODRIAN PRESENTAR TENSIONES PELIGROSAS ESPECIALMENTE EN LAS PROYECCIONES AGUDAS Y EN LAS ESQUINAS.

## -DIMENSIONAMIENTO DE LA RED

LAS PROFUNDIDADES QUE SE HAN ESTABLECIDO POR NORMAS INTERNACIONALES Y DE NUESTRO PAIS, A LA QUE SE COLOCARA LA RED A PARTIR DE LA SUPERFICIE DEL SUELO ES DE 0.5 A 1 METRO; NO SE CONSIDERA CONVENIENTE HACERLO A MAYOR PROFUNDIDAD YA QUE A PESAR DE QUE TEORICAMENTE, AL AUMENTAR LA PROFUNDIDAD DISMINUYE LA RESISTENCIA DE LA RED, EL COSTO DE LA INSTALACION NO SE JUSTIFICA Y NO MUESTRA MEJORAS IMPORTANTES EN LA OPERACION DE LA RED.

SI EL AREA INTERESADA TIENE POR LADOS " $l_1$ " Y " $l_2$ " POR LO GENERAL LA LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR DE TIERRA SE DISMINUYE COMO UNA CUADRICULA ENTERRADA A LA PROFUNDIDAD YA ESTABLECIDA.

LAS DISTANCIAS A QUE SE LOCALIZAN LOS CONDUCTORES QUE FORMAN LA CUADRICULA SE CALCULA COMO SIGUE:



LA LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR TIERRA SERA:

$$L = l_1 \left( \frac{l_2}{D} + 1 \right) + l_2 \left( \frac{l_1}{D} + 1 \right) \dots \dots \dots EC.26$$

DONDE:

$$L = \frac{2l_1 l_2}{D} + l_1 l_2 \dots \dots \dots EC.27$$

ENTONCES :

$$D = \frac{2l_1 l_2}{L - l_1 - l_2} \dots \dots \dots EC.28$$

DONDE :

- D = LONGITUD DE CADA CUADRO.
- $l_1$  = LONGITUD DEL LADO MAYOR DEL RECTANGULO.
- $l_2$  = LONGITUD DEL LADO MENOR DEL RECTANGULO.
- L = LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR DE LA MALLA.

-NUMERO DE ELECTRODOS EN UN SISTEMA DE TIERRAS.

DIMENSIONAR ELECTRICAMENTE UN ELECTRODO DISPERSOR SIGNIFICA TERMINAR LAS DIMENSIONES EN FUSION DE LA RESISTENCIA A TIERRA QUE SE DESEA OBTENER.

EN LA PRACTICA SE RECURRE PARA EL DIMENSIONADO A FORMULAS EMPIRICAS O GRAFICOS QUE PROPORCIONAN UNA ORIENTACION PRIMARIA Y SE COMPRUEBA DURANTE LA INSTALACION. LA RESISTENCIA OBTENIDA, AUMENTANDO EVENTUALMENTE LA PROFUNDIDAD, LA EXTENSION O EL NUMERO DE DISPERSORES HASTA ALCANZAR LA RESISTENCIA DESEADA.

SU LOCALIZACION, PRIMORDIALMENTE, SE LLEVA A CABO DONDE LOS POTENCIALES SON MAYORES TALES COMO EN LAS ESQUINAS DE LA RED Y A TRAVES DEL CALCULO PARA REPRODUCIR LA RESISTIVIDAD DEL SISTEMA EN PUNTOS CLAVES.

EL TIPO DE ELECTRODO MAS COMUN Y AL CUAL NOS VAMOS A REFERIR EN ESTA TESIS ES EL ELECTRODO CILINDRICO O DE VARILLA DE 2.44 A 3.05 METROS CON UN DIAMETRO DE 1.6 CM. ( 5/8 " ). ESTE TIPO DE ELECTRODO TIENE LA VENTAJA DE QUE SE ENTIERRA A UNA RAZONABLE PROFUNDIDAD DEL TERRENO Y PUEDE ALCANZAR FRECUENTEMENTE CAPAS MAS PROFUNDAS EN LOS QUE SE HALLA UNA CONDUCTIVIDAD MAYOR.

LA RESISTENCIA DE UNA VARILLA COPPER WELD DE 5/8 " DE DIAMETRO POR 3.05 METROS DE LONGITUD EN CUALQUIER TERRENO ES:

$$R_v = \rho (0.41) \quad \Omega \dots\dots\dots EC 29$$

EL NUMERO DE VARILLAS SE DETERMINA EN FUNCION DEL AREA PARA ASEGURAR UNA RESISTENCIA DE 25  $\Omega$  COMO MAXIMA, MARCADA POR EL REGLAMENTO DE OBRAS E INSTALACIONES ELECTRICAS ( ROIE ). AUNQUE EN REALIDAD SIEMPRE SE UTILIZA COMO VALOR PRACTICO PARA INSTALACIONES INDUSTRIALES ES DE 1 A 6  $\Omega$ .

PARA CALCULAR EL NUMERO DE ELECTRODOS DE TIERRA QUE SE NECESITAN PARA OBTENER LA RESISTENCIA REQUERIDA EN LA SUBESTACION, SE PUEDE EMPLEAR LA FORMULA RECOMENDADA EN LA GUIA PARA LA SEGURIDAD EN LA PUESTA A TIERRA EN CORRIENTE ALTERNA DE IEEE:

$$N = \frac{\rho}{2\pi R_1 L_1} \left( L_n \left( \frac{4 L_1}{D} \right) - 1 \right) \dots\dots\dots EC 30$$

DONDE:

- N = NUMERO DE ELECTRODOS A TIERRA
- $L_1$  = LONGITUD DEL ELECTRODO
- b = RADIO DEL ELECTRODO
- $\rho$  = RESISTIVIDAD DEL TERRENO
- $R_1$  = RESISTENCIA DE LA TIERRA

PARA DETERMINAR LA MINIMA LONGITUD DEL CONDUCTOR CUANDO SE USAN ELECTRODOS DE TIERRA SE HACE EL SIGUIENTE RAZONAMIENTO:

LA DISTANCIA MINIMA ENTRE 2 VARILLAS ES  $2r$ ; DONDE  $r$ , ES EL RADIO DE UNA AREA PROTEGIDA POR UNA VARILLA, SIENDO EL AREA POR VARILLA:

$$A_v = \frac{A}{N} \dots\dots\dots EC.31$$

DONDE:

- $A_v$  = AREA PROTEGIDA POR UNA VARILLA.
- A = AREA DE LA SUBESTACION.
- N = NUMERO DE ELECTRODOS.

ENTONCES:

$$A_v = \pi r_1^2$$

DONDE

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

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

POR-LO TANTO; LA LONGITUD TOTAL MINIMA ES:

$$L = 2r_1^2 N^2 = 2N^2 \sqrt{\frac{A}{\pi N}} \dots\dots\dots EC.32$$

LA DISTANCIA DE SEPARACION ENTRE ELECTRODOS SERA:

$$r_1 = \sqrt{\frac{A}{\pi N}} \dots\dots\dots EC.33$$

ES NECESARIO CONSIDERAR QUE CON EL METODO ANTERIOR SE OBTIENE SOLO UNA ESTIMACION DEL NUMERO DE ELECTRODOS QUE SE REQUIEREN, DESPUES DE LA INSTALACION DEL SISTEMA DE TIERRAS SE DEBE MEDIR EL VALOR DE LA RESISTENCIA, DE MANERA QUE SI ES DEMASIADO ALTA, SE DEBEN AGREGAR OTROS ELECTRODOS HASTA OBTENER EL VALOR DESEADO DE LA RESISTENCIA DE TIERRA, EN ESTE CASO SE PUEDE USAR COMO GUIA LA SIGUIENTE EXPRESION:

$$N_a = N_c \left[ \left( \frac{R_m}{R_g} \right)^2 - 1 \right] \dots\dots\dots EC.34$$

DONDE:

- $N_a$  = NUMERO ADICIONAL DE ELECTRODOS POR AGREGAR.
- $N_c$  = NUMERO DE ELECTRODOS EXISTENTES.
- $R_m$  = RESISTENCIA DE TIERRA MEDIDA.
- $R_g$  = RESISTENCIA DE TIERRA DESEADA.

-RESISTENCIA POR SISTEMAS DE TIERRA

LA RESISTENCIA TOTAL DE LA MALLA CON RESPECTO A TIERRA SE PUEDE DETERMINAR SEGÚN LA FORMULA DE LAURENT MIE MANN, PUBLICADA EN " GUIA PARA SEGURIDAD EN LA CONEXIÓN A TIERRA DE SUBESTACIONES "; QUE COMO SE PUEDE OBSERVAR CON EL SEGUNDO TERMINO SE RECOMPENSA LA DIFERENCIA DE RESISTENCIAS QUE EXISTE UN AREA CIRCULAR Y UNA RED REAL:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \dots\dots\dots EC.35$$

DONDE:

**R = RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA DE TIERRAS.**

**r = RADIO EN METROS DE UNA AREA CIRCULAR CONTENIENDO  
LA ULTIMA AREA OCUPADA POR LA RED.**

**$\rho$  = RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL TERRENO.**

**L = LONGITUD TOTAL DE CONDUCTORES ENTERRADOS  
( VARILLAS, MARCOS, ETC. ).**

## CAPITULO V

### DISEÑO PRACTICO DE UN SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRAS

#### -OBSERVACIONES DEL DISEÑO PRELIMINAR

SI LOS CALCULOS REALIZADOS EN EL DISEÑO PRELIMINAR, INDICAN QUE PUEDEN EXISTIR DIFERENCIAS DE POTENCIAL PELIGROSAS, DEBEN CONSIDERARSE LAS SIGUIENTES SOLUCIONES Y APLICARLAS DONDE SEA APROPIADO.

- 1) REDUCIENDO LA RESISTENCIA TOTAL DE LA RED, REDUCIREMOS EL MAXIMO INCREMENTO DE POTENCIAL DE LA MISMA, Y POR LO TANTO LOS POTENCIALES TRANSFERIDOS. LA FORMA MÁS EFECTIVA PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE LA RED ES INCREMENTAR EL AREA OCUPADA POR LA RED. SI EL ESPACIO ES REDUCIDO ENTONCES SE SOLUCIONA AUMENTANDO ÉL NUMERO DE VARILLAS.
- 2) MEJORANDO EL CONTROL DE GRADIENTES, ESTO SE LOGRA MEDIANTE REJILLAS MAS CERRADAS, AUMENTANDO ÉL NUMERO DE CONDUCTORES EN PARALELO. CON ESTO LOS POTENCIALES PELIGROSOS DENTRO DE LA SUBESTACION PUEDEN QUEDAR ELIMINADOS TOTALMENTE, EL PROBLEMA ENTONCES ES PARA ELIMINAR POTENCIALES EN LA PERIFERIA DE LA SUBESTACION. PARA ELIMINAR LOS POTENCIALES PERIMETRALES, SE RECOMIENDA AGREGAR OTRO CABLE PERIMETRAL POR LA PARTE DE AFUERA DE LA RED, QUE VAYA PARALELAMENTE A LA RED PRELIMINAR, CON ESTO SE SOLUCIONA DEFINITIVAMENTE EL PROBLEMA.

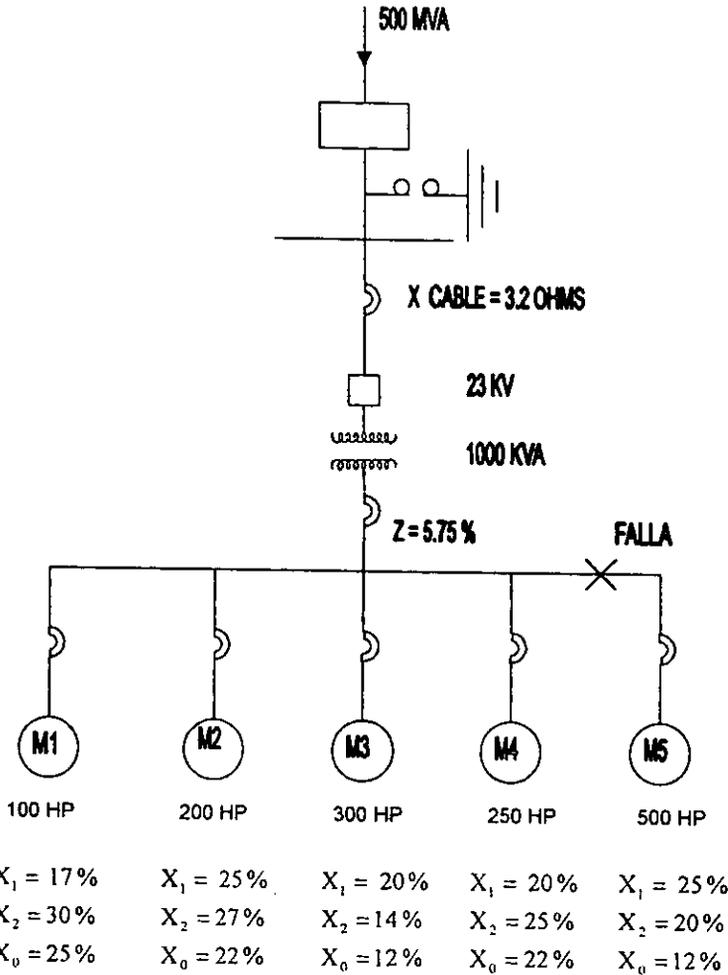
- 3) AUMENTAR LA RESISTENCIA DE LA SUPERFICIE PARA INCREMENTAR LAS RESISTENCIAS QUE ESTAN EN SERIE CON EL CUERPO HUMANO, LO CUAL SE LOGRA AUMENTANDO LA CAPA QUE CUBRE A UNA RED CON ROCA, GRAVA SECA, O ALGUN OTRO MATERIAL QUE OPERE COMO AISLANTE.
- 4) DIVERSIFIQUEMOS LA TRAYECTORIA DE LA CORRIENTE DE FALLA. CONECTANDO LA RED A PARTES METALICAS ATERRIZADAS EN ALGUNA FORMA, YA SEA DIRECTAMENTE O POR MEDIO DE HILOS DE GUARDA QUE A SU VEZ SE ATERRIZAN EN OTRA PARTE, TAL ES EL CASO DE LINEAS DE TRANSMISION.
- 5) LIMITANDO LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO FLUYENDO A TIERRA VALORES MENORES YA SEA MEDIANTE RESISTENCIAS O REACTANCIAS.
- 6) BLOQUEAR EL ACCESO DE AREAS LIMITANDO DONDE SEA PRACTICAMENTE IMPOSIBLE ELIMINAR LAS DIFERENCIAS DE POTENCIAL PELIGROSAS.

USANDO UNA O MÁS DE ESTAS POSIBILIDADES, EL DISEÑO SE PUEDE CONSIDERAR COMPLETO Y LISTO PARA LLEVARSE ACABO.

#### -DISEÑO PRACTICO DE UN SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRA

CON EL OBJETO DE MOSTRAR UN EJEMPLO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS, TOMAREMOS COMO BASE UNA PLANTA INDUSTRIAL CUYO DIAGRAMA UNIFILAR APARECE A CONTINUACION:

DIAGRAMA UNIFILAR



DONDE :

- $X_1$  = REACTANCIA DE SECUENCIA POSITIVA
- $X_2$  = REACTANCIA DE SECUENCIA NEGATIVA
- $X_0$  = REACTANCIA DE SECUENCIA CERO

CONSIDERANDO QUE TODOS LOS MOTORES TIENEN UN FACTOR DE POTENCIA E 85 % Y TOMANDO COMO VALORES BASE, 1000 KVA Y A LAS BASES DE TENSION INDICADAS EN CADA BARRA, LAS IMPEDANCIAS EN POR UNIDAD SON:

REACTANCIA DE LA RED:

$$X'' = X_1 = X_2 = X_6 = \frac{MVA_{BASE}}{MVA_{CR}} = \frac{1}{500} = 0.002 \text{ P.U.}$$

REACTANCIA DEL CABLE:

$$X'' = X_1 = X_2 = X_6 = \frac{X(\Omega) KVA_{BASE_2}}{KV^2 (1000)} = \frac{(3.2)(1000)}{(23)^2 (1000)} = 0.006 \text{ P.U.}$$

REACTANCIA DEL TRANSFORMADOR:

$$X'' = X_1 = X_2 = X_6 = X \left( \frac{KVA_{BASE_2}}{KVA_{BASE_1}} \right) \left( \frac{KV_{BASE_1}}{KV_{BASE_2}} \right)^2$$

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

DONDE:

$X(\Omega)$  = REACTANCIA REAL EN OHMS

$X$  = REACTANCIA A SU PROPIA BASE EN P.U.

$X''$  = REACTANCIA A LA BASE DESEADA EXPRESADA EN P.U.

$KVA_{BASE_2}$  = BASE DE POTENCIA A LA CUAL SE DESEA REFERIR LAS CANTIDADES.

$KVA_{BASE_1}$  = BASE DE POTENCIA A LA CUAL ESTAN EXPRESADAS LAS REACTANCIAS  $X$ .

$KV_{BASE_1}$  = BASE DE TENSION A LA CUAL ESTAN EXPRESADAS LAS REACTANCIAS  $X$ .

$KV_{BASE_2}$  = BASE DE TENSION A LA CUAL SE DESEA REFERIR LAS REACTANCIAS  $X$  PARA OBTENER LOS VALORES  $X''$ .

MOTORES:

$$KVA = \frac{(0.746) \text{ H.P.}}{F P}$$

MOTOR (1) = 100 H.P.

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

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

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

$$\dots \left( \frac{1000}{480} \right)^2 \dots$$

MOTOR ( 2 ) = 200 H.P.

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

$$X_1 = 0.25 \left( \frac{1000}{175.53} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 1.424 \text{ P.U.}$$

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

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

MOTOR ( 3 ) = 300 H.P.

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

$$X_1 = 0.20 \left( \frac{1000}{263.29} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 0.759 \text{ P.U.}$$

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

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

MOTOR ( 4 ) = 250 H.P.

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

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

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

$$X_0 = 0.22 \left( \frac{1000}{219.41} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 1.003 \text{ P.U.}$$

MOTOR ( 5 ) = 500 H.P.

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

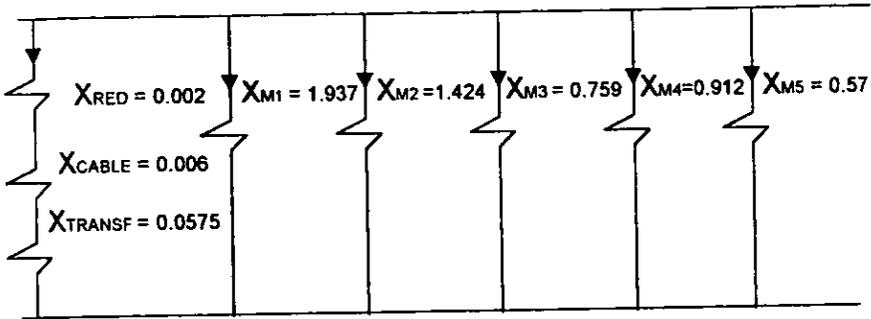
$$X_1 = 0.25 \left( \frac{1000}{438.82} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 0.570 \text{ P.U.}$$

$$X_2 = 0.20 \left( \frac{1000}{438.82} \right) \left( \frac{480}{480} \right)^2 = 0.456 \text{ P.U.}$$

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

A CONTINUACION SE MUESTRAN LOS DIAGRAMAS DE SECUENCIA RESPECTIVOS PARA ESTE SISTEMA.

SECUENCIA POSITIVA:



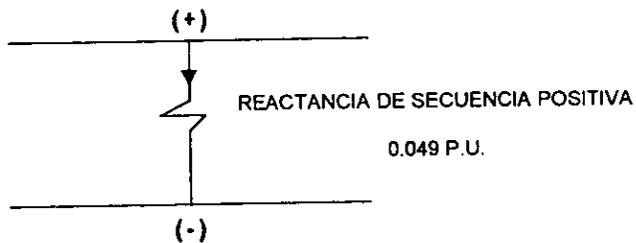
DONDE :

$$X_s = X_{RED} + X_{CABLE} + X_{TRANSF} = 0.002 + 0.006 + 0.0547 = 0.0655$$

$$X_{MOTORES} = \frac{X_{M1} X_{M2} X_{M3} X_{M4} X_{M5}}{X_{M1} + X_{M2} + X_{M3} + X_{M4} + X_{M5}} = \frac{(1.937)(1.424)(0.759)(0.912)(0.57)}{1.937 + 1.424 + 0.759 + 0.912 + 0.57} = 0.194$$

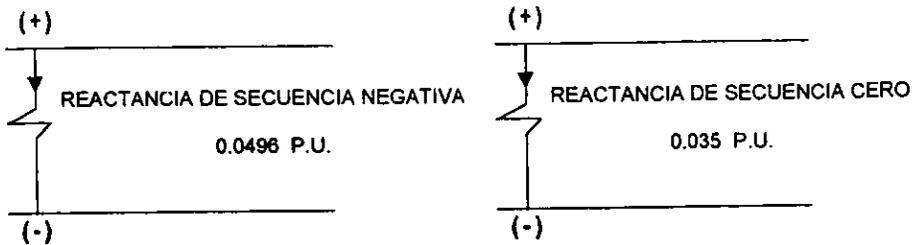


$$X_{PAR} = \frac{X_s X_{MOT}}{X_s + X_{MOT}} = \frac{(0.0655)(0.194)}{0.0655 + 0.194} = 0.049 \text{ P.U.}$$



DE LA MISMA MANERA SE CALCULAN LAS REACTANCIAS NEGATIVAS Y CERO

DANDO:



LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO SE OBTIENE USANDO LA ECUACION 8:

$$I_F = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{3}{0.049 + 0.0496 + 0.035} = 22.46 \text{ P.U.}$$

LA CORRIENTE EN AMPERES ES:

$$I_F = I_{P.U.} I_{BASE}$$

DONDE :

$$I_{BASE} = \frac{KVA_{BASE}}{KV \sqrt{3}} = \frac{1000}{(0.48) \sqrt{3}} = 1202.81 \text{ AMP. SIMETRICOS}$$

ENTONCES :

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

#### -DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA DE TIERRAS

EL DISEÑO DE CONEXIÓN DEL SISTEMA A TIERRA SE EFECTUARA CONSIDERANDO LOS SIGUIENTES DATOS:

CORRIENTE DE FALLA A TIERRA	27015.11	AMP.
DURACION DE LA FALLA	0.5	SEG.
AREA CUBIERTA POR LA SUBESTACION	60 x 90	MTS.
TEMPERATURA AMBIENTE	30	°C.
RESISTIVIDAD PROMEDIO DEL SUELO	200	Ω-MTS.
RESISTIVIDAD SUPERFICIAL ( RECUBRIMIENTO DE CONCRETO )	7000	Ω-MTS.

PROFUNDIDAD DE LA RED	0.5 MTS.
TIPO DE CONECTOR	MECANICO
TENSION DE OPERACIÓN	23 / 48 KV

1 ) AJUSTE DE LA CORRIENTE DE FALLA POR LOS FACTORES DEL CRECIMIENTO DEL SISTEMA Y DE DECREMENTO.

EL TIEMPO DE DURACION DE LA FALLA DE ACUERDO A LOS SISTEMAS DE PROTECCION LO CONSIDERAREMOS DE 0.5 SEGUNDOS Y CON LA AYUDA DE LA TABLA NUMERO 6 EL FACTOR DE DECREMENTO ES:

$$D = 1.00$$

EL FACTOR DE CRECIMIENTO ES DE  $C = 1.00$  YA QUE NO SE TIENEN PROGRAMADAS FUTURAS AMPLIACIONES, POR LO TANTO:

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

$$I = 27015.11(1)(1) = 27015.11 \text{ AMP.}$$

2 ) SECCION MINIMA PARA EL CONDUCTOR DE LA RED.

PARA DETERMINAR LA SECCION DEL CONDUCTOR REQUERIDO UTILIZAREMOS LA ECUACION 14:

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

DONDE :

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

DONDE :

- S = AREA DEL CONDUCTOR DE LA RED EN CENTIMETROS
- I = CORRIENTE MAXIMA DE FALLA SIMETRICA = 27015.11 AMP.
- t = TIEMPO DE DURACION DE LA FALLA = 0.5 SEG.
- T<sub>a</sub> = TEMPERATURA AMBIENTE = 30 °C.
- T<sub>m</sub> = TEMPARATURA MAXIMA PERMISIBLE DEL TRABAJO DEL CONECTOR MECANICO = 450 °C.

DONDE:

$$S = \frac{27015.11}{\sqrt{\frac{\text{Log}\left(\frac{450-30}{234+30} + 1\right)}{33(0.5)}}} = \frac{27015.11}{0.1583} = 170657.68 \text{ CM.}$$

DE ACUERDO A LA TABLA NUMERO 8 EL CONDUCTOR ADECUADO PARA CUBRIR ESTA AREA, ES EL CONDUCTOR DE COBRE A.W.G. DE CALIBRE 4 / 0, EL CUAL TIENE UN AREA DE A = 107.23 MM<sup>2</sup>. Y UN DIAMETRO DE D = 11.7 MM.

3 ) LONGITUD MINIMA REQUERIDA PARA LA RED.

CON BASE A LAS NORMAS TECNICAS, SE PROPONE UN DISEÑO PRELIMINAR EN FORMA DE MALLA, CON UNA SEPARACION ENTRE CONDUCTORES DE 3 A 6 METROS POR RECOMENDACIÓN DE LA MISMA NORMA EN LA SECCION 603, POR LO TANTO, TOMANDO COMO BASE ESTA RECOMENDACION, TOMAREMOS UNA SECCION ENTRE CONDUCTORES DE

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

A CONTINUACION CALCULAREMOS EL NUMERO DE CONDUCTORES VERTICALES Y HORIZONTALES:

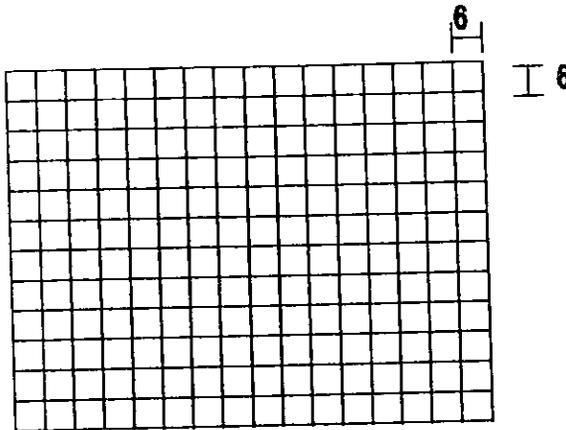
NUMERO DE CONDUCTORES VERTICALES:

$$n_1 = \frac{\text{DIMENSION HORIZONTAL DE LA RED}}{\text{SEPARACION ENTRE CONDUCTORES}} = \frac{90}{6} + 1 = 16$$

NUMERO DE CONDUCTORES HORIZONTALES

$$n_2 = \frac{\text{DIMENSION VERTICAL DE LA RED}}{\text{SEPARACION ENTRE CONDUCTORES}} = \frac{60}{6} + 1 = 11$$

POR LO TANTO NUESTRA RED QUEDA DE LA SIGUIENTE MANERA:



CON TODO LO ANTERIOR TENEMOS QUE LA LONGITUD TOTAL SERA:

$$L = n_1 L_2 + n_2 L_1 = 11(90) + 16(60) = 1950 \text{ METROS}$$

ESTE VALOR LO COMPARAMOS CON EL QUE SE OBTIENE DE LA EC. 23.

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

CALCULO DEL FACTOR  $K_m$

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

$D = 6$  METROS, SEPARACION ENTRE CONDUCTORES PARALELOS.

$h = 0.5$  METROS, PROFUNDIDAD DE LA RED.

$d = 0.0117$  METROS, DIAMETRO DEL CONDUCTOR.

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

$$K_m = 0.694$$

CALCULO DEL FACTOR  $K_i$ :

$$K_i = 0.65 + 0.127 n$$

DONDE :

$n = 11$  NUMERO MENOR DE CONDUCTORES PARALELOS EN UN SENTIDO.

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

POR LO TANTO:

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

DEBIDO A QUE LA LONGITUD ESTIMADA DE 1950 METROS. ES MENOR A LA LONGITUD REQUERIDA DE 3516.79 METROS., EL DISEÑO ANTERIOR QUEDA DESCARTADO.

HACIENDO REFERENCIA A INVESTIGACIONES HECHAS POR EL IIE PUBLICADAS EN SU GUIA PARA EL DISEÑO DE REDES DE TIERRA, EN EL CUAL, SE ESTABLECE QUE, PARA ÉL CALCULO DE LA LONGITUD DEL CONDUCTOR SÉ UTILIZE UN VALOR COMPRESIBLE ENTRE 1 Y 3 PARA EL PRODUCTO Km Ki YA QUE DENTRO DE ESTE RANGO, POR LO GENERAL, OCILA DICHO PRODUCTO.

PARA UNA MAYOR EFICACIA DE LA RED, SE RECOMIENDA TOMAR UN VALOR DE 1.5 PARA EL PRODUCTO, YA QUE CON TOMAR UN VALOR DE 3 SE DISEÑA UNA RED RESTRINGIDA.

POR LO TANTO TENEMOS:

$$L = \frac{1.5 \rho l \sqrt{t}}{165 + 0.25 \rho s} = \frac{(1.5)(200)(27015.11)(\sqrt{0.5})}{165 + 0.25(7000)} = 2992.57 \text{ METROS.}$$

CON ESTA NUEVA LONGITUD CALCULAMOS LA SEPARACION ENTRE CONDUCTORES, SEGÚN LA ECUACION 28:

$$D = \frac{2L_1 L_2}{L - L_1 - L_2} = \frac{(2)(90)(60)}{2992.57 - 90 - 60} = 3.8 \text{ METROS} \approx 4 \text{ METROS.}$$

COMO ESTA LONGITUD DE SEPARACION SE ENCUENTRA COMPREDIDA EN EL RANGO QUE RECOMIENDAN LAS NORMAS TECNICAS, TOMAREMOS UNA SEPARACION ENTRE CONDUCTORES DE 4 METROS. POR LO CUAL LA CONFIGURACION NOS QUEDA COMO SIGUE:

NUMERO DE CONDUCTORES VERTICALES

$$n_1 = \frac{\text{DIMENSION HORIZONTAL DE LA RED}}{\text{SEPARACION ENTRE CONDUCTORES}} + 1 = \frac{90}{4} + 1 = 24$$

NUMERO DE CONDUCTORES HORIZONTALES

$$n_2 = \frac{\text{DIMENSION VERTICAL DE LA}}{\text{SEPARACION ENTRE CONDUCTORES}} + 1 = \frac{60}{4} + 1 = 16$$

LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR:

CONDUCTORES VERTICALES	=	1440 METROS
CONDUCTORES HORIZONTALES	=	1440 METROS
TOTAL	=	2880 METROS

COMO ESTE VALOR 2880 METROS ES MENOR A LA LONGITUD CALCULADA DE 2992.57 METROS; ESTA LONGITUD DEBE SER CUBIERTA PARA TENER UN VALOR DE SEGURIDAD. PARA CUBRIR ESTA LONGITUD ANALIZAMOS LA OPCION DE UTILIZAR ELECTRODOS. LA LONGITUD A CUBRIR ES DE 112.57 METROS UTILIZANDO VARILLAS COPERWELD DE 3.05 METROS, TENEMOS:

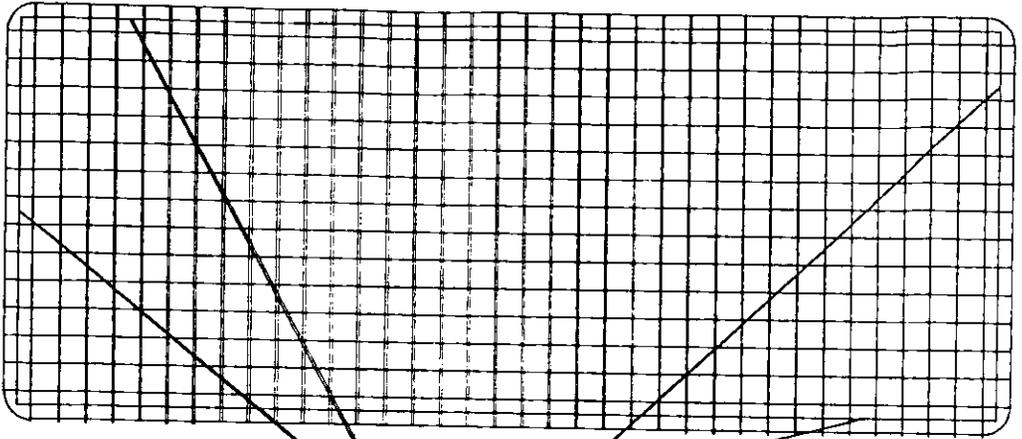
$$\text{NUMERODE VARILLAS} = \frac{112.57}{3.05} = 36.9 \approx 37 \text{ VARILLAS.}$$

PARA LA INSTALACION UNIFORME DE ESTAS VARILLAS CONSIDERAREMOS UNA SEPARACION DE 2 VECES LA LONGITUD DE DICHA VARILLA:

$$\text{NUMERO DE VARILLAS} = \frac{90}{6} + 1 \left( \frac{60}{6} \right) + 1 = 176 \text{ VARILLAS.}$$

SEGÚN EL ANALISIS ANTERIOR OBSERVAMOS QUE ÉL NUMERO DE VARILLAS REQUERIDAS ( 37 VARILLAS ) NO SOBREPASA ÉL NUMERO DE VARILLAS POSIBLES POR INSTALAR ( 176 VARILLAS ) SIN LLEGAR A SATURAR LA MALLA Y CON ESTO OBTENDREMOS LA LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR.

A CONTINUACION PROCEDEREMOS A AUMENTAR LOS CONDUCTORES DE REFORZAMIENTO; ESTO SE HACE CON LA FINALIDAD DE EVITAR CONCENTRACIONES DE CORRIENTES Y, POR LO TANTO, GRADIENTES DE POTENCIAL ELEVADOS EN LOS EXTREMOS DE LOS CABLES; REDONDEANDO TAMBIEN LAS ESQUINAS DE LA MALLA COMO SE MUESTRA A CONTINUACION EN LA FIG. 36.



**FIG. 36 CONDUCTORES DE REFORZAMIENTO**

POR LO TANTO LA LONGITUD TOTAL DE LA RED SERA.

LONGITUD DEL CONDUCTOR = 2880 METROS

CONDUCTORES DE REFORZAMIENTO = 300 METROS

TOTAL = 3180 METROS

**4 ) RESISTENCIA DE LA RED**

LA RESISTENCIA DE LA RED LA CALCULAMOS SEGÚN LA ECUACION 35

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

**DONDE**

**R = RESITENCIA TOTAL DEL SISTEMA DE TIERRAS**

**r = RADIO EN METROS DE UN AREA CIRCULAR CONTENIENDO LA MISMA AREA OCUPADA POR LA RED**

**L = LONGITUD TOTAL DE CONDUCTORES ENTERRADOS ( VARILLAS, MARCOS, ETC )**

**$\rho$  = RESISTENCIA ELECTRICA DEL TERRENO EN OHMS - METRO**

DONDE :

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{5400}{\pi}} = 41.41 \text{ METROS.}$$

ENTONCES :

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

EL VALOR OBTENIDO DE LA RESISTENCIA TOTAL ES CORRECTO, DEBIDO A QUE LAS NORMAS HACEN REFERENCIA, DE QUE EL VALOR NO SE DEBE SOBREPASAR DE LOS 10 OHMS.

5 ) TENSION MAXIMA DE LA RED.

SEGÚN LA LEY DE OHM TENEMOS:

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

6 ) TENSION DE CONTACTO.

LA TENSION DE CONTACTO SE CALCULA SEGÚN LA ECUACION 19:

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

DONDE :

$$K_m K_i = 1.5$$

$$I = 27015.17 \text{ AMP.}$$

$$\rho = 200 \text{ } \Omega\text{-METRO.}$$

$$L = 3180 \text{ METROS.}$$

ENTONCES :

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

7 ) TENSION DE PASO.

SEGÚN LA ECUACION 24:

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

DONDE :

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

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{4+0.5} + \frac{1}{2(4)} + \frac{1}{3(4)} + \dots + \frac{1}{36(4)} \right)$$

$$K_s = 0.5785$$

ENTONCES :

$$E_{\text{PASO}} = \frac{(0.5785)(3.4)(27015.17)(200)}{3180} = 3341.89 \text{ VOLTS.}$$

8 ) TENSIONES TOLERABLES.

LAS TENSIONES TOLERABLES ESTAN DADAS POR LAS ECUACIONES:

$$E_{c_i} = \frac{165 + 0.25 \rho s}{.1}$$

$$E_{p_i} = \frac{165 + \rho s}{.1}$$

DONDE :

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

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

CON LOS LIMITES TOLERABLES ANTERIORES Y LAS TENSIONES DE CONTACTO Y DE PASO TENEMOS LA SIGUIENTE RELACION:

$$\begin{array}{l} E_{\text{PASO}} < E_{p_i} & ; & 3341.89 < 10132.84 \\ E_{\text{CONTACTO}} > E_{c_i} & ; & 5448.60 > 2708.22 \end{array}$$

POR TODO LO ANTERIOR SE CONCLUYE QUE LA RED ES OPTIMA Y CUMPLE CON LOS LIMITES DE SEGURIDAD; POR LO TANTO LA RED QUEDA APROBADA.

## -MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE TIERRAS

POR LA IMPORTANCIA QUE TIENE DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA SEGURIDAD, LAS PRESCRIPCIONES REGLAMENTARIAS SEÑALAN QUE LA INSTALACION DE UNA TOMA DE TIERRA DEBE COMPROBARSE EN EL MOMENTO DE SU MONTAJE Y REVISARSE CADA 6 AÑOS EN LA EPOCA EN QUE EL TERRENO ESTE MAS SECO. PARA ELLO SE MEDIRA POR PROCEDIMIENTOS ADECUADOS, LA RESISTENCIA DE PASO A TIERRA, REPARANDO INMEDIATAMENTE LOS DEFECTOS QUE SE ENCUENTREN. EN LOS LUGARES EN QUE EL TERRENO NO SEA FAVORABLE PARA LA BUENA CONSERVACION DE LAS TOMAS DE TIERRA, ESTAS, ASI COMO LOS CONDUCTORES DE ENLACE DESDE ELLAS HASTA LOS CONDUCTORES DE EMPALME A LA INSTALACION QUE PROTEJAN, SE PONDRAN AL DESCUBIERTO PARA SU EXAMEN UNA VEZ CADA NUEVE AÑOS POR LO MENOS. LAS TOMAS DE TIERRA DE CARACTERISTICAS ESPECIALES SE REVISARAN OBLIGATORIAMENTE CADA 3 AÑOS.

## -RECOMENDACIONES PARA UN SISTEMA DE TIERRAS

- 1) NO DEBEN INSTALARSE LAS TOMAS DE TIERRA DIRECTAMENTE DENTRO DEL AGUA PUES, AUNQUE DISUELVE LAS SALES DEL TERRENO, RESULTA POR SI MISMA SER MALA CONDUCTORA Y ADEMAS EXISTE MAYOR PELIGRO DE CORROSION.
- 2) SE RECOMIENDA TRATAR TERRENOS CON SAL COMUN, LA CUAL ACTUA SOBRE EL AGUA HACIÉNDOLA MEJOR CONDUCTORA.
- 3) DEBE EVITARSE, EN LO POSIBLE LA INSTALACION DE TOMAS DE TIERRA EN TERRENOS CORROSIVOS ( BASURAS, ESCORIAS, DESECHOS INDUSTRIALES ). EN TALES CONDICIONES O EN CASO DE TERRENOS SALADOS ( PLAYA DEL MAR ), ES CONVENIENTE EMPLEAR SIEMPRE VARILLA EN LUGAR DE CABLE CONDUCTOR, ENFUNDÁNDOLO EN TUBO DE PLASTICO EN LA PARTE ENTERRADA, DESDE UNOS 30 CENTIMETROS ENCIMA DEL SUELO HASTA EL EMPALME CON LA PLACA O ESTACA.

- 4 ) EN LAS TOMAS DE TIERRA EN SITIOS PAVIMENTADOS, SE PROCURARA QUE EL CONDUCTOR DE TIERRA NO QUEDE APRISIONADO EN EL PAVIMENTO. DEJANDO ALREDEDOR UN ESPACIO SIN PAVIMENTAR, QUE SE RELLENARA CON UNA CAPA DE TIERRA APRISIONADA ENCIMA DE LA CARBONILLA DE COKE Y CON OTRA CAPA DE GRAVA Y ARENA. DE ESTA FORMA SE FACILITA LA PENETRACION DEL AGUA DE LLUVIA HASTA LA TOMA DE TIERRA, CONSERVANDO LA CONDUCTIVIDAD DEL TERRENO EN SUS INMEDIACIONES.
- 5 ) SE RECOMIENDA QUE TODO SISTEMA DE MAS DE 150 VOLTS SE DEBE CONECTAR A TIERRA.
- 6 ) EN CUALQUIER CASO EN QUE SE UTILICE ENERGIA ELECTRICA ( INCLUYENDO INSTALACIONES ELECTRICAS ), DEBE ANALIZARSE EL RIESGO QUE PUDIERA PRESENTARSE AL PERSONAL EN CASO DE FALLA Y EN BASE A ELLO DECIDIR SI EL SISTEMA REQUIERE ATERRIZARSE.
- 7 ) SE RECOMIENDA UNA VERIFICACION PERIODICA DE LAS CONDICIONES Y EFECTIVIDAD DE LOS SISTEMAS DE TIERRA, PRINCIPALMENTE DE LA RESISTENCIA DE TIERRA, POR LO MENOS UNA VEZ AL AÑO EN EPOCA DE SEQUIA.
- 8 ) SE RECOMIENDA QUE SI SE TIENE VARIOS SISTEMAS DE TIERRA EN UNA MISMA INSTALACION ESTOS DEBEN INTERCONECTARSE.
- 9 ) HACER UN ANALISIS DE LAS DESVENTAJAS DE INTERCONECTARSE SISTEMAS DE TIERRA A SISTEMAS CONTRA LAS DESCARGAS ADMSOFERICAS..
- 10 ) DEBEN MARCARSE CLARAMENTE LA IMPORTANCIA Y NECESIDAD DEL USO DE LOS SISTEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA EN TODA INSTALACION ELECTRICA, DE TRANSMISION, COMERCIAL, INDUSTRIAL, ETC.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

LOS PRINCIPALES OBJETIVOS QUE SÉ PERSIGUEN CON LA CONEXIÓN A TIERRA DE EQUIPOS, SE CONCRETAN A LA OBTENCION DE SEGURIDAD PARA EL PERSONAL DE OPERACIÓN, ASEGURÁNDOSE DE QUE EN LAS ESTRUCTURAS DE ACERO, BASTIDORES DE MAQUINARIA, CARCAZAS DE EQUIPO ELECTROMECHANICO, Y CUALQUIER OTRA CLASE DE CUERPOS METALICOS QUE ENCIERRAN CIRCUITOS ELECTRICOS O ESTEN EN SU INMEDIATA CERCANIA, SE MANTENGA EL MISMO POTENCIAL DE TENSION QUE EN TIERRA.

EL CONTACTO ACCIDENTAL ENTRE UN CUERPO METALICO NO CONECTADO A TIERRA Y UN CIRCUITO ELECTRICO, ELEVA EL POTENCIAL DE ESE CUERPO AL MISMO QUE TIENE EL CIRCUITO CON TIERRA. SI EL CUERPO CORRESPONDE AL BASTIDOR DE UNA MAQUINA, O A LA CAJA DE UN INTERRUPTOR O A CUALQUIER ELEMENTO ESTRUCTURAL, ESTE SÉ CONVERTIRA EN UN SERIO PELIGRO AL SER TOCADO POR ALGUNA PERSONA.

LA CONEXIÓN A TIERRA TIENDE TAMBIEN A EVITAR LA ELEVACION DE POTENCIAL DEL CUERPO METALICO CON RESPECTO A LA TIERRA Y, A PESAR DE QUE LLEGARA A CORRER POR DICHO CUERPO UNA FUERTE CORRIENTE ELECTRICA, NO PRESENTARA NECESARIAMENTE EL PELIGRO DE CHOQUES ELECTRICOS AL TOCARLO.

POR LO TANTO ES NECESARIO QUE TODOS ESTOS CUERPOS DE METAL ESTEN CONECTADOS EN FORMA PERMANENTE Y EFECTIVA A TIERRA A TRAVES DE ELEMENTOS DE UNION DE BAJA IMPEDANCIA, CON SUFICIENTE CAPACIDAD CONDUCTIVA DE CORRIENTE.

LA CONEXIÓN A TIERRA TIENE QUE SER SUFICIENTE, TANTO PARA LA CORRIENTE NORMAL, COMO PARA LA QUE SE PUEDA PRODUCIR POR EL EFECTO DE FALLAS.

LA RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS DE INTERCONEXION ENTRE LOS CUERPOS DE METAL Y TIERRA TIENEN QUE MANTENERSE DENTRO DE VALORES MUY

BAJOS, PARA SOSTENER LA EFECTIVIDAD DE LA UNION A TIERRA. EL OBJETO ES LOGRAR QUE LA DIFERENCIA DE POTENCIAL PERMANEZCA TAN REDUCIDA COMO SEA POSIBLE PARA OBTENER EL MAXIMO DE CORRIENTE HACIA TIERRA EN EL MOMENTO DADO. ASI MISMO UNA GRAN IMPEDANCIA EN LAS UNIONES Y CONEXIONES O INSUFICIENTE SECCION TRANSVERSAL EN LOS CIRCUITOS DEL SISTEMA DE TIERRAS PUEDE ORIGINAR ARQUEOS O CALENTAMIENTOS DE SUFICIENTE MAGNITUD PARA INICIAR LA IGNICION DE MATERIALES COMBUSTIBLES O GASES EXPLOSIVOS CERCA DEL PUNTO DE ARQUEO.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- SISTEMANS DE TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA  
S. ROBERT EATON
  
- 2.- ELEMENTOS DE DISEÑO DE SUBESTACIONES ELECTRICAS  
ENRRIQUES HARPER
  
- 3 .- INDUSTRIAL POWER SYSTEMS HANDBOOK  
BEEMAN Mc GRAW HILL
  
- 4.- IEEE GUIDA FOR SAFETY IN ALTERNATING COURRENT  
SUBESTACION GROUNDING No 80 IEEE
  
- 5.- NORMAS TECNICAS PARA INSTALACIONES ELECTRICAS  
SECRETARIA DE MINAS E INDUSTRIA
  
- 6.- NATIONAL ELECTRICAL CODE  
NATIONAL FIRE PROTECCION ASSOCIATION
  
- 7.- GROUND CONNECTIONS FOR ELECTRICAL SYSTEMS  
PETERS O. S.
  
- 8.- REGLAMENTO DE OBRAS E INSTALACIONES ELECTRICAS ( ROIE )  
DIRECCION DE NORMAS SIC
  
- 9.- IEEE RECOMENDE PRACTICE FOR MGROUNDING OF  
INDUSTRIAL AND COMERCIAL POWER SYSTEMS
  
- 10.- INSTALACIONES DE PUESTAS A TIERRA  
VITTORIO RE MACOMBO BOIXAREL EDITORES