

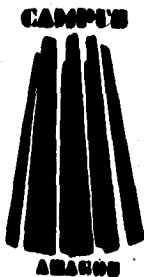
24
2ej
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

CAMPUS ARAGÓN

**" METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAR UN SISTEMA
DE CONEXION A TIERRA "**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :

SALVADOR JORGE GONZALEZ LOPEZ.



DIRECTOR DE TESIS:
ING. J. J. RAMON MEJIA ROLDAN.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1996.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO CAMPUS "ARAGÓN"
JEFATURA DE CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

OF.No. JCIME/094/96.

LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS.
JEFE DE LA UNIDAD ACADÉMICA.
PRESENTE.

Por este medio me permito relacionar los nombres de los Profesores que sugiero integren el Síndico del Examen Profesional del alumno: GONZALEZ LOPEZ SALVADOR JORGE, con el tema de tesis: "METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE CONEXION A TIERRA".

PRESIDENTE:	ING. RAUL BARRON VERA.	OCTUBRE, 78
VOCAL:	ING. J.J. RAMON MEJIA ROLDAN.	MARZO, 85
SECRETARIO:	ING. JORGE RODRIGUEZ LUNA.	MAYO, 89
SUPLENTE:	ING. DAVID MOISES TERAN PEREZ.	MAYO, 90
SUPLENTE:	ING. ABEL VERDE CRUZ.	ABRIL, 95

Quiero subrayar que el Director de la Tesis es el ING. J.J. RAMON MEJIA ROLDAN, el cual es incluido en base a lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

San Juan de Aragón, Edo. de México, 12 de Marzo de 1996.

JEFE DE CARRERA



ING. RAUL BARRON VERA

c.c.p. Ing. Manuel Martínez Ortiz - Jefe del Depto. de Servicios Escolares.
Ing. Miguel Ángel Maldonado Muñoz - Secretario Técnico de IME
Ing. J.J. RAMON MEJIA ROLDAN - ASESOR DE TESIS
ALUMNO.

DESPEDIDO A:

PARIENTES Y AMIGOS A
MRS. GARCIA,
YOLANDA ROSA DE DONZAPAZ
Y
JENIS DONZAPAZ STEINBERG

MRS. STEINBERG,
SERGIO, YOLANDA, GONZALO Y
CARINA.

A TODOS MIS AMIGOS.

A TODOS MIS PROFESORES.

A MI DIRECTOR DE TESIS:
ING. J. J. RAMON MESTRE RAMON.

DESPEDIDO A MI PADRE:
ING. JUAN MENDEZ MORENO (†)

INDICE.

CAPITULO No.1

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

1.1 INTRODUCCION.....	2
1.2 NECESIDADES DE LA CONEXION A TIERRA.....	5
1.3 SENSIBILIDAD Y LIMITES TOLERABLES DEL HOMBRE.	
A LA CORRIENTE ELECTRICA.....	6
1.3.1 FRECUENCIA.....	7
1.3.2 MAGNITUD.....	7
1.3.3 DURACION.....	7
1.4 TENSION DE PASO, CONTACTO Y TRANSFERENCIA.....	9
1.4.1 CLASIFICACION DE LAS DISPOSICIONES DE	
CONEXION A TIERRA.....	15
1.4.2 CONEXION RADIAL.....	15
1.4.3 CONEXION EN ANILLO.....	15
1.4.4 CONEXION EN MALLA.....	15
1.4.5 RESISTENCIA DE UNA TOMA DE CORRIENTE.....	18
1.5 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE SISTEMA PRACTICO	
DE CONEXION A TIERRA.....	20
1.5.1 INVESTIGACION DE LAS CARACTERISTICAS	
DEL SUELO.....	21
1.5.2 RESISTIVIDAD DE LA TIERRA.....	21
1.5.3 VARIACION DE LA RESISTIVIDAD CON RESPECTO A LA	
HUMEDAD Y SALES CONTENIDAS EN EL TERRENO.....	23

1.5.4	EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA.....	26
1.5.5	METODOS DE LA RESISTIVIDAD EN EL TERRENO.....	28
1.5.6	PROCESOS DE MEDICION.....	36
1.5.7	MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE TIERRA.....	36
1.5.8	EL EFECTO DEL TAMAÑO DEL ELECTRODO.....	37
1.5.9	USO DE VARIOS ELECTRODOS.....	38
1.5.10	TRATAMIENTO QUIMICO DEL SUELO.....	40
1.5.11	METODOS DE APLICACION DEL TRATAMIENTO QUIMICO.....	41
1.5.12	DETERMINACION DE LA MAXIMA CORRIENTE A TIERRA.....	43
1.5.13	COMPENSACION POR EFECTO DE CORRIENTE DIRECTA EL FACTOR DE DECREMENTO.....	47
1.5.14	FACTOR DE SEGURIDAD POR CRECIMIENTO DEL SISTEMA.....	49
1.5.15	EFFECTO DE LA RESISTENCIA DEL TERRENO.....	50
1.6	DISEÑO PRELIMINAR DE UNA CONEXION A TIERRA.....	50
1.6.1	DISEÑO PRELIMINAR DE UNA RED DE TIERRAS.....	51
1.6.2	CONEXIONES A LA RED.....	52
1.6.3	LONGITUD DEL CONDUCTOR REQUERIDO PARA CONTROL DEL GRADIENTE DE POTENCIAL.....	54
1.7	EFFECTO POR IRREGULARIDADES FACTOR K_1	57
1.8	DETERMINACION DEL NUMERO DE VARILLAS ELECTRODOS A TIERRA.....	61
1.8.1	CALCULO DE LA RESISTENCIA DEL	

SISTEMAS DE TIERRA.....	63
1.8.2 CALCULO DEL MAXIMO INCREMENTO DE POTENCIAL DE LA RED.....	63
1.8.3 CORRECCION O REFINAMIENTO DEL DISEÑO PRELIMINAR.....	63

CAPITULO No.2

PROTECCION CONTRA EL RAYO Y LA ELECTRICIDAD ESTATICA

2.1 INTRODUCCION.....	66
2.2 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA PROTECCION CONTRA RAYOS.....	66
2.2.1 FORMACION DE LAS DESCARGA ATMOSFERICAS.....	67
2.2.2 CARACTERISTICAS DE LAS DESCARGAS DIRECTAS.....	69
2.3 EFECTOS PRODUCIDOS POR LOS RAYOS.....	69
2.3.1 EFECTOS TERMICOS.....	69
2.3.2 EFECTOS DINAMICOS.....	70
2.4 SISTEMAS DE PROTECCION.....	71
2.4.1 PROTECCION PASIVA.....	71
2.4.2 PROTECCIONES ACTIVAS.....	73
2.4.3 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE PARARRAYOS.....	74
2.4.3 FACTORES QUE DETERMINAN LA NECESIDAD DE PROTECCION.....	75
2.5 CRITERIO DE DISEÑO.....	76
2.5.1 UBICACION DE LAS PUNTAS.....	77
2.5.2 ESPACIAMIENTO DE LAS PUNTAS DE PROTECCION.....	77

2.5.3	TRAYECTORIA DE CONDUCTORES DE BAJADA.....	78
2.5.4	CONEXIONES A TIERRA.....	79
2.5.5	CONEXIONES ADICIONALES.....	79
2.5.6	DISPOSITIVOS DE PROTECCION COMPLEMENTARIA.....	80
2.6	PROTECCION CONTRA LA GENERACION DE	
	ELECTRICIDAD ESTATICA.....	80
2.6.1	FUNDAMENTOS ACERCA DE LAS CAUSAS DE LA	
	ELECTRICIDAD ESTATICA.....	81
2.6.2	CONDICIONES QUE AFECTAN LA PRODUCCION DE	
	CARGAS ESTATICAS.....	81
2.6.3	CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES.....	82
2.6.4	VELOCIDAD DE SEPARACION.....	82
2.6.5	AREA DE CONTACTO.....	82
2.6.6	CONDICIONES ATMOSFERICAS.....	82
2.7	VOLTAJES POSIBLES QUE SE PUEDEN ESPERAR	
	EN ALGUNOS PROCESOS.....	83
2.7.1	METODOS DE DETECCION DE CARGAS	
	ELECTOSTATICAS.....	84
2.7.2	METODOS Y ELEMENTOS DE PROTECCION.....	87
2.7.3	CONTROL DE HUMEDAD.....	87
2.7.4	EFFECTO ELECTROSTATICO.....	88
2.7.5	PISOS CONDUCTORES.....	88
2.7.6	PROTECCION DE EQUIPOS ELECTRICOS CONTRA	
	DESCARGAS ATMOSFERICAS.....	88
2.8	CARACTERISTICAS DE LAS DESCARGAS	
	ATMOSFERICAS Y SUS EFECTOS.....	88

2.8.1 AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS.....	92
2.8.2 APARTARRAYOS (TIPO Y FUNCIONAMIENTO).....	93
2.8.3 SELECCION Y APLICACION.....	94
2.8.4 LOCALIZACION.....	94

CAPITULO No. 3

PROTECCION CONTRA FALLA A TIERRA

3.1 INTRODUCCION.....	98
3.2 FALLAS DE ARQUEO.....	98
3.2.1 FALLAS A TIERRA FRANCA.....	99
3.3 CALCULO DE LAS CORRIENTES DE FALLA A TIERRA.....	99
3.3.1 SELECCION DEL DISPOSITIVO DE PROTECCION.....	101
3.4 METODOS DE DETECCION Y PROTECCION DE FALLA A TIERRA.....	103
3.4.1 CONEXION RESIDUAL.....	104
3.5 PROTECCION CON EL NUCLEO BALANCEADO.....	105
3.5.1 PROTECCION DE TIERRA DIFERENCIAL.....	107
3.5.2 PROTECCION DE RETORNO DE TIERRA.....	107
3.5.3 DETECCION DE LA FALLA A TIERRA.....	109
3.5.4 DETECCION E IDENTIFICACION DE LA FALLA A TIERRA.....	109

CAPITULO No. 4

CRITERIOS DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA (BAJA Y MEDIANA TENSION)

4.1 DISEÑO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

PARA BAJA TENSION.....	112
4.2 DISEÑO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	
PARA MEDIANA TENSION.....	131

CAPITULO No. 5
EJEMPLO DE APLICACION.

5.1 EJEMPLO DE APLICACION.....	156
---------------------------------------	------------

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES.....	176
--------------------------	------------

APENDICE

APENDICE (Y GLOSARIO).....	183
-----------------------------------	------------

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA.....	198
--------------------------	------------

CAPITULO No. 1

" ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA "

CAPITULO 1

1.1 INTRODUCCION.

Tenemos desde los tiempos más remotos cuando la humanidad tuvo conocimiento de los efectos de la electricidad y que hoy en día continúan estos estudios. Y que ahora se tienen conocimientos de los efectos de la electricidad y su utilidad en la vida moderna.

Dado que el intenso crecimiento y consumo del uso de energía eléctrica, trae consigo la necesidad de desarrollar normas y sistemas de seguridad y protección contra las fallas, disturbios y mal uso de la electricidad.

Una fuente de seguridad y protección de percances en el uso de la energía eléctrica y la generación de descargas eléctricas de origen atmosférico es la "conexión a tierra".

El término "conexión a tierra" resulta muy ambiguo para expresar los sistemas y medidas para realizar la protección a tierra.

Este trabajo consiste en la descripción y consideraciones necesarias para poder hacer el "sistema de tierra" en una instalación que habrá de proporcionar la protección y seguridad deseada a sistemas eléctricos, equipos y recinto en general.

Pero a su vez se ha hecho un trabajo en el cual se dan los conocimientos mínimos indispensables en un sistema a tierra en general, ya que la finalidad de esta tesis es el de dar un panorama general del SISTEMA A TIERRA, en una instalación eléctrica.

En la cual se hace una recopilación de información acerca de los diferentes tipos de sistemas a tierra, métodos para el cálculo en la resistividad del terreno, etc. etc.

Ahora veremos una clasificación a la que se puede llegar:

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

- Conexión o Puesta a tierra.
- Sistemas de tierra.
- Sistemas de pararrayos.

Por lo anterior, durante el diseño, construcción y operación de sistemas eléctricos, es una norma fundamental de seguridad que se defina el grado de protección, por ejemplo en los sistemas eléctricos, es esencial que todas las partes del sistema, no sean accesibles al contacto humano o animal y que se encuentren a un potencial lo más bajo posible, para que en caso de contacto accidental no resulte peligroso. Sin embargo, aunque todos los equipos e instalaciones eléctricas están diseñadas para evitar el contacto humano con partes bajo tensión, estas no siempre ofrecen una seguridad absoluta, ya que, durante su vida útil suelen ocurrir fallas, ya sea en el sistema eléctrico, o bien en el equipo, apareciendo de esta manera un potencial anormal con respecto al suelo o "tierra" que potencialmente puede ocasionar un accidente.

De lo anterior se observa también la necesidad de des conexión del sistema o parte del sistema con falla para evitar que el daño sea mayor o transferido a otra parte del propio sistema.

De manera general se coincide que el objeto de un "sistema de tierra" es el de proporcionar seguridad personal, proteger los equipos y mejorar la calidad del servicio eléctrico, tanto en condiciones normales de funcionamiento, como de falla en sistemas eléctricos.

Clasificación de los sistemas de tierra:

Cualquier sistema de tierras estará diseñado teniendo en cuenta las siguientes razones:

- Protección al personal

CAPITULO 1

- Protección al equipo y estructuras

Cada uno deberá ser analizado en forma individual, pero el proyecto completo deberá incluirlos a los dos.

Es la función principal del sistema de tierras limitar los voltajes y las corrientes que resulten peligrosas, durante condiciones de falla, estos se pueden presentar en la propia instalación eléctrica, equipos y en general materiales y terreno que ofrezcan suficiente conductividad a la corriente y voltaje de falla.

Las tensiones y corrientes peligrosas que pueden estar presentes en una superficie conductora, no es provocada siempre y necesariamente por una falla, sino que su origen puede ser por inducción electromagnética o en otros casos por fenómenos electrostáticos y hasta meteorológicos. Por está razón todo material conductor expuesto a convertirse en peligroso debe conectarse a tierra.

Sistema de tierra de protección (conexión a tierra)

El sistema de tierras de protección, es aquel que tiene como principal función, mantener seguro de tensiones y corrientes peligrosas a todo al equipo, instalación, estructuras y superficies metálicas, que pueden estar en contacto con el personal y que no debe exponerse a ser dañado por sobre tensiones que afectan su contenido interno o funcionamiento.

Sistemas de tierra de operación

El sistema de tierra de operación, es aquel que se instala deliberadamente en determinados puntos de un circuito y que tiene como finalidad, dar firmeza y estabilidad a dicho circuito. En una red eléctrica de distribución, los neutros de transformadores, generadores, bases de los apartarrayos, etc., se conectan a tierra.

En resumen, el sistema de tierras de operación, tiene parte activa en el buen funcionamiento de algún otro sistema, además de ofrecer la protección concebida.

Sistema de tierra provisional

El sistema de tierras provisional, como su nombre lo indica, solo se instala eventualmente cuando las necesidades de alguna instalación o equipo así lo requieran.

Generalmente este tipo de sistema se encuentra durante la construcción, instalaciones temporales, condiciones de mantenimiento, etc. No obstante es de mucha importancia realizar un buen sistema de tierras provisional, que ofrezca las mismas garantías que si fuera permanente.

1.2 NECESIDADES DE LA CONEXION A TIERRA.

La necesidad de contar con una conexión a tierra en los recintos donde se localicen equipos e instalaciones eléctricas es de cumplir con las siguientes funciones:

- Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes a tierra ya sean debidas a una falla eléctrica, a la operación de un pararrayo, o bien un apartarrayo.
- Evitar que durante la circulación de las corrientes de tierra puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos en la vecindad de los equipos que puedan ser peligrosos para el personal.
- Facilitar mediante sistemas de relevadores la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos.
- Dar mayor confiabilidad y continuidad al servicio eléctrico.

CAPITULO 1

**1.3 SENSIBILIDAD Y LIMITES TOLERABLES DEL HOMBRE
A LA CORRIENTE ELECTRICA.**

Aunque el diseño de una "red de tierras", no implica directamente a los efectos fisiológicos de una corriente eléctrica a través del cuerpo humano, es importante mencionar normalmente, el comportamiento que sufre éste.

Los efectos del paso de la corriente eléctrica por el cuerpo humano, han sido objeto de extenso estudio y trabajo experimental. La gravedad de los daños que pueden causar el "choque eléctrico", depende no solo de la magnitud y frecuencia, que determinan la intensidad de la corriente, sino también de la región del cuerpo que atraviese, así como la duración a la que se ve expuesto el cuerpo humano. Además del estado anímico del sujeto.

En la siguiente tabla No.(1.1) se muestran algunos valores de la resistencia de algunas partes del cuerpo humano.

PARTE DEL CUERPO	VALOR DE RESISTENCIA (OHMS)
CRANEO Y HUESOS DE LA CARA (EXCLUYENDO ORGANOS CERCA DE LOS ORIFICIOS)	3000
REGIONES SENSIBLES DEL CUELLO Y HOMBROS.	750
LADO SUPERIOR DEL BRAZO.	2000
PALMA DE LA MANO Y DEDOS.	3000
PLANTA DEL PIE.	3000
LADO BAJO DEL BRAZO.	750

TABLA No. 1.1
RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO.

1.3.1 FRECUENCIA.

Los efectos de la corriente eléctrica a las frecuencias comerciales de 50 y 60 Hz son un desafortunado factor, al cual los humanos son muy vulnerables en ocasión de manifestarse en este rango de frecuencias, los más bajos niveles de corriente de soltar soportados por el hombre ante una forma de onda del tipo senoidal; por lo que las corrientes cerca del valor de 100 mA pueden eventualmente ser letales. Para valores de frecuencia entre 5 y 25 Hz, el cuerpo humano puede tolerar mayores valores de corriente y aproximadamente cinco veces más grandes en corriente directa. Similamente a frecuencias entre 100 y 200 000 Hz.

Además de las frecuencias de 50 y 60 Hz, autoridades en la materia han agregado que el cuerpo humano puede tolerar ligeramente, corrientes más altas a 25 Hz. En el caso de descargas atmosféricas, el cuerpo humano parece ser capaz de tolerar muy altas corrientes, quizá del orden de cientos de amperas.

1.3.2 MAGNITUD.

Los efectos de diferentes magnitudes de corriente en el cuerpo humano con duración de 1 a 3 segundos son los mostrados en la siguiente tabla No. (1.2).

1.3.3 DURACION.

De acuerdo con los datos resumidos en la tabla No.(1.2), se puede observar que se puede soportar altas corrientes sin sufrir fibrilación ventricular, si la duración del choque es corta; Dalziel, analizando los resultados de las experiencias del paso de la corriente a través del cuerpo humano, concluyó que el 99.5% de los humanos pueden resistir, sin sufrir fibrilación ventricular, corrientes determinadas por la ecuación (1.1).

$$(I_k)^2 (t) = 0.027 \text{ (AMP)} \dots\dots(1.1)$$

CAPITULO I

Despejando I_k se tiene:

$$I_k = \frac{0.027}{\sqrt{t}} \text{ (AMP).....(1.2)}$$

donde

I_k = Corriente RMS a través del cuerpo, en amperes.

t = duración del contacto, en segundos.

0.027 = constante, obtenida empíricamente (en experiencias de 0.03 seg. de duración)

VALORES DE CORRIENTE QUE AFECTAN AL CUERPO HUMANO

CORRIENTES NO PELIGROSAS	1 mA ó menos	NO PRODUCE NINGUNA SENSACIÓN NI MAL EFECTO.
	6-15 mA	PRODUCE CHOQUE Y EL INDIVIDUO PUEDE SOLTAR LOS CONDUCTORES, POR QUE NO PERDE EL CONTROL MUSCULAR
CORRIENTES PELIGROSAS	15-20 mA	CHOQUE DOLOROSO CON PERDIDAS DEL CONTROL MUSCULAR
	20-50 mA	CHOQUE ELECTRICO, ACOMPAÑADO DE FUERTES CONTRACCIONES MUSCULARES Y DIFICULTADES PARA RESPIRAR.
	50-100 mA	PUEDE CAUSAR FIBRILACIÓN VENTRICULAR
	100-200 mA	MATA SIEMPRE A LA VICTIMA POR FIBRILACIÓN VENTRICULAR.
	200 mA ó más	PRODUCE QUEMADURAS GRAVES Y FUERTES CONTRACCIONES MUSCULARES QUE OPRIMEN EL CORAZÓN Y LO PARALIZAN DURANTE EL CHOQUE, ESTA CIRCUNSTANCIA EVITA LA FIBRILACIÓN VENTRICULAR.

TABLA No. 1.2

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

Como se mencionó con anterioridad, para la comprensión del efecto del paso de la corriente a través del cuerpo humano, es necesario tomar en cuenta los diversos casos que se pueden presentarse al hacer contacto con superficies a diferente potencial.

Las diferencias de potencial tolerables se determinan de acuerdo con los conceptos de tensiones de "paso", "contacto" y "transferencia".

1.4 TENSION DE PASO, CONTACTO Y TRANSFERENCIA.

Tenemos que en la figura (1.1), nos muestra el circuito equivalente para definir la "tensión de contacto" entre los pies. En el esquema se observa que, la diferencia de potencial conectada por el cuerpo, está limitada por el máximo valor entre dos puntos accesibles sobre la tierra y que tienen una separación de un paso, el cual para efectos de cálculo se asume, de un metro.

La figura (1.2) muestra un circuito equivalente para un contacto de una mano y la corriente fluyendo hacia ambos pies, y se puede concretar, que es la tensión a la que se ve sometido el cuerpo humano por contacto con un equipo o dispositivo que en condiciones normales no se encuentra con tensión.

CAPITULO 1

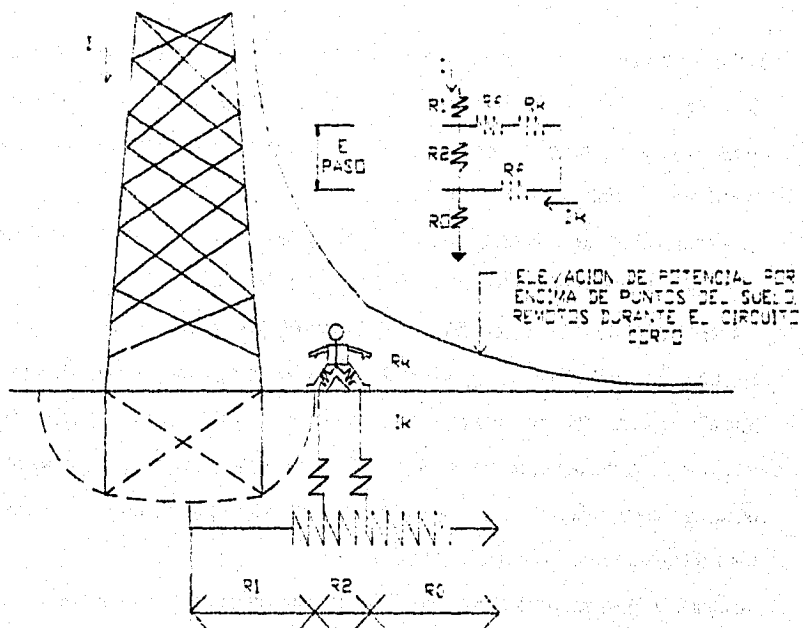


FIGURA 1.1. POTENCIAL DE PASEO CERCANO A UNA ESTRUCTURA CONECTADA A TIERRA.

La figura (1.3) muestra un caso de transferencia el cual debe ser considerado como un caso especial de "contacto". Sucede cuando una persona parada dentro de un recinto que alberga equipos y sistemas eléctricos, toca un conductor aterrizado a un punto remoto, o una persona parada en un punto remoto toca un conductor a una orilla del sistema de tierras. Aquí el choque de voltaje debe ser igual esencialmente, a todo el voltaje incrementado en la red bajo condiciones de falla y no a la fracción de este total, que se considera de "paseo" y "contacto".

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

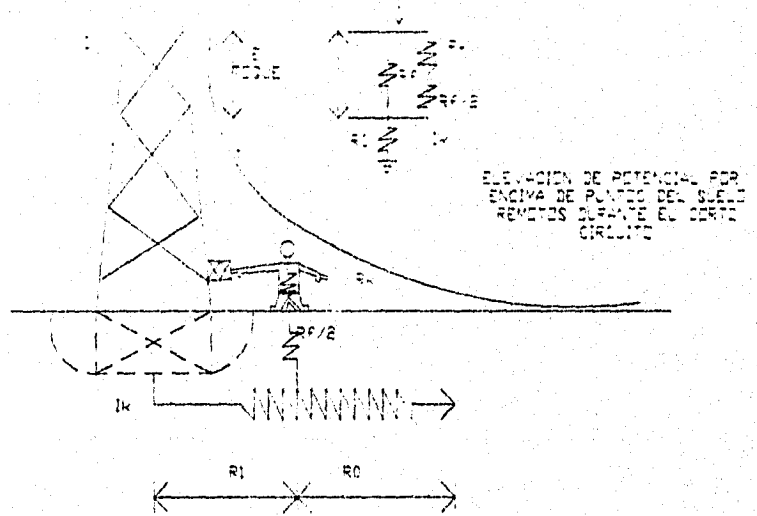


FIGURA 1.2.

De los circuitos mostrados en las figuras (1.1, 1.2 y 1.3) se considera la resistencia de los electrodos a tierra: $R_1+R_2+R_0$ en la figura (1.1), r_1 y R_0 en la figura (1.2) y R_0 para la figura (1.3), la resistencia de contacto de la mano, la resistencia de los zapatos, la resistencia R_r de la tierra y la resistencia R_k del cuerpo.

CAPITULO 1

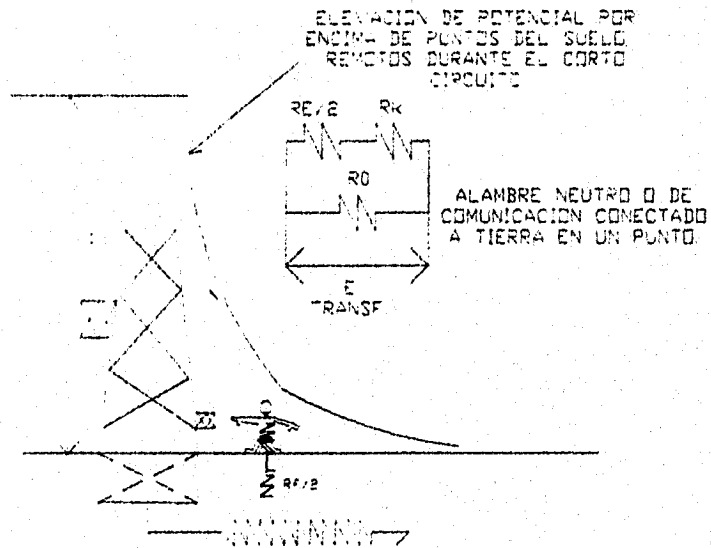


FIGURA 1.3.

Teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: resistencia de la mano muy baja considerada igual a cero para cálculo y de esta manera tener un valor más confiable. En el caso de cada pie, se le considera como un electrodo con un diámetro de 8 cm, de radio y la resistencia de la tierra puede ser calculada en términos de la resistividad $\rho_s(\Omega m)$ del suelo cerca de la superficie. De esta manera, se ha determinado que la resistencia de los pies en serie (de paso) es aproximadamente $6\rho_s(\Omega)$; y los dos pies en paralelo (de contacto) es aproximadamente $1.5 \rho_s(\Omega)$; entonces para propósitos prácticos de cálculo; se considera que la resistencia de tierra R_f en ohms, para cada pie es de $3\rho_s$.

El valor de la resistencia total del cuerpo, incluyendo la resistencia interna y la resistencia de la piel, es más difícil de establecer, sin embargo, en pruebas con

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

electricidad estática y con individuos con las manos mojadas y los pies sumergidos en agua con sal (con el fin de asimilar las condiciones más adversas); los valores obtenidos usando frecuencias de 60 Hz fueron; 9mA con voltajes correspondientes a 21 Volts mano a mano y 10.2 Volts de mano a pie, por lo tanto la resistencia en C.A. mano a mano es 2330 y de mano a pie es de 1130 Ohms. Por lo tanto se considerará un valor de 1000 ohms, para la resistencia del cuerpo, el cuál dará un valor suficiente de seguridad, bajo circunstancias ordinarias.

Las diferencias de potencial tolerables entre dos puntos cualesquiera de posibles contactos, pueden ser calculadas en términos de las constantes obtenidas y una posible corriente en el cuerpo humano. Aplicando para ello el teorema de Helmholtz, que indica:

La corriente en un cuerpo entre dos puntos, será igual al flujo que el voltaje preexistente causaría a través de la resistencia del cuerpo en serie con la red exterior de tierras conectado al punto de contacto.

El teorema significa, que la red a que se refiere puede incluir dos trayectorias en paralelo, la trayectoria directa a través del suelo y una trayectoria en paralelo a través del punto del circuito de falla.

De lo anterior y sustituyendo en la ecuación (1.2) de acuerdo con Ohm.

Para la tensión de paso:

$$E_{PASEO} = (R_b + 2R_p)I_b \quad (\text{volts}) \dots (1.3)$$

$$E_{PASEO} = (1000 + 6\rho_s) \left(\frac{0.168}{\sqrt{t}} \right) \quad (\text{volts})$$

CAPITULO 1

$$E_{\text{PASO}} = \left(\frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \right) \text{ (volts) } \dots (1.4)$$

Para la tensión de contacto:

$$E_{\text{CONTACTO}} = \left(R_b + \frac{R_p}{2} \right) (I_b) \text{ (volts) } \dots (1.5)$$

$$E_{\text{CONTACTO}} = (1000 + 1.5\rho_s) \left(\frac{0.165}{\sqrt{t}} \right) \text{ (volts)}$$

$$E_{\text{CONTACTO}} = \left(\frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}} \right) \text{ (volts) } \dots (1.6)$$

Entonces se puede definir:

Tensión de Paso:

Es la diferencia de potencial tolerable entre dos puntos cualesquiera sobre la superficie de la tierra, los cuales pueden ser tocados simultáneamente por los pies de una persona.

Tensión de Contacto:

Es la diferencia de potencial tolerable entre dos puntos que una persona parada puede tocar simultáneamente con sus manos.

En general se han aceptado los valores de tensión de contacto y tensión de paso en valores de 125 Volts para un tiempo de 1.2 segundos y probabilidades elevadas a 250 volts para un tiempo de 0.3 segundos.

1.4.1 CLASIFICACION DE LAS DISPOSICIONES DE CONEXION A TIERRA.

Para la conexión a tierra, existen tres disposiciones principales:

- Conexión tipo radial
- Conexión tipo anillo
- Conexión tipo malla

1.4.2 CONEXION RADIAL.

Es la más económica, pero la menos satisfactoria, ya que, al producirse una falla en un aparato, se producen grandes gradientes de potencial. Esta conexión consiste de uno o varios electrodos a los cuales se conectan derivaciones de cada aparato.

1.4.3 CONEXION EN ANILLO.

Se obtiene colocando en forma de anillo un cable de cobre desnudo, de suficiente sección transversal, alrededor de la superficie ocupada por el equipo o estructura que alberga a dicho equipo y conectando derivaciones a cada aparato usando cable más delgado.

Es la conexión más económica y eficiente, en ellas se eliminan las grandes distancias de descarga a tierra de la conexión radial. Los potenciales peligrosos son disminuidos, al disiparse la corriente de falla o descarga atmosférica, por varios caminos en paralelo.

1.4.4 CONEXION EN MALLA.

Es la más usada actualmente en los sistemas eléctricos; consiste, como su nombre lo indica de una malla formada por cables de cobre interconectados y conectados a través de electrodos (varillas) a partes más profundas para buscar zonas de menor resistividad.

CAPITULO 1

Esta conexión es la de mayor costo de entre estas formas de conexión, pero la de mayor eficiencia.

1.4.5 RESISTENCIA DE UNA TOMA DE CORRIENTE.

La estructura física de los electrodos de una toma de tierra puede presentar diferentes formas. Una vez constan de una placa o una varilla enterrada en el terreno; otras consisten en un grupo de dos o más varillas enterradas o de un conjunto de alambres enterrados horizontalmente, etc.

Uno de los más convenientes y económicos métodos es el de utilizar dos o más dispersores interconectados en paralelo. Cuando dos electrodos son interconectados bien espaciados uno del otro, proveen dos paralelas trayectorias a tierra. Y sabiéndose, que el 90% de la total resistencia esta localizada a una distancia de 1.8 a 3 metros entorno al dispersor, es necesario que dichos electrodos estén bien separados uno del otro para minimizar la tendencia de traslapamiento de la trayectoria, de las corrientes entre los dispersores. El efecto de realizar un adecuado espaciamiento entre los electrodos se traduce en obtener un bajo valor de la resistencia de puesta a tierra. La resistencia y la reactancia en largas trayectorias necesarias para interconectar electrodos evitando áreas de influencia traslapadas, podrían tender a decrementar la efectividad del uso de varios electrodos conectados en paralelo. Sin embargo, con espaciamientos de 10 a 20 pies (3.5 a 7 metros) los cuales son generalmente factibles, la relación reciproca puede ser estrechamente aprovechada. La determinación más ó menos exacta del área de influencia ó área del gradiente de potencial de una varilla desde un punto de vista práctico, puede ser determinada de la siguiente manera:

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

Se describe a continuación el desarrollo matemático para determinar la resistencia de un electrodo semiesférico enterrado al ras del suelo, de acuerdo a la figure (1.4).

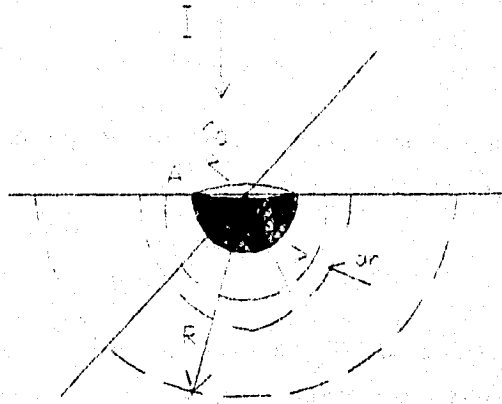


FIGURA 1.4. ELECTRODO METÁLICO SEMIESFÉRICO DE RADIO ENTERRADO A RAS DE TIERRA.

Supóngase que se origina una corriente I , que entra al electrodo semiesférico y circula radialmente hacia el terreno circundante, que para efectos de este cálculo se considera uniforme. La resistencia de esta conexión puede calcularse por la ecuación siguiente (1.7).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (\Omega) \quad \dots(1.7)$$

Donde:

R = es la resistencia del electrodo

ρ = es la resistividad del material del electrodo

l = longitud del electrodo

CAPITULO 1

A = área perpendicular a la dirección de la corriente.

En este caso la corriente estará fluyendo hacia tierra, la trayectoria no es uniforme sino que aumenta al alejarse del electrodo central. Esta sección corresponde a la forma de una semiesfera de radio r . Por lo tanto:

$$A = \pi r^2 \quad (\text{m}^2) \dots (1.8)$$

La sección se refiere a la longitud elemental dr , de la figura (1.4), entonces la ecuación (1.7) se puede escribir como:

$$dR = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \dots (1.9)$$

La resistencia elemental dR debe entenderse como la que existe entre las dos caras opuestas de una cáscara semiesférica de radio r y el espesor infinitesimal dr . Entonces la resistencia del electrodo imaginario formado por la tierra, con radio desde r_0 a r_1 se obtendrá integrando la ecuación (1.9), esto es:

$$R = \int dR = \int_{r_A}^{r_1} \rho \frac{dr}{2\pi r^2}$$
$$R = \rho_{ts} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (\Omega) \dots (1.10)$$

Esta fórmula está limitada a la suposición de que la resistencia de la tierra es uniforme en un gran volumen de suelo considerado; de lo cual es bien sabido que usualmente existen considerables variaciones en su conductividad en la vecindad de algún dispersor. Sin embargo asumiendo un suelo de resistividad uniforme y despreciando las resistencias de contacto y la del dispersor mismo, se tiene la siguiente colección de fórmulas; mostradas en la tabla No. (1.3).

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

	HEMISFERA DE RADIO (a)	$R = \frac{\rho}{2 \pi a}$
	UNA VARILLA DE TIERRA DE LONGITUD L, Y RADIO (a)	$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
	2 VARILLAS DE TIERRA S-L; SEPARACION S	$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4 \pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \right)$
	ALAMBRE HORIZONTALMENTE EXTENDIDO DE LONGITUD 2L, PROFUNDIDAD S/2	$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s^2}{2L} - \frac{s^4}{16L^3} + \frac{s^6}{512L^5} \right)$
	ALAMBRE EN ANGULO RECTO, LONGITUD DEL BRAZO L; PROFUNDIDAD S/2	$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2146 \frac{s^2}{L} + 0.1635 \frac{s^4}{L^3} - 0.0424 \frac{s^6}{L^5} \right)$
	ESTRELLA DE 3 PUNTOS, LONGITUD DEL BRAZO L; PROFUNDIDAD S/2	$R = \frac{\rho}{6 \pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209 \frac{s^2}{L} + 0.230 \frac{s^4}{L^3} - 0.054 \frac{s^6}{L^5} \right)$
	ESTRELLA DE 4 PUNTOS, LONGITUD DEL BRAZO L; PROFUNDIDAD S/2	$R = \frac{\rho}{8 \pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s^2}{L} + 0.645 \frac{s^4}{L^3} - 0.145 \frac{s^6}{L^5} \right)$
	ESTRELLA DE 6 PUNTOS, LONGITUD DEL BRAZO L; PROFUNDIDAD S/2	$R = \frac{\rho}{12 \pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 6.051 - 3.128 \frac{s^2}{L} + 1.750 \frac{s^4}{L^3} - 0.490 \frac{s^6}{L^5} \right)$
	ESTRELLA DE 8 PUNTOS, LONGITUD DEL BRAZO L; PROFUNDIDAD S/2	$R = \frac{\rho}{16 \pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10.98 - 5.51 \frac{s^2}{L} + 3.26 \frac{s^4}{L^3} - 1.17 \frac{s^6}{L^5} \right)$
	CIRCULO DE ALAMBRE DIAMETRO DEL CIRCULO D; DIAMETRO DE ALAMBRE a, PROFUNDIDAD S/2	$R = \frac{\rho}{2 \pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
	BANDA HORIZONTALMENTE ENTERRADA LONGITUD 2L; SECCION (a) POR (b) PROFUNDIDAD S/2, b=a/5	$R = \frac{\rho}{4 \pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{s^2 - ab}{2(a+b)} + \ln \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s^2}{2L} - \frac{s^4}{16L^3} + \frac{s^6}{512L^5} \right)$
	PLACA CIRCULAR HORIZONTALMENTE ENTERRADA; RADIO (a), PROFUNDIDAD S/2	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4 \pi s} \left(1 - \frac{7a^2}{12s^2} + \frac{33a^4}{40s^4} \right)$
	PLACA CIRCULAR VERTICALMENTE ENTERRADA; DE RADIO (a) PROFUNDIDAD S/2	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4 \pi s} \left(1 - \frac{7a^2}{24s^2} + \frac{99a^4}{320s^4} \right)$

NOTAS: FORMULAS APROXIMADAS QUE INCLUYEN LOS EFECTOS DE LAS IMAGENES. LAS DIMENSIONES DEBEN SER EN CENTIMETROS PARA OBTENER LA RESISTENCIA EN OHMS.

ρ RESISTIVIDAD DE LA TIERRA EN OHM-CENTIMETRO

TABLA No. 1.3.

CAPITULO 1

Este hecho casi inclina a la medición directa de la resistividad del terreno y de la resistencia de tierra donde quiera que se necesite, por métodos muy simples que se verán más adelante; y de métodos muy prácticos para reducir la resistencia a tierra de un dispersor, cuando se calcula ó se mide que no es lo suficientemente baja. Para mejorarla existen muy variadas formas de hacerlo, las cuales son aplicables según las condiciones del terreno y tipo de dispersor utilizado.

1.5 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE SISTEMA

PRACTICO DE CONEXION A TIERRA.

De acuerdo a los conceptos de "tensión de paso" y "tensión de contacto", y de la conexión tipo malla, que es el método de más empleo en la práctica. Se puede continuar con el estudio del diseño de redes de tierras. La metodología a seguir se describe a continuación:

- Investigación de las características del suelo.
- Cálculo de la máxima corriente de falla a tierra.
- Diseño preliminar de la red de tierra.
- Cálculo de la resistencia de la red de tierra.
- Cálculo de los voltajes de paso en la vecindad de la red.
- Investigación de los voltajes de transferencia.
- Corrección o mejoramiento del diseño preliminar de acuerdo a los puntos anteriores.
- Construcción de la red de tierra.
- Mediciones en campo de la red.
- Revisión de los puntos anteriores basados en las mediciones.
- Modificaciones a la red de acuerdo al punto anterior.

De los puntos anteriores se puede hacer uso para comprobar la eficiencia de redes existentes y de ser necesario efectuar las medidas correctivas necesarias.

1.5.1 INVESTIGACION DE LAS CARACTERISTICAS

DEL SUELO.

Para definir las características del terreno, normalmente se obtienen muestras hasta una profundidad razonable que puede permitir juzgar la homogeneidad y condiciones de humedad del mismo. Para definir la resistividad eléctrica, es conveniente realizar mediciones con métodos y aparatos aceptados para estos fines.

Las mediciones deben incluir datos sobre temperatura y condiciones de humedad al momento de efectuarlas, tipo de terreno, profundidad de la medición y concentraciones de sales en el suelo, puesto que, de estos datos se puede tener una resistividad del suelo real o sobre-evaluado.

El dato de la resistividad (ρ) del suelo es muy importante cuando se tiene duda de la posibilidad de formación de arcos eléctricos que pudieran formarse por el gradiente de potencial en la malla.

1.5.2 RESISTIVIDAD DE LA TIERRA.

La resistividad del terreno es una variable muy compleja de determinar y varia notablemente entre los diferentes suelos en que se determine. En diferentes autores y estudios se puede tener divergencia tanto en métodos como experiencias en la medición de la resistividad.

La tabla No. (1.4), que tiene la simplicidad de presentar valores promedio de un gran número de experiencias. Las tablas No. (1.5 y 1.6) muestran datos más precisos de resistividad de algunos tipos de suelos.

CAPITULO 1

TIPO DE SUELO	RESISTIVIDAD (Ω/cm^*)
ORGANICO MOJADO	10
ARCILLA	10^2
SECO	10^3
ROCA	10^4

TABLA No. 1.4 PROMEDIO DE LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA.

TIPO DE SUELO	RESISTIVIDAD Ω/cm^*		
	PRO	MIN	MAX.
CALCAREOS	2370	590	7000
ARCILLOS	4060	340	16300
ARCILLOS CON ARENA Y GRAVA	15800	1020	13400
GRAVA, ARENA, PIEDRAS, POCO ARCILLOS	64000	59000	458000

TABLA No. 1.5

TIPO DE SUELO	RESISTIVIDAD Ω/cm^*
SUELO SUPERFICIAL MOLDEABLE	100 - 500
ARCILLA	200 - 10000
ARENA Y GRAVA	5000 - 10000
PIEDRA CALIZA SUPERFICIAL	10000 - 1000 000
PIEDRA CALIZA	800 - 400 000
PIZARRO	500 - 100
ARENISCA	2000 - 200 000
GRANITO, BASALTO	2000 - 200 000

TABLA No. 1.6

♦ UN Ω/CM^* , SE DEFINE COMO LA RESISTENCIA DE UN CUBO DE TIERRA DE UN CM. POR LADO, ENTONCES ES REALMENTE UN Ω/CM^2 .

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

La resistividad variará también conforme se tenga mayor profundidad en el suelo en que se determina. La figura (1.5) muestra la reducción de la resistencia que se tiene de acuerdo a una profundidad determinada.

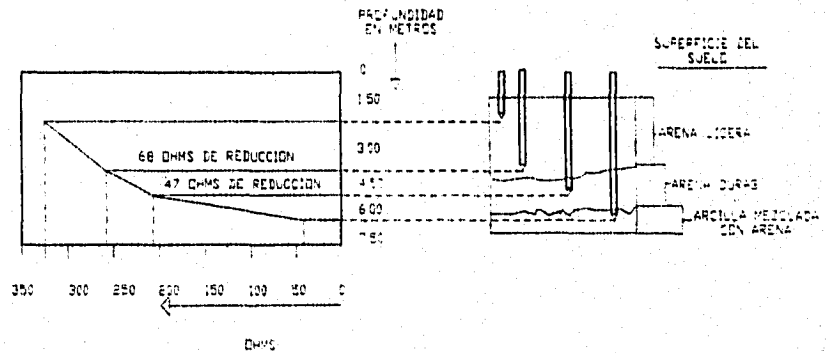


FIGURA 1.5. COMPORTAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DEL TERRENO.

1.5.3 VARIACION DE LA RESISTIVIDAD CON RESPECTO A LA HUMEDAD Y SALES CONTENIDAS EN EL TERRENO.

En el suelo, la conducción de corriente eléctrica es grandemente electrolítica. Por lo que la humedad y el contenido de sales afectan radicalmente su resistividad.

La resistividad depende fuertemente del contenido en porcentaje de humedad del suelo, se ha observado que cuando el contenido se reduce por debajo del 22%, la resistividad inicia un crecimiento drástico. La gráfica de la Figura (1.6) presenta el comportamiento típico de la resistividad con respecto al contenido de humedad.

CAPITULO 1

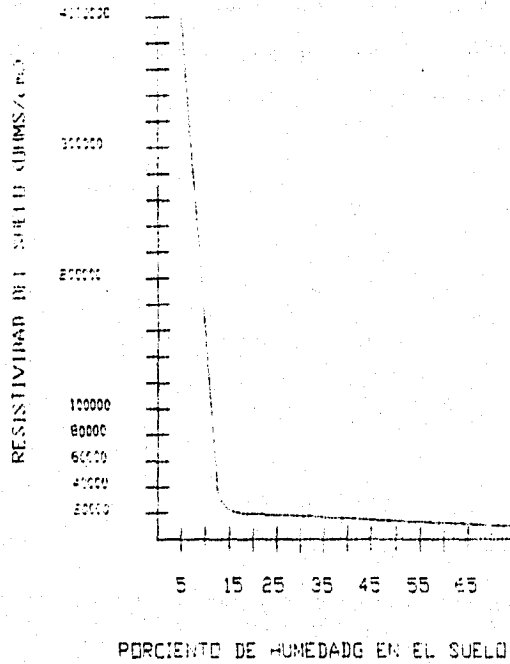


FIGURA 1.6. VARIACION DE LA RESISTIVIDAD CON LA HUMEDAD.

La tabla No. (1.7) muestra el efecto del contenido de agua en el suelo; obsérvese que cuando los dos tipos de suelos, bajo prueba se encuentran secos, se comportan como aisladores (resistividades mayores de $1000 \times 10^6 \Omega/\text{cm}$). Solo una pequeña cantidad de sales disueltas en el terreno, reducen en gran medida el valor de la resistividad. (Por sales se entenderá el sulfato de cobre, carbonato de sodio, cloruro de sodio, etc.). Este efecto es muy aprovechado para obtener un electrodo de baja resistencia en lugar de un sistema de electrodos de alto costo y muy elaborado.

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

CONTENIDO DE HUMEDAD % DE PESO	RESISTENCIA Ω/cm^*	
	SUELO SUPERFICIAL	ARENA MOLDEABLE
0	1000 x 10 E 6	1000 x 10 E 6
2.5	250000	150 000
5.0	165000	43 000
10.0	53000	19 500
15.0	1000	10 500
20.0	1200	6 300
30	6400	4 200

TABLA No. 1.7
EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA RESISTENCIA DE 2 TIPOS DE SUELO.

Cuando el contenido de humedad es muy bajo se impone el uso de varillas o electrodos verticales de suficiente longitud (3m. comúnmente) para llegar a capas donde existirá mayor humedad.

El uso de grava de la humedad, a su vez, esta cubierta de grava proporcionará una alta resistencia, reduciendo así la magnitud de los choques eléctricos.

La tabla No. (1.8), muestra el comportamiento de la resistividad de acuerdo a cantidades diferentes en por ciento del peso de sal agregada al material húmedo.

Para sal con un contenido de humedad de 15% respecto del peso total y a una temperatura de 17 °C.

SAL AGREGADA % DEL MATERIAL HUMEDO	RESISTIVIDAD (Ω/cm)
0	10 700
0.1	1800
1.0	460
5.0	190
10.0	130
20.0	100

TABLA No 1.8
EFECTO DEL CONTENIDO DE SAL EN LA RESISTIVIDAD DE TIERRA.

1.6.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA.

La temperatura también ejerce una influencia apreciable sobre la resistencia del terreno. A menos de 0°C la resistividad crece bruscamente y a mayores temperaturas esta decrece, excepto al llegar al punto de ebullición del agua que rodea al electrodo, por la cual pasa una corriente muy intensa, resultando entonces resistividades elevadas, debido a la evaporación de la humedad.

La figura (1.7) muestra la variación de la resistencia del suelo con respecto a la temperatura en un tipo de terreno determinado.

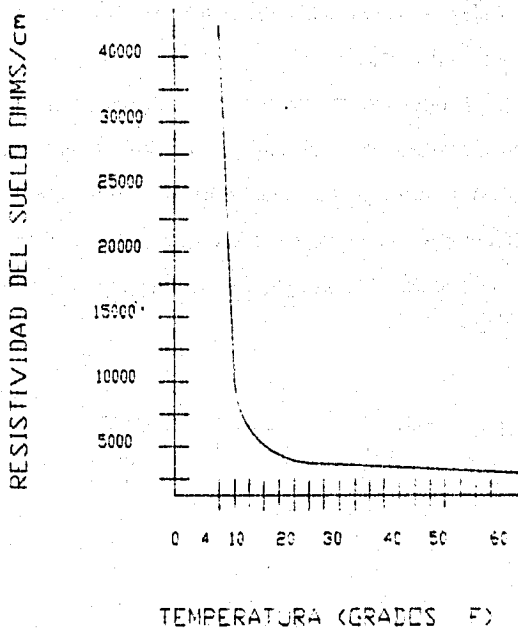


FIGURA (1.7) VARIACION DE LA RESISTIVIDAD CON LA TEMPERATURA.

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA.

Y la tabla No. (1.9), nos muestra algunos parámetros de la variación de la resistividad de acuerdo con la temperatura.

Ya se ha visto que la resistividad de un terreno tiene variaciones de acuerdo al contenido de humedad, temperatura y contenido de sales por lo que es fácil comprender que aquella varía también en las diferentes estaciones del año, sobre todo en climas extremos donde hay época de lluvias, de sequía y otras variaciones atmosféricas.

TEMPERATURA (°C)	RESISTIVIDAD (Ωcm)
20	7200
10	90000
0 (AGUA)	13 800
0 (HIELO)	30 000
-5	70 000
-15	330 000

TABLA No. 1.9
EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA.

Entonces, se observa que la resistividad de la tierra es una cantidad muy inestable en diferentes condiciones específicas, por lo que si se desea tener un valor más exacto, la única forma de lograrlo, será midiéndola en diferentes épocas del año.

Una experiencia recogida del texto "Getting Down to Earth" de James Biddle, es el comportamiento de la resistividad durante un período de 18 meses, esta experiencia fue recabada con varillas enterradas, siendo estas de diferente

CAPITULO 1

longitud, la primera de 1.52 m y la segunda 3.00 m (observándose lo que se representa en la figura (1.8)).

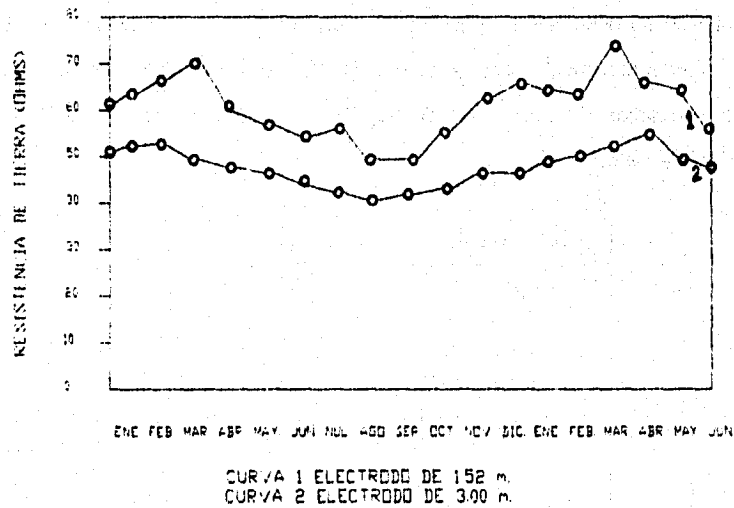


FIGURA 1.8. VARIACION DE LA RESISTENCIA DEL TERRENO DURANTE 18 MESES CON DOS PROFUNDIDADES DIFERENTES DE ELECTRODOS.

De la curva de la figura No 1.8, se puede observar que la resistividad permanece, sino más constante, por lo menos las variaciones son menores en el caso de la varilla enterrada (3.00 m) por lo que se concluye que la humedad y temperatura son más constantes a mayor profundidad.

1.5.5 METODOS DE MEDICION DE LA RESISTIVIDAD EN EL TERRENO.

Con el uso de las tablas No. (1.4, 1.5 y 1.6) se puede tener la resistividad aproximada del terreno donde se hará una instalación de tierras, desde luego,

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA.

que lo ideal es hacer una medición física en el terreno y en varios puntos del mismo y así lograr una encuesta, marcando las diferencias importantes en localización superficial, así como en profundidad.

Todos los métodos que se aplican para la medición de la resistividad del terreno tienen su principio en la ley de Ohm ($I = V/R$), misma que se usa para la medición de la resistencia en los conductores, que en este caso, es el terreno el cual va a recibir descargas eléctricas y su función será similar al conductor, limitando esta descarga por la resistencia propia del terreno.

Es necesario realizar mediciones del terreno donde se ha de instalar, la red de tierras, varillas, etc., porque del valor obtenido habrá de afectarse el costo de los elementos para la conexión a tierra.

Solamente en el laboratorio y por medio del control de humedad y temperatura, se logran valores exactos, para fines prácticos es suficiente con los sistemas que a continuación se refieren:

El método ilustrativo en la figura (1.9), hecho en laboratorio para muestras pequeñas, se reduce a una caja de madera, plástico o material altamente resistivo, con dimensiones determinadas, únicamente con dos placas metálicas laterales que establecen una intensidad de corriente por medio de una batería en serie con un amperímetro(I), la caída del potencial se registra en un voltímetro (V) el cual tiene sus terminales separadas una longitud (L) equidistante de las placas de metal.

CAPITULO 1

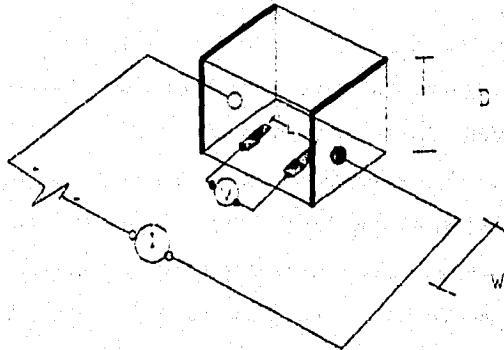


FIGURA 1.9. DISPOSITIVO EMPLEADO EN LABORATORIOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD DEL SUELO.

De la ecuación (1.7) y de la figura (1.9)

$$R = \frac{rL}{WD} [W] \dots\dots(1.11)$$

siendo; $WD = a$ y de la ley de Ohm tenemos:

$$R = \frac{E}{I} [\Omega] \dots\dots\dots(1.12)$$

igualando (1.11) y (1.12), y despejando (ρ) se tiene

$$\rho = \frac{RWD}{L} = \frac{E}{I} = \frac{A}{L} \left[\frac{\Omega}{cm} \right] \dots\dots(1.13)$$

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA.

El método de los cuatro puntos, es el más usual en la medición de la resistividad. Y consiste en la inserción de cuatro electrodos a una profundidad "B", dos electrodos son de corriente y dos intermedios de potencial, estos de pequeñas dimensiones. El voltaje entre los dos electrodos de potencial es entonces medido y dividido por la corriente entre los dos electrodos. Eso dará el valor de la resistencia mutua "R".

Los instrumentos empleados en la práctica comúnmente dan la lectura en ohms (Ω).

La figura siguiente (1.10), muestra la esquematización del MEGGER de cuatro puntos, para medición de la resistencia del terreno.

Los electrodos C1 y C2 imprimen una corriente alterna de la corriente continua producida por el dínamo de mano, que al pasar por el conmutador Cc produce una caída a alterna registrada por los electrodos P1 y P2 conmutada nuevamente por Cp convirtiéndola en corriente continua alimentando la bobina antagonista del medidor de resistencia "R".

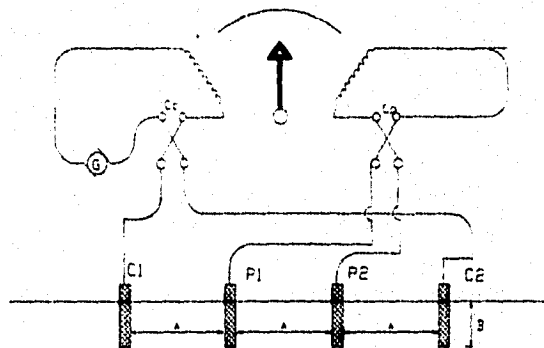


FIGURA 1.10. METODO DE LOS CUATRO PUNTOS EMPLEANDO UN MEGGER.

CAPITULO 1

El sistema SHEPARD CANES, se usa una corriente continua que se establece por medio de una batería de 3 Volts de dos celdas, el medidor también está conectado en serie, es un miliamperímetro de doble rango 0-25 mA graduado para leerse en Ω/cm . Esta lectura es directa.

Los electrodos están hincados en el suelo por dos barras aisladas, con el cátodo de mayor longitud para evitar la polarización. Este se emplea para pequeñas muestras sobre el terreno. La figura (1.11) es representativa de este método de medición.

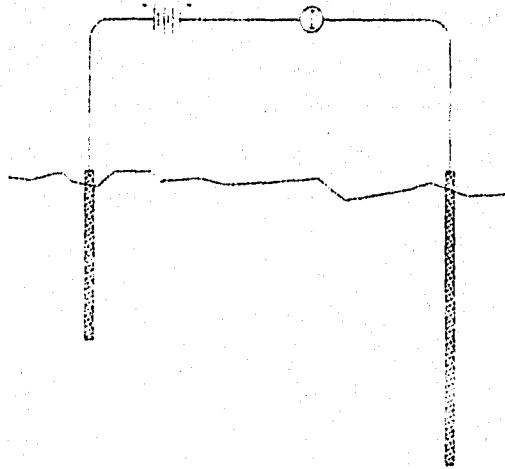


FIGURA 1.11. REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL METODO SHEPARD CANES DE MEDICION DE LA RESISTIVIDAD.

La expresión matemática desarrollada por el Dr. Wenner considera que la resistividad es homogénea, la ecuación es la siguiente:

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

$$\rho = \frac{4 \pi A R}{\frac{2A}{1 + \sqrt{\Lambda^2 + 4B^2}} - \frac{2A}{\sqrt{4\Lambda^2 + 4B^2}}} \left[\frac{\Omega}{\text{cm.}} \right] \dots\dots\dots(1.14)$$

donde tenemos que:

A = distancia entre electrodos adyacentes.

B = profundidad de electrodos.

De la ecuación (1.14), si la profundidad B del electrodo es pequeña comparada con la distancia A entre electrodos, se puede aplicar la expresión de la ecuación (1.15).

$$\rho = 2 \pi A R \left[\frac{\Omega}{\text{cm.}} \right] \dots\dots\dots(1.15)$$

El método de los TRES PUNTOS, se ilustra en la figura (1.12), este método puede ser utilizado en C.A. a frecuencia comercial o bien en C.D.

Para obtener un grado aceptable de exactitud con el método de los tres puntos, la resistencia de los electrodos auxiliares deberá ser aproximadamente igual o menor que la del electrodo bajo prueba. Por otro lado aún con pequeños errores en las mediciones individuales pueden resultar grandes errores en la resistencia computada.

Cuando se usa corriente directa el efecto de la corriente alterna dispersa es eliminada. Las corrientes directas dispersadas y la formación de gas en los electrodos suelen dar una lectura falsa. Estos efectos pueden ser reducidos, tomando lecturas primero con la corriente en una dirección, luego cambiar la

CAPITULO 1

polaridad y tomar nuevamente lecturas. Un promedio de estas lecturas dará un valor bastante aproximado. Las corrientes deberán ser aplicadas solamente en el tiempo suficiente para obtener las lecturas.

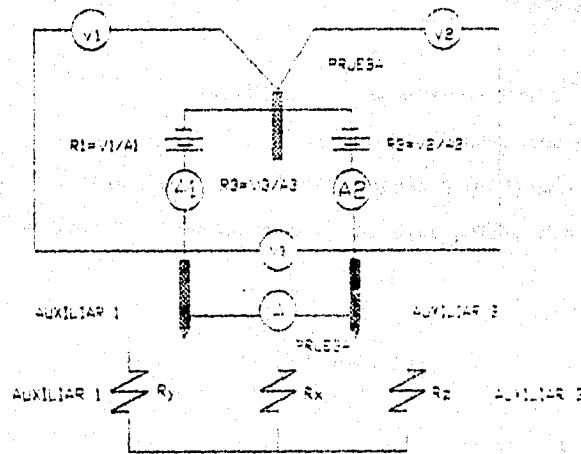


FIGURA 1.12. ESQUEMATIZACION DEL METODO DE LOS TRES PUNTOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL SUELO.

De la figura (1.12) se tiene que R_x , R_y y R_z son las resistencias a tierra de los electrodos, se analizan para encontrar el valor de R_x de la siguiente manera:

$$R_1 = R_y + R_z \dots(1.16)$$

$$R_2 = R_x + R_z \dots(1.17)$$

$$R_3 = R_y + R_x \dots(1.18)$$

despejando R_y , R_x , para dejar en función de R_z las ecuaciones (1.16, 1.17 y 1.18), se tiene:

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

$$R_y = R_1 - R_x \dots (1.19)$$

$$R_x = R_1 - R_y$$

De la ecuación (1.19) se tiene:

$$R_x = R_1 - R_2 + R_x \dots (1.20)$$

$$R_x = R_2 - R_x \dots (1.21)$$

Resolviendo por ecuaciones simultáneas de (1.20 y 1.21) tenemos :

$$2R_x = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_x = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{2} \quad (\Omega) \dots (1.22)$$

El método de la relación, este método de medición y pruebas de la resistencia de electrodos conectados a tierra se muestra en la figura (1.13). En este método la resistencia del electrodo bajo prueba, en serie con un electrodo auxiliar se mide por medio de un puente de Wheatstone o un ohmetro. Un potenciómetro de conductor deslizable es conectado a través de los mismos electrodos con el contacto deslizable conectado a un electrodo auxiliar secundario a través de un detector para determinar el punto de balance en el potenciómetro. El punto de balance en el potenciómetro fija la relación de la resistencia del electrodo de prueba a la resistencia total de los dos en serie que se ha determinado en la primera medición.

CAPITULO 1

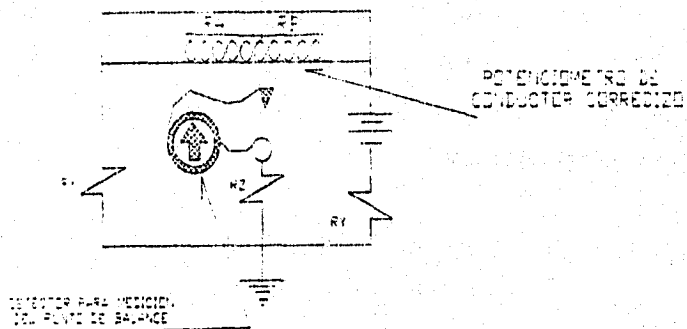


FIGURA 1.13 METODO DE RELACION.

1.5.6 PROCESO DE MEDICION.

Una vez que se conoce el método para medir la resistividad del terreno se procede a la aplicación sobre el lugar determinado, localizando los puntos críticos donde se supone existirán los mayores gradientes de potencial provocados por una falla o descarga eléctrica.

Se realiza un croquis del terreno indicando los puntos de medición y la dirección en que habrán de realizarse.

Realizar un número determinado de mediciones para obtener un balance estadístico.

1.5.7 MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE TIERRA.

Cuando se encuentra que una resistencia de electrodo a tierra no es suficientemente baja, hay varias maneras para mejorarla:

- Longitud del electrodo de tierra.
- Uso de varios electrodos.
- Tratamiento del suelo.

1.5.6 EL EFECTO DEL TAMAÑO DEL ELECTRODO.

En líneas anteriores se mencionó que la resistividad varía disminuyendo conforme se profundiza en el suelo. En general si se duplica la longitud del electrodo, se reduce la resistencia a aproximadamente el 40 %. La gráfica de la figura No. (1.14) se muestra el comportamiento de este efecto.

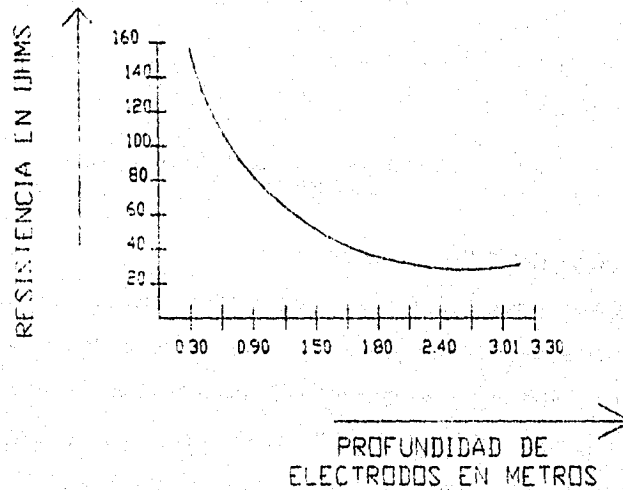


FIGURA 1.14. COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE TIERRA CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DE ELECTRODOS.

Se puede también pensar que aumentando el diametro del electrodo se puede tener una reducción de la resistencia, en efecto esto pasa, pero no es considerable el cambio que sufre la resistencia. la gráfica (1.15) muestra el comportamiento de un electrodo de 3 m., pero de diametros diferentes.

CAPITULO 1

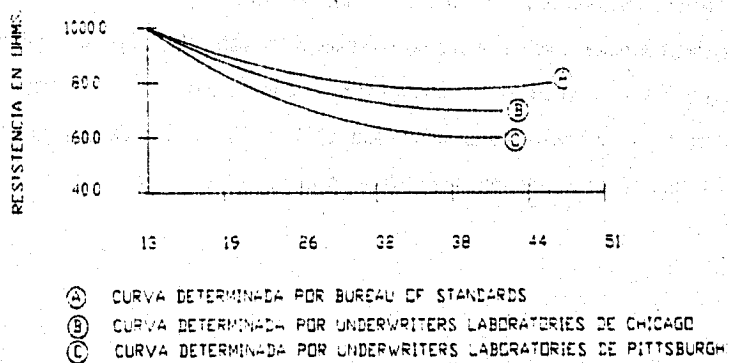


FIGURA 1.15. EFECTO DEL DIAMETRO DEL ELECTRODO DE LA RESISTENCIA.

1.5.9 USO DE VARIOS ELECTRODOS.

Dos electrodos bien espaciados enterrados en el suelo proporcionan dos trayectorias en paralelo. La regla de dos resistencias en paralelo no se aplican exactamente; esto es, la resistencia resultante no es la mitad de una de ellas; si estas son iguales. Realmente la reducción lograda, si se tienen dos electrodos es de 60 %, si se tienen tres es de 40 % y si se tienen cuatro será de 33 %.

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA.

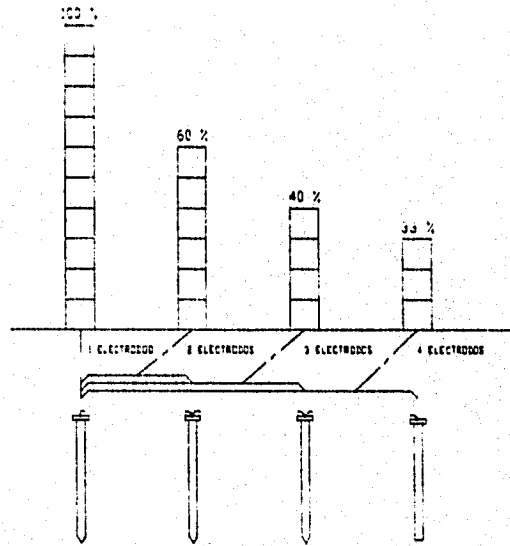


FIGURA 1.16 RESULTADOS PROMEDIO OBTENIDOS PARA VARIOS ELECTRODOS A TIERRA.

Cuando se usan varios electrodos, estos deben estar separados entre sí una distancia mayor que su longitud enterrada. No se cuestionan las razones técnicas, pero basta saber; si se analizan las curvas de la figura (1.17), donde se determinan dos electrodos en paralelo de 3 m. y 3m. de separación aumenta a 60 cm., la reducción disminuye hasta 50 %.

CAPITULO 1

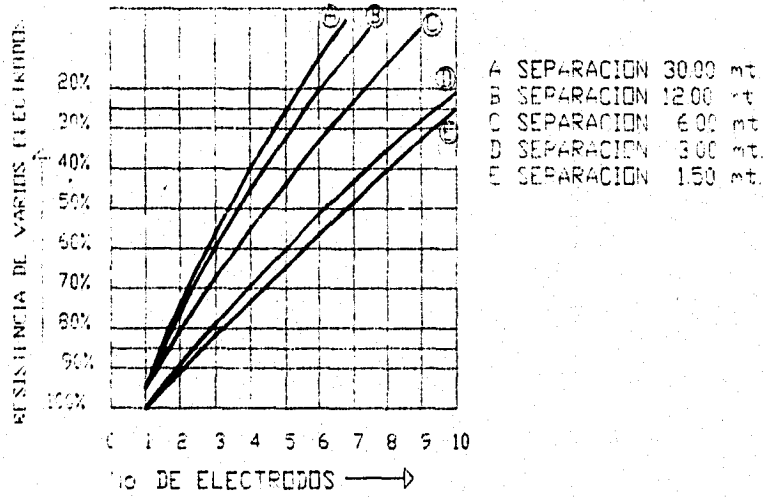


FIGURA 1.17 RESISTENCIA COMPARATIVA DE VARIOS ELECTRODOS
ELECTRODO SENCILLO = 100 %

1.6.10 TRATAMIENTO QUIMICO DEL SUELO.

El tratamiento químico del suelo es un buen medio para bajar la resistencia del mismo, cuando los electrodos de tierra ya no se pueden enterrar más, debido a la dureza del suelo. Se tiene que considerar, sin embargo, el efecto corrosivo en el electrodo. Normalmente compuestos como el sulfato de magnesio, sulfato de cobre y sal de roca no son corrosivos. Se piensa que también el tratamiento químico no es un medio permanente de mejorar la resistencia de tierra de los electrodos, pues los compuestos químicos llegan a lavarse (a desaparecer) con la lluvia y el drenaje natural del suelo. Dependiendo de la porosidad del terreno y de la cantidad de la lluvia, los períodos de renovación del tratamiento químico varían. Pero se puede decir que duran algunos años.

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA.

Una de las ventajas del tratamiento químico es que reduce la variación de la resistencia del suelo que se presenta por cambios de estaciones y advenimientos de temporadas de sequía y humedad; como se puede ver en la curva de la figura No. (1.18).

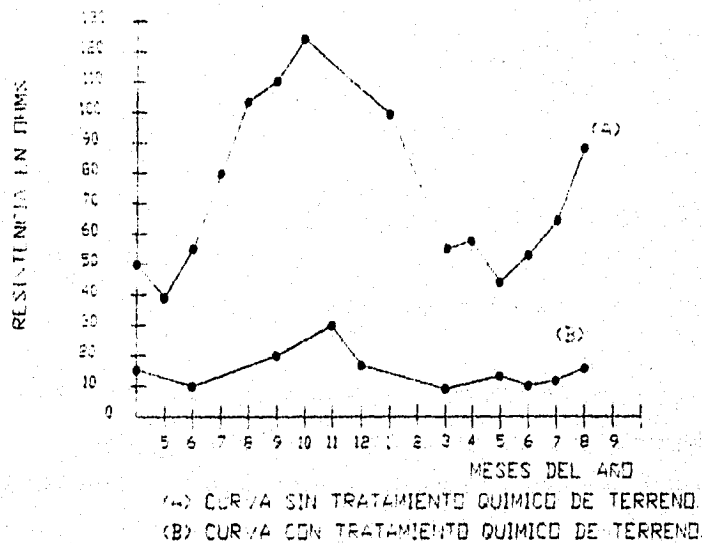


FIGURA 1.18. COMPORTAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD DE ACUERDO CON EL TRATAMIENTO QUIMICO.

1.5.11 METODOS DE APLICACION DEL TRATAMIENTO QUIMICO.

Existen tres maneras o formas de aplicar los elementos o sustancias químicas que se emplean extensamente en la práctica. Estas son:

- Empleando un registro.
- Por medio de una trinchera alrededor del electrodo.

CAPITULO 1

- Creando una bandeja alrededor del electrodo.

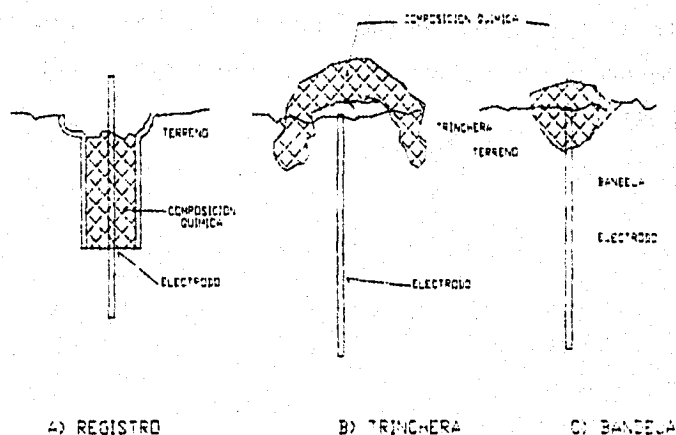


FIGURA 1.19 FORMAS DE APLICAR EL TRATAMIENTO QUÍMICO.

La figura (1.19) muestra claramente la forma de proceder en cada caso, de aplicación del tratamiento químico. Cada método tiene sus ventajas.

El método de registro es empleado en lugares donde el electrodo es colocado en un terreno con suelo superficial de concreto ó similar. Esto es con el fin de poder renovar el tratamiento cuando sea necesario. Ofrece la desventaja de no poder en contacto y de diluirse la sustancia química en el terreno en su totalidad.

El método de trinchera y bandeja se emplea cuando la superficie del terreno es natural. El primero ofrece la ventaja de una distribución mejor del químico en el terreno vecino a la varilla, sin llegarse a problemas de corrosión por el contacto directo de la varilla con el químico.

El tercer método implica problemas de corrosión si el químico, lo es. Pero ofrece la ventaja de tener una disolución en el terreno homogénea.

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA.

Por último, referente a la resistividad se tiene que considerar que un electrodo típico de la misma red o conexión de tierra, puede ser representada esquemáticamente en la figura (1.20), en la cual se muestra como el suelo actúa a la vez como conductor de resistividad (ρ) y como dieléctrico de constante dieléctrica (K). La corriente fugada por el conductor a tierra fluyera en paralelo a la corriente de carga del condensador, en proporciones determinadas por estas constantes. Si el suelo es homogéneo, la geometría incluyendo la trayectoria de la corriente y desde luego la localización de superficies equipotenciales es idéntica para ambos, excepto para altas frecuencias en combinación con muy altas resistividades. La corriente de carga es insignificante comparada con la corriente de escape, por lo tanto se puede considerar al suelo como una resistencia pura.

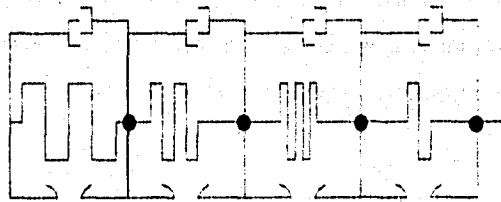


FIGURA 1.20. ESQUEMA REPRESENTATIVO DE UNA CONEXION A TIERRA.

1.6.12 DETERMINACION DE LA MAXIMA CORRIENTE A TIERRA.

Para el cálculo de la máxima corriente de falla a tierra hay que considerar los siguientes pasos.

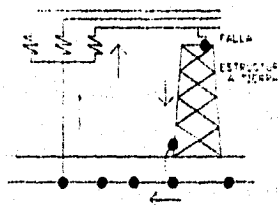
- Determinar el tipo de falla a tierra que resultará en un gran flujo de corriente entre la red de tierra y el terreno periférico a la

CAPITULO 1

misma y por lo tanto, el máximo incremento de gradiente de potencial en el área de la red.

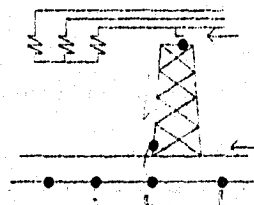
- Determinar por cálculo o análisis, la máxima corriente simétrica (RMS) I'' de la corriente de falla a tierra, fluyendo entre la red de tierra y la periferia, en el instante de iniciación de la falla.
- Aplicar un factor de corrección, donde sea apropiado para compensar los decrementos de magnitud por efecto de corriente directa y alterna. (Tabla 1.10).
- Aplicar un factor de corrección por expansión futura del sistema.

El primer paso, no debe ofrecer dificultad si se hace un diagrama equivalente que represente la situación real. El diagrama deberá incluir cualquier cable, guarda aéreo que este conectado al sistema de tierras o neutro de transformador. Las figuras siguientes muestran algunos casos de falla a tierra.



CASO 1

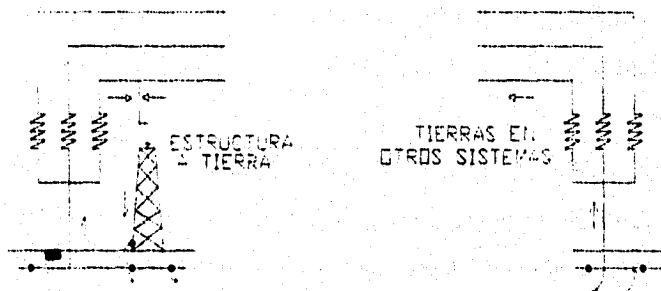
CASO 1- FALLA DENTRO DEL LOCAL DE LA ESTACION DEL SISTEMA DE TIERRAS LOCAL SOLAMENTE, LA CORRIENTE DE FALLA SIGUE EL CAMINO METALICO SUMINISTRADO POR LA RED DE TIERRAS. NINGUNA CORRIENTE APRECIABLE FLUYE A TIERRA.



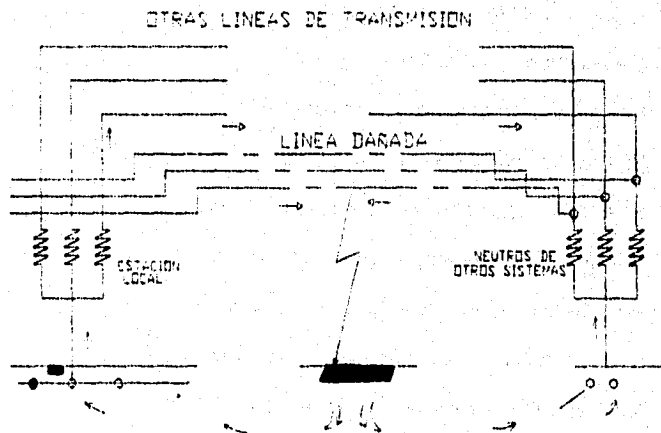
CASO 2

CASO 2- FALLA EN EL LOCAL DE LA ESTACION NEUTRO CONECTADO A TIERRA SOLO EN EL PUNTO REMOTO. LA CORRIENTE TOTAL DE FALLA FLUYE DE LA RED DE TIERRAS HACIA LA TIERRA.

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA.



CASO 3. - FALLA EN LA ESTACION, SISTEMA CONECTADO A TIERRA TANTO EN LA ESTACION COMO EN OTROS PUNTOS. LA CORRIENTE DE FALLA REGRESA AL NEUTRO LOCAL A TRAVES DE LA RED DE TIERRAS Y A LOS NEUTROS REMOTOS A TRAVES DE LA TIERRA, ESTA ES LA COMPONENTE QUE IMPERA EN EL ESTUDIO DE TENSIONES PELIGROSAS.



CASO 4. - FALLA EN LA LINEA FUERA DE LA ESTACION, SISTEMA A TIERRA LOCALMENTE Y EN OTROS PUNTOS, PARTE DE LA CORRIENTE REGRESA DE LA TIERRA AL SISTEMA DE TIERRAS LOCAL Y DETERMINA EL MOMENTO DE POTENCIAL Y GRADIENTE DE POTENCIAL ALLI.

FIGURA 1.21. DISTINTOS TIPOS DE CASOS DE FALLA A TIERRA.

CAPITULO 1

El segundo paso, determinar el máximo valor de I'' , en el momento de falla, puede ser de una manera convencional usando la siguiente ecuación (1.23).

$$I'' = \frac{3E}{3R + 3R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X''_1 + X_2 - X_0)} \quad [\text{AMP}] \quad \dots(1.23)$$

En la mayoría de los casos, los valores de resistencia resultan insignificantes, por lo que de la ecuación (1.23) se desprecian, reduciendo la ecuación a la siguiente expresión:

$$I'' = \frac{3E}{X''_1 + X_2 + X_0} \quad [\text{AMP}] \quad \dots(1.24)$$

De donde:

I'' = es el valor de la corriente simétrica (RMS) de falla a tierra, al instante del inicio de la falla, en amperes.

E = potencial de fase a neutro, en volts.

R = resistencia estimada a tierra, en ohms.

R_f = resistencia mínima estimada de la falla misma, en ohms.

R_1 = resistencia de secuencia positiva, en ohms/fase.

R_2 = resistencia de secuencia negativa, en ohms/fase.

R_0 = resistencia de secuencia cero, en ohms /fase.

X_1 = resistencia de secuencia positiva en ohms/fase.

X_2 = reactancia de secuencia negativa, en ohm/fase.

X_0 = reactancia de secuencia cero, en ohm/fase.

Los valores de R_1 , R_2 , R_0 , X''_1 , X_2 y X_0 son los correspondientes del sistema vistos desde el punto de la falla. Los cálculos se efectúan excluyendo las corrientes que no circulan entre la red local de tierras y la tierra. Ver la figura (1.21 casos 1,3 y 4).

1.5.13 COMPENSACION POR EFECTO DE CORRIENTE**DIRECTA EL FACTOR DECREMENTO.**

En el cálculo anterior ecuación (1.24), se usan factores de corrección para la determinación de la corriente de falla a tierra que se considera para el cálculo de la red de tierra. Los factores de corrección se usan en los siguientes casos.

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

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

$$I'' = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_f^2 dt} = DI'' \quad [\text{AMP}] \dots (1.25)$$

Donde:

$$D = \frac{1}{I''} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_f^2 dt} \dots (1.26)$$

en donde:

CAPITULO 1

I' : valor ajustado (RMS) de la corriente de falla (amperes).

T: tiempos de duración de la falla (del choque en segundos).³

t: tiempo a partir del inicio de la falla (en segundos).

I_f : valor de la corriente (RMS) de la falla a tierra durante "**t**" (amperes).

D: factor de decremento para compensar el efecto de corriente directa y atenuación de la corriente alterna, componentes de falla transitorios de corriente directa.

El valor total depende del rango de atenuación de ambos componentes y la solución completa es verdaderamente compleja. Este valor también se utiliza para aplicaciones de diseño de interruptores.

La solución al problema anterior fue dada a conocer por las normas American Standard C37.5, las cuales establecen un método simplificado para determinar los valores RMS de corriente, para tiempos después de iniciada la falla, usando multiplicadores.

Por ejemplo, el multiplicador de American Standard para el final de la primera media onda (primer medio ciclo), es de 1.6 y así sucesivamente 1.4, 1.2, 1.1, 1.0 para tiempos de 1, 2, 3 y 4 ciclos respectivamente.

Igualmente si aplicamos una solución similar para la ecuación (1.26) tendríamos los factores de decremento dados en la tabla siguiente (1.10).

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

CHOQUE Y DURACION DE LA FALLA T		
SÉGUNDOS	CICLOS (60 Hz C.A.)	FACTOR DE DECREMENTO "D"
0.06	1/2	1.65
0.1	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 ó más.	20 ó más	1.00

TABLA No.1.10

Para valores intermedios de duración de falla, los factores de decremento se pueden encontrar por interpolación lineal.

Aparentemente no deben ser confundidos estos factores con los que propone la American Standard. Estos factores son usados para determinar una corriente efectiva durante un intervalo de tiempo dado, después de la iniciación de la falla, en cambio, los factores A.S.A. son usados para determinar la corriente RMS al final de este intervalo, porque el decremento de los componentes transitorios de corriente directa y alterna son ligeramente más altos, en el tiempo que los factores A.S.A. para depuración de choque y falla de cortos.

Para duraciones relativamente mayores, los efectos de los componentes de C.D. son mayores que las compensaciones de C.A.

1.5.14 FACTOR DE SEGURIDAD POR CRECIMIENTO DEL SISTEMA.

Resulta prudente tomar un margen adecuado para estimar los aumentos futuros de las corrientes de falla por aumento de la capacidad del sistema eléctrico o por interconexiones posteriores, pues las modificaciones siguientes a la red resultan costosas y generalmente se omiten dando motivo a introducir inseguridad en el

CAPITULO 1

sistema. Este efecto puede tomarse en cuenta disminuyendo la impedancia del sistema o aplicando un factor de seguridad al valor calculado de la corriente de falla.

1.5.15 EFECTOS DE LA RESISTENCIA DEL TERRENO.

En la mayoría de los casos, es suficiente con encontrar la corriente de falla a tierra con la ecuación (1.24) con los valores de reactancia, desechando únicamente la resistencia de falla. El error así provocado es pequeño y siempre dentro de márgenes de seguridad.

Cuando la resistencia es mayor, en relación con la reactancia del sistema, entonces debe tomarse en cuenta y emplear la ecuación (1.23). Esto plantea un problema si la red de tierras no está diseñada, esta resistencia no se conoce. La resistencia de la red depende de su diseño y el diseño depende de la corriente a tierra, que es lo que trata de encontrarse. Afortunadamente este círculo vicioso puede ser roto para propósitos prácticos. La resistencia, una vez que la resistividad ha sido determinada, depende primeramente del terreno y del área que va ser ocupada por la red. Esta se conoce usualmente en pequeñas etapas, entonces la resistencia puede ser calculada por la expresión de la fórmula (1.27).

$$R = \frac{\rho}{4r} [\Omega] \dots (1.27)$$

De donde:

r = es el radio de un círculo equivalente del área que ocupa la red, (en metros).

1.6 DISEÑO PRELIMINAR DE UNA CONEXION A TIERRA.

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

Tipo de conexión de tierras, Primeramente supondremos que la red estará formada básicamente por conductores horizontalmente acomodados y sepultados directamente en la tierra a cierta profundidad.

Esta práctica es la más común y ofrece muchas ventajas y han sido estudiadas desde hace años por THE AIEE APLICATION GUIDE ON METODS OF SUBESTATION GROUNDING, él definitivamente la recomienda:

Donde observamos que algunas ventajas son las siguientes:

En sistemas donde la máxima corriente a tierra puede ser muy alta, que difícilmente podemos obtener una resistencia a tierra tan baja, que asegure que el aumento de potencial de la red de tierra, no alcance valores fuera de seguridad al contactos del ser humano.

En este caso la dificultad del peligro, puede ser corregido solamente por control de potenciales locales. Una red es lo más práctico para lograrlo.

En un recinto eléctrico, un solo conductor no es suficiente para proporcionar la conductividad necesaria y si a esto hay que agregar la conexión de estructuras, motores, máquinas, etc; una red resulta más conveniente. Si esta red esta bien enterrada y con varillas suficientes, es por sí misma, una conexión a tierra.

1.6.1 DISEÑO PRELIMNAR DE UNA RED DE TIERRAS.

El plano con el arreglo de equipo "layout", será el que principalmente nos sirva como base para trazar lo que será una red de tierras.

Como un cable continuo alrededor del recinto (normalmente de 3 a 5 metros de separación de la pared exterior) será la red o cable perimetral, después de esto y tomando en cuenta las concentraciones de carga se trazan cables derivados, de

CAPITULO 1

preferencia espaciados equitativamente y así formar una malla que a su vez, permita fácilmente sacar terminales o derivaciones para conectar el equipo y estructuras. Pero debe hacerse la aclaración, que el exceso de cruces de cables y conexiones reduce la eficiencia de la conexión a tierra, puesto que en cada conexión vamos agregando resistencias de contacto.

En otros casos hay que prever suficientes cables que aseguren múltiples trayectorias a tierra, especialmente cuando se trata de conexión de neutros de transformadores, para minimizar caídas de potencial en la red misma y al mismo tiempo garantizar la continuidad en caso de daños mecánicos al conductor de la red.

1.6.2 CONEXIONES A LA RED.

Se deben emplear cables suficientes de alta rigidez mecánica y capacidad eléctrica para conectar a la red los siguientes elementos:

Todas las partes metálicas capaces de conducir corrientes eléctricas (en cualquiera de sus formas) y que pueden ser energizadas accidentalmente o por operaciones de proceso, por ejemplo; estructuras, varillas, carcasas, tanques de transformadores, hilos de guarda, etc.

Varillas dispersadas a tierra, terminales, tuberías, guarda, etc.

Equipo de protección contra descargas atmosféricas, bancos de capacitores, secundarios de circuitos de fuerza y alumbrado.

Estas conexiones pueden hacerse mediante conectores del tipo mecánico, presión y soldable.

Para resistir la fusión o deterioro de juntas eléctricas, bajo las condiciones más adversas; de combinación de magnitudes de corriente y duración de falla, a las cuales pueda estar sujeta.

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

Con rigidez mecánica de alto grado, especialmente en lugares expuestos a daños físicos.

Tener suficiente conductividad de modo que no contribuya a formar diferencias de potencial locales peligrosas.

La forma de conocer estos requerimientos es como sigue:

Los conductores de cobre y sus uniones resistentes a la fusión, pueden ser determinados por la tabla No. (1.11).

CALIBRE MINIMO DE UN CONDUCTOR DE COBRE PARA EVITAR LA FUSION

DURACION DE LA FALLA (SEG)	CABLE *	CONEXIONES SOLDABLES *	CONEXIONES MECANICAS *
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0.5	5	6.5	8.5

TABLA No. 1.11

* EL AREA ESTA EN CIRCULAR MILS.

También se puede conocer el área del conductor por medio de la ecuación desarrollada por ONDERDUNK, sobre la cuál se elaboró la tabla No. (1.11).

$$I = A \sqrt{\frac{\log_{10} \left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{33(8)}} \quad [\text{AMP}] \dots (1.28)$$

de donde:

I = corriente de falla (en amperes)

CAPITULO 1

A = sección transversal del conductor (circular mils).

S = tiempo (en segundos) en que dura I aplicada

Tm= temperatura permisible (en grados centígrados)

Ta= temperatura del medio ambiente (en grados centígrados)

Para la aplicación de esta ecuación normalmente se hacen las siguientes consideraciones:

Temperatura ambiente: 40 °C

Punto de fusión del cobre: 1083 °C

Temperatura permisible en uniones mecánicas: 450 °C

Temperatura en uniones soldables 250 °C

Para determinar el tiempo de duración de la falla, se analiza el tiempo de apertura de los interruptores. Con el fin de tener mayor seguridad y absorber casos de mayor tiempo de duración de la falla se considera 0.5 seg (30 ciclos).

1.6.3 LONGITUD DEL CONDUCTOR REQUERIDO PARA CONTROL DE GRADIENTE DE POTENCIAL.

Se ha desarrollado ya una ecuación matemática que permite el cálculo rápidamente del conductor de la red, necesario para conservar los voltajes de contacto dentro del área de la red con los límites de seguridad.

Los voltajes de contacto son usados para efectos de cálculo, en lugar de los de paso y transferencia por las razones siguientes:

Los voltajes de paso encontrados en instalaciones industriales son menores que los voltajes de contacto, la resistencia de la tierra están en serie y en paralelo y por lo tanto limitan mejor la corriente al cuerpo.

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA

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

Se considera "voltaje de rejilla", a la diferencia de potencial en volts, del conductor de la red a la superficie de la tierra y en el centro de la rejilla de la red. Este es generalmente mayor que el voltaje de contacto a un metro de distancia del conductor.

Para valores comunes de conductor, electrodos, profundidad y espaciamiento, los valores son del siguiente orden:

$$E_p = (0.1 \text{ a } 0.15)\rho, \text{ [volts]} \dots (1.29)$$

$$E_t = (0.6 \text{ a } 0.8)\rho, \text{ [volts]} \dots (1.30)$$

$$E_r = \rho, \text{ [volts]} \dots (1.31)$$

de donde:

E_p = voltaje de paso (en volts) a una distancia de un metro.

E_t = voltaje de contacto (en volts).

E_r = voltaje de la red (en volts).

ρ = resistividad (en ohm/metro)

La ecuación (1.31) desarrollada por Laurent, utiliza promedios de diámetros de conductor, profundidad de cable y red con espaciamiento iguales de celdillas. Por lo tanto, los valores obtenidos son aproximaciones. Si se desea entrar en detalles y obtener valores específicos, entonces podemos modificar la ecuación de acuerdo a como se indica en la ecuación (1.32).

CAPITULO 1

$$E_R = K_m K_i \rho \frac{I}{L} \text{ [volts]} \dots (1.32)$$

de donde:

K_m = es un coeficiente que toma en cuenta el efecto del número n ; espaciamento D , diámetro d , profundidad de la red h , de los conductores de una red. Este valor (K_m) en términos de los factores mencionados se define como:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} L_n \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} L_n \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{7}{8}\right) \dots (1.33)$$

el número de factores en el paréntesis en el segundo término, es dos veces menor que el número de conductores en paralelo en la red básica excluyéndose las conexiones de cruces.

K_i = es el factor de corrección de irregularidades, para compensar la uniformidad de la corriente a tierra fluyendo desde la red. Su determinación se encuentra en la figura (1.22).

ρ = es la resistividad promedio de tierra (Ω/m).

I = es la máxima corriente (RMS) en amperes, fluyendo entre la red y la tierra, ajustada ya con los factores de decremento y de ampliación futura.

L = es la longitud del conductor enterrado en metros.

Si el valor del voltaje de la red E_R , dado por la ecuación (1.32) es igualado al máximo voltaje tolerable dado por la ecuación (1.6), tenemos entonces que:

$$\frac{K_m K_{II} \rho}{L} = \frac{165 + 0.25 \rho_z}{t} \dots \dots \dots (1.33)$$

despejando "L" tendremos:

$$L = \frac{K_m K_{II} \sqrt{t \rho}}{165 + 0.25 \rho_z} \dots \dots \dots (1.34)$$

Se debe considerar como longitud total, la longitud del cable horizontal, más las longitudes de las varillas verticales, marcos metálicos que estén enterrados, partes de estructuras metálicas que estén enterradas e interconectadas, etc.

En los casos en que la longitud del cable encontrado en la ecuación (1.34) resulta antieconómico, debe tomarse en cuenta, lo mencionado anteriormente y entonces considerar una red más pequeña.

1.7 EFECTO POR IRREGULARIDADES FACTOR KI.

La mayoría de los estudios teóricos al respecto, consideran condiciones ideales en la red, resistividad uniforme, redes simétricas con rejillas de dimensiones iguales todas. Con estas consideraciones, la corriente por unidad de longitud fluyendo por el borde de la red, será mayor en las orillas que en el centro y todavía en las esquinas los gradientes de potencial varían proporcionalmente.

En la práctica difícilmente se encuentran estas condiciones ideales y por lo tanto, hay que pensar que para condiciones distintas hay que aplicar un factor de corrección.

Armstrong y Koch, realizaron una serie de experimentos con varios modelos de redes en un estanque con agua para encontrar los voltajes de red en el centro de

CAPITULO 1

rejillas, encontrándose estos como porcentajes del aumento de voltaje total IR de la red.

El interés de conocer las diferencias de potencial locales, entonces en la figura (1.22), Koch muestra cada una de las diferencias sustraídas del 100% y reportadas como varias diferencias de potencial entre la red y los centros de algunas rejillas. También como porcentajes del aumento total de voltaje de red IR, en la figura (1.23) pueden verse ilustrados los efectos de las irregularidades en una red.

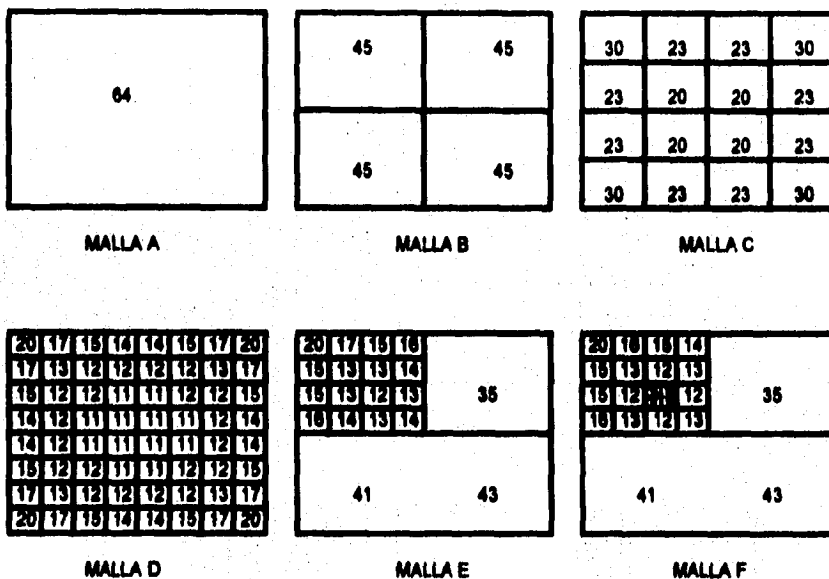
Con esto ahora se puede cuantificar, para cada caso de I y L, es decir obtener datos directos y aplicables, en las ecuaciones (1.32) y (1.34) de factor K_i de irregularidades.

Desafortunadamente Koch, no reporto la resistencia de la red, corriente y/o resistividad del agua que había en sus pruebas, por lo tanto el aumento total del voltaje IR debe expresarse en función de I y L.

Con los valores calculados para cada porcentaje de la figura (1.23), se tienen los coeficientes que se representan en la figura (1.22). Estos coeficientes son el producto de K_m y K_i para la ecuación (1.33) que multiplicado por (ρ/L) nos da el potencial de la red.

Un análisis simple de la figura (1.22) sugiere donde el potencial es mayor, conviene que la red tenga rejillas más cerradas en ese punto, por ejemplo en las esquinas el uso de varillas reduce el valor de potencial.

ASPECTOS GENERALES DE LA CONEXION A TIERRA



LAS FIGURAS NOS MUESTRAN, LOS DIAGRAMAS DE LOS VOLTAJES DE MALLA, EXPRESADOS COMO UN PORCENTAJE DEL TOTAL DEL INCREMENTO DE POTENCIAL DE MALLA IR. ESTOS SON CON BASE A LAS PRUEBAS REALIZADAS POR KOCH.

MALLA	A	B	C	D	E	F
EL CONDUCTOR TOTAL DE MALLA						
LA LONGITUD "L" EN METROS	55,2	62,8	138	240,4	117,3	120,7
LA RESISTENCIA "R" EN OHMS POR OHMS-METRO DE RESISTIVIDAD	0,052	0,047	0,042	0,038	0,043	0,043

LAS LONGITUDES Y LAS RESISTENCIAS ESTAN PARA LOS MODELOS EQUIVALENTES A ESCALA DE LAS MALLAS DE LOS MODELOS PROBADOS POR KOCH.

FIGURA 1.22 EL EFECTO DE LA MALLA, PARA DIFERENTES ESPACIOS.

CAPITULO 1

1,83

MALLA A

1,74	1,74
1,74	1,74

MALLA B

1,73	1,33	1,33	1,73
1,33	1,16	1,16	1,33
1,33	1,16	1,16	1,33
1,73	1,33	1,33	1,73

MALLA C

1,60	1,60	1,40	1,20	1,20	1,40	1,60	1,60
1,60	1,20	1,10	1,10	1,10	1,10	1,20	1,60
1,40	1,10	1,10	1,00	1,00	1,10	1,10	1,40
1,20	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,10	1,20
1,20	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,10	1,20
1,40	1,10	1,10	1,00	1,00	1,10	1,10	1,40
1,60	1,20	1,10	1,10	1,10	1,10	1,20	1,60
1,60	1,60	1,40	1,20	1,20	1,40	1,60	1,60

MALLA D

1,00	0,90	0,60	0,60	1,82
0,80	0,70	0,70	0,70	
0,80	0,70	0,60	0,70	
0,80	0,70	0,70	0,70	
2,13				2,23

MALLA E

1,00	0,60	0,60	0,60	1,82
0,80	0,70	0,60	0,70	
0,60	0,60	0,60	0,60	
0,80	0,70	0,60	0,70	
2,23				2,23

MALLA F

LAS FIGURAS MOSTRADAS ARRIBA NOS MUESTRAN LOS DIAGRAMAS DE LOS PRODUCTOS DE LOS COEFICIENTES $K_m \times K_i$ QUE KOCH DETERMINO CON DATOS EXPERIMENTALES.

MALLA	A	B	C	D	E	F
VALOR MAXIMO $K_m \times K_i$ COMO SE REGISTRO ARRIBA	1,83	1,74	1,73	1,30	2,23	2,23
EL COEFICIENTE K_m COMPUTADO EN LA PRUEBA	1,82	1,50	1,16	0,86	1,50	1,5
COEFICIENTE $K_i = \frac{K_m \times K_i}{K_m}$	1,00	1,18	1,47	2,21	1,49	1,49

PUEDE NOTARSE QUE LOS VALORES DE K_i PARA LAS MALLAS A, B, C Y D CONFORMAN LA CURVA EMPIRICA $K_i = 0,65 + 0,172 n$, DONDE n ES EL NUMERO DE CONDUCTORES EN PARALELO DE LA MALLA EN UNA DE SUS DIRECCIONES, EXCLUYENDOSE LAS CONEXION EN CRUZ.

FIGURA 1.23 DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES K_m Y K_i USANDO LA ECUACION

$$E_{PASO} = K_m K_i \rho \frac{l}{l_c}$$

1.6 DETERMINACION DEL NUMERO DE VARILLAS O ELECTRODOS A TIERRA.

A este respecto existe poca información, para la determinación del número de varillas que se requieran en un sistema, sin embargo, con las anotaciones anteriores podemos deducir que pueden o deben ir donde los potenciales sean mayores como en las esquinas de la red, para completar la magnitud mínima y a través del cálculo para reducir la resistividad del sistema en puntos clave.

La resistencia de una varilla cooperweld de 15.8 mm. de diámetro y una longitud de 3.048 m., en cualquier terreno es:

$$R_v = 0.41\rho \quad [\Omega] \dots\dots\dots(1.35)$$

Y el número de varillas se determina en función del área para asegurar una resistencia de red de 25Ω como máxima, marcada por el Reglamento de Obras e Instalaciones Eléctricas (ROIE), aunque en realidad siempre se usa como un valor práctico para instalaciones industriales; el de 1 a 6 y que se denominará R_m ; o sea, considerado una red con un conductor de resistencia muy alta y las varillas nos darán la conductividad necesaria.

La gráfica de la figura (1.24), muestra valores directamente, el número de varillas a emplear, primeramente se calcula la relación de la ecuación (1.36), de conductancia.

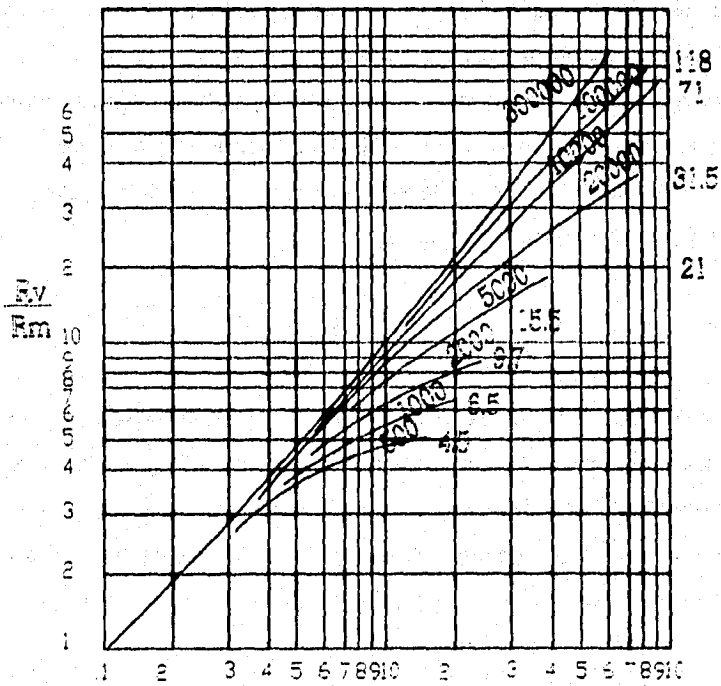
$$\frac{\text{Conductancia p/ un grupo de varillas}}{\text{Conductancia p/ una varilla}} = \frac{1}{R_m} = \frac{R_v}{R_m} \dots\dots\dots(1.36)$$

CAPITULO 1

El área de la red se obtiene en pies cuadrados.

A = 1 PIE CUADRADO

Y en la gráfica se determinará el número de varillas.



NUMERO DE VARILLAS

NOTA: Los números colocados sobre las curvas indican la superficie en pies cuadrados. Los números colocados en los extremos de las curvas indican el número de veces máximo, que puede reducirse la resistencia de una varilla.

FIGURA 1.24. GRAFICA PARA DETERMINACION DEL NUMERO DE ELECTRODOS.

1.8.1 CALCULO DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE TIERRAS.

Es un método muy simple, el empleado para calcular la resistencia de tierra se usa una modificación de la ecuación (1.27), adicionando otro término:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} [\Omega] \dots \dots \dots (1.37)$$

con el segundo término se compensa la diferencia de resistencias que existe entre una área circular y una red real.

1.8.2 CALCULO DEL MAXIMO INCREMENTO DE POTENCIAL EN LA RED.

Tomando la resistencia de la red por la orilla y considerándolo como valor único, el máximo incremento será:

$$E = IR \text{ [Volts]} \dots \dots \dots (1.38)$$

donde:

I : es la corriente máxima de corto circuito

R : es la resistencia de la red de tierras

Para muy bajos valores de resistencia y corriente, este valor resulta por si solo menor al mínimo requerido, marcado por la ecuación (1.6) y por lo tanto, habiendo encontrado este valor, se puede considerar que se tiene un buen diseño de la red, quedando pendiente su chequeo en campo.

1.8.3 CORRECCION O REFINAMIENTO DEL DISEÑO PRELIMINAR.

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

Reduciendo la resistencia total de la red, se reducirá el máximo incremento de potencial en la red, y por lo tanto, los potenciales transferidos. La forma mas

CAPITULO 1

efectiva para reducir la resistencia de la red es incrementar el área ocupada por la red. Si el espacio es reducido, entonces se soluciona aumentando el número de varillas.

Mejorando el control de gradientes, esto se logra mediante rejillas más cerradas, esto es aumentar el número de conductores en paralelo. Con esto los potenciales peligrosos dentro del recinto eléctrico, pueden quedar eliminados, sin embargo siguen existiendo dichos potenciales peligrosos en el exterior de la red.

Para eliminar estos potenciales perimetales, se recomienda agregar otro cable perimetral por la parte exterior de la red, que vaya paralelamente a la red preliminar, con esto el problema se soluciona definitivamente.

Aumentar la resistencia de la superficie, para incrementar las resistencias que están en serie con el cuerpo humano, esto se logra aumentando la capa que cubre una red con roca, grava seca u otro material que opere como aislante.

Diversificar la trayectoria de la corriente de falla. Conectando la red a partes metálicas aterrizadas de 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 las líneas de transmisión.

Limitando la corriente de corto circuito fluyendo a tierra a valores menores ya sea mediante resistencia o reactancias.

Bloquear el acceso a áreas limitando donde sea prácticamente imposible eliminar las posibilidades de diferencias de potencial peligrosas.

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

CAPITULO No. 2

**" PROTECCION CONTRA EL RAYO Y LA ELECTRICIDAD
ESTATICA "**

CAPITULO 2

2.1 INTRODUCCION.

En todos los tiempos, se han buscado los medios de protegerse contra los peligros del rayo.

Esta necesidad se convierte en una obligación imperiosa, en razón de la evolución actual del urbanismo, de las concentraciones de inmuebles colectivos, administrativos, industriales, etc. que presentan frecuentemente masas importantes y elevadas.

Los graves siniestros registrados cada año, confirman desgraciadamente esta evidencia.

Hasta los últimos treinta años, los medios utilizados para protegerse contra choques del rayo, han sido insuficientes.

Por otro lado, la acumulación de electricidad estática en equipos, materiales, procesos, inclusive el cuerpo humano, introduce un serio peligro por los potenciales generados, que cuando son descargados se originará un arco, que a su vez, puede ocasionar un fuego o explosión con las consecuencias de pérdidas de vidas humanas y económicas.

2.2 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA PROTECCION CONTRA RAYOS.

El principio fundamental de la protección de vidas y bienes contra rayos es que proporcione un medio por el que una descarga eléctrica atmosférica puede penetrar en la tierra, o dejarla, sin que haya daño o pérdida consiguiente alguna. Tiene que proporcionarse un camino de baja impedancia que será el que la corriente de descarga siga, prefiriéndolo a todos los demás caminos

alternativos que le ofrezcan los materiales de la construcción con alta impedancia, como por ejemplo tabiques, madera, etc.

Cuando el rayo sigue los caminos de impedancia alta, el calor y las fuerzas que se generan durante el paso de la descarga pueden causar daños. La mayoría de los metales resultan virtualmente inmunes a la acción del calor o de fuerzas mecánicas, siempre que su tamaño sea suficiente para que soporten la corriente que cabe esperar. El camino metálico tiene que ser continuo, desde la terminal de tierra hasta la terminal aérea. Debe ponerse el mayor cuidado en la elección de los conductores de metal, para que aseguren su integridad durante largo tiempo. Un metal no ferroso, tal como cobre o aluminio, suministrará, en la mayoría de las atmósferas o ambientes, un conductor duradero libre de los efectos de la herrumbre o la corrosión.

2.2.1 FORMACION DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS.

Existen varias teorías para explicar la acumulación de cargas eléctricas en las nubes. De acuerdo con una de ellas, las gotas de agua existentes en una nube bajo la acción de una corriente ascendente de aire frío, empiezan a congelarse y aparece una diferencia de potencial entre las gotas de agua que quedan cargadas positivamente y son arrastradas por la corriente ascendente de aire a la parte superior de la nube. Las gotas que se han congelado y acumulado formando cristales de hielo más pesados que tienen una carga negativa, descienden a la parte inferior de la nube.

Esta carga negativa induce una carga positiva en la tierra; debido a la gran extensión de la tierra, el gradiente de potencial producido por esta carga es generalmente bajo, excepto cuando existen protuberancias como edificios altos,

CAPITULO 2

torres, líneas de transmisión, etc. En cambio los gradientes de potencial en la nube, debidos a la carga eléctrica negativa en la parte inferior, pueden ser muy altos y alcanzará un valor capaz de iniciar una descarga a través del aire, de intensidad relativamente baja y de polaridad negativa. Cuando esta descarga alcanza la tierra se produce una corriente de gran intensidad y de polaridad positiva que circula en sentido inverso, de la tierra a la nube. Este proceso se ilustra en la figura (2.1), además se muestra la forma típica de una onda de corriente debida a un rayo, figura (2.2).

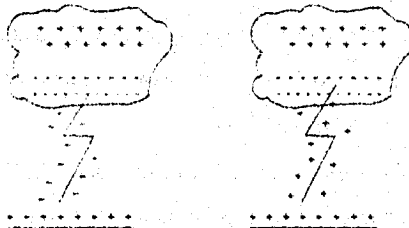


FIGURA 2.1. PROCESO DE LA DESCARGA DE UN RAYO.

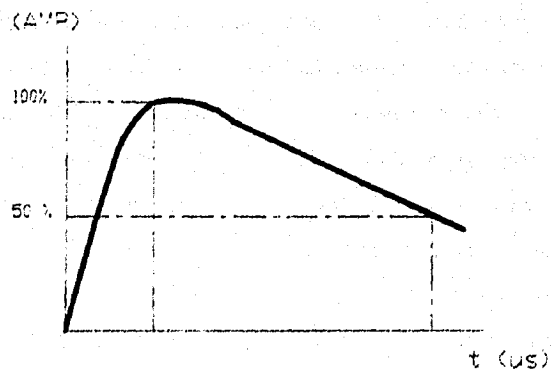


FIGURA 2.2. FORMA TÍPICA DE UNA ONDA DE CORRIENTE DEBIDA A UN RAYO.

2.2.2 CARACTERISTICAS DE LAS DESCARGAS DIRECTAS.

Las instalaciones de pararrayos deben estar dimensionadas para soportar los valores de tensión, corriente, duración y número de descargas que aparezcan como más probables, en base a observaciones realizadas.

Intensidad de corriente: Entre 10 y 200 KA.

Diferencia de potencia: Entre 100 y 600 KV.

Número de descargas: Entre 1 y 10 .

Duración de un rayo completo: Menos de un segundo
(desde que se inicia la migración de la carga negativa
de la nube hasta la extinción del arco).

Carga eléctrica: 100 coulombs como máximo

Energía : 20 Kw-h como máximo.

2.3 EFECTOS PRODUCIDOS POR LOS RAYOS.

Los efectos producidos por los rayos son: térmicos, dinámicos, acústicos y químicos.

2.3.1 EFECTOS TERMICOS.

Son los más importantes para el estudio que se realiza, desarrollan los rayos una energía térmica igual a:

$$W = R \int i^2 dt \dots\dots(2.1)$$

- W = energía en joules.
- i = valor instantáneo de la corriente en amperes.
- t = tiempo en segundos.
- R = resistencia en ohms.

CAPITULO 2

Siempre es aceptable que la energía térmica desarrollada por el rayo sea mínima, por lo tanto, debemos tener un bajo valor de R . Cuando la corriente de rayo atraviesa materiales buenos conductores y de sección amplia no produce cantidades apreciables de calor; pero si son reducidas, como en el caso de puntas afiladas, o si en las conexiones el contacto es defectuoso, pueden generarse temperaturas tan altas que provoquen la fusión de las puntas y de los conectores. Cuando el rayo atraviesa materiales aislantes se puede originar su ignición cuando están secos y hasta su explosión cuando están húmedos.

2.3.2 EFECTOS DINAMICOS.

La energía producida por los rayos no es muy grande, pero si liberada en lapsos de tiempo muy pequeños, por lo cual la potencia alcanza valores muy altos.

Al producirse la descarga principal de retorno de un rayo la intensidad de corriente es muy elevada, lo cual produce, en torno del conductor principal, la ionización de los gases circundantes, generando ondas de presión a lo largo del conductor que provocan efectos dinámicos a su alrededor. Así mismo, la corriente de descarga produce un intenso campo magnético alrededor del conductor, lo cual provoca corrientes inducidas y acciones electrodinámicas, las corrientes y tensiones inducidas pueden alcanzar tan altos valores que originen descargas eléctricas secundarias entre partes metálicas adyacentes.

Los efectos acústicos y químicos se reducen al sonido producido por el trueno, la producción de ozono y la liberación de nitrógeno en la atmósfera, respectivamente. Estos efectos no representan gran importancia en el estudio de la presente tesis.

2.4 SISTEMAS DE PROTECCIÓN.

Las medidas de protección, que se pueden adoptar, para proteger a personas, equipos, construcciones, etc. contra efectos del rayo, se dividen en dos grupos: "Protección Pasiva" y "Protecciones Activas".

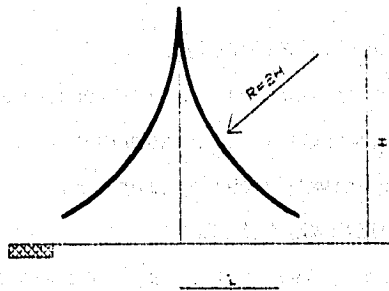
2.4.1 PROTECCION PASIVA.

La protección pasiva es la de mayor uso, la protección más perfecta, esta basada en las experiencias desarrolladas por el físico James Faraday; la Jaula de Faraday de acuerdo con ella, si se tiene una envoltura metálica cerrada y conectada a tierra, no se transmitirá a su interior ningún fenómeno eléctrico que se produzca en el exterior o en la estructura de dicha envoltura.

Este sistema es empleado en áreas pequeñas a proteger puesto que resultaría demasiado costo en áreas grandes por lo que se han creado otras formas de protección más simplificadas.

Se ha comprobado experimentalmente que una barra metálica conectada a tierra y colocada verticalmente sobre el terreno define una zona de protección contra las descargas atmosféricas directas, limitada a un cono cuyo eje es la propia barra y con un radio igual a la altura de esta sobre el terreno, en protecciones poco importantes puede considerarse un radio igual al doble de la altura de la barra y en casos muy críticos igual a la mitad.

CAPITULO 2



H = ALTURA DE LA BARRA
r = RADIO DE PROTECCION (PRACTICO).
R = RADIO DE CONO.

$r = h/2$ casos críticos
 $r = h$ casos normales
 $r = 2h$ casos poco importantes

FIGURA 2.3. ESQUEMA DE PROTECCION DE UN MASTIL.

De la misma manera, un conductor instalado horizontalmente encima del área a proteger, conectado a tierra define una zona de protección análoga a la de un mástil o barra vertical, a este arreglo se le conoce como telepararrayo. Figura (2.4).

Por consiguiente utilizando barras y/o telepararrayos puede obtener una protección adecuada a grandes áreas.

Además es necesario realizar un estudio técnico-económica para definir las necesidades más convenientes de protección y de los elementos necesarios para realizarla.

PROTECCION CONTRA EL RAYO Y LA ELECTRICIDAD ESTATICA

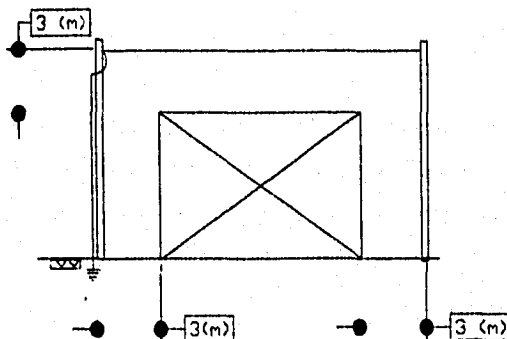


FIGURA 2.4 DISPOSICION FISICA DEL TELEPARARRAYOS.

2.4.2 PROTECCIONES ACTIVAS.

Las protecciones activas son aquellas que neutralizan las diferencias de potencial entre las nubes y tierra y por lo tanto, evitan la producción de descargas directas.

El pararrayos ideado por Benjamín Franklin, en el año de 1760, conocido también como pararrayos de punta, pretendía además de proporcionar un camino de baja resistencia a las descargas directas, favorecer la dispersión en la atmósfera de las cargas que se acumulan en el terreno, provocando de esta manera la neutralización de las cargas contenidas en la parte inferior de la nube. Se ha comprobado experimentalmente que la cantidad de electricidad que la punta del pararrayos puede dispersar es muy pequeña comparada con las cargas que puede almacenar una nube, por lo tanto la acción preventiva proporcionada por este tipo de pararrayos es prácticamente nula. Por otro lado, en caso de que ocurra una descarga directa sobre la punta, esta se fundirá debido a la alta corriente que debe conducir y a su alta resistencia,

CAPITULO 2

consecuentemente desaparecerá la punta y se convertirá en un pararrayo pasivo.

Se han hecho muchos experimentos con los pararrayos de puntas sin llegar a resultados preventivos satisfactorios, actualmente se están desarrollando instalaciones a base de sistemas que contienen millares de puntas, utilizando instalaciones aéreas de alambre de púas soportado en torres que rodean las áreas a proteger.

Posiblemente los tipos de pararrayos preventivos más eficientes sean los de tipo radioactivo. Este tipo de pararrayos, produce un elevado número de iones que son dirigidos hacia la nube a fin de neutralizar las cargas de esta, evitando de esta manera la formación de una descarga directa.

2.4.3 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE PARARRAYOS.

Cualquier tipo de pararrayos esta compuesto de los siguientes elementos:

1. Un elemento receptor de la carga.

Se instala en la parte superior del área que se desea proteger y es el que proporciona la protección activa ó pasiva, según el tipo, evitando la producción de descargas o proporcionándoles un camino de baja impedancia para su rápida dispersión en tierra.

2. Conductores o circuito a tierra.

Los conductores pueden tener forma de barra o tubo cuando se requiera de rigidez o flexibilidad, su sección transversal de diversas formas y materiales siempre que sean buenos conductores eléctricos y de área suficiente para poder conducir la corriente del

rayo. Normalmente los materiales a emplear son cobre, acero cobreado, acero galvanizado, etc.

3. Electrodo a tierra.

También dispersores, constituyen el punto de unión entre el sistema y el terreno facilitando la dispersión de la corriente en el mismo.

En el punto crítico del sistema, ya que de no tener una baja resistencia a tierra se logran condiciones de seguridad satisfactorias.

Estos tres elementos requieren de juntas o conexiones entre ellas y deben de ser en el menor número posible y procurando que sea del mismo material para evitar la corrosión electrolítica. Las juntas deberán de tener las mismas características eléctricas y se pueden emplear de tipo mecánico, soldables y de remaches.

El elemento de soporte debe ser tal que ofrezca una rigidez mecánica confiable a los efectos dinámicos que presenta la corriente de rayo. También es conveniente que sea del mismo material para evitar la corrosión electrolítica.

2.4.3 FACTORES QUE DETERMINAN LA NECESIDAD DE PROTECCION.

— Frecuencia y severidad de las tormentas.

La frecuencia y severidad de las tormentas varían de una región a otra; de aquí que las necesidades de protección sean diferentes para cada región. En algunos casos, la frecuencia de las tormentas pueden ser el factor determinante para instalar la protección, pero en otros, pocas pero severas tormentas eléctricas en una estación,

CAPITULO 2

pueden hacer más grande la necesidad de protección que una gran número de tormentas de ligera intensidad.

— Valor y naturaleza del edificio y su contenido.

Obviamente, el valor y naturaleza del edificio y su contenido son factores esenciales que determinan si el gasto de la protección contra descargas atmosféricas es justificado.

— Riesgo personal.

El riesgo personal en el interior del edificio o bajo el área de protección no debe ser menospreciado y debe tomarse en cuenta en el buen dimensionamiento del sistema.

2.5 CRITERIO DE DISEÑO.

De acuerdo a las diferentes normalizaciones existentes puede concluirse, el uso de los siguientes criterios sobre los más importantes factores a decidir en el desarrollo del proyecto de un sistema de protección, así como sus especificaciones. Estos factores son:

- _ Ubicación de las puntas.
- _ Trayectoria de las puntas.
- _ Conexiones a tierra.
- _ Conexiones adicionales.
- _ Sistemas de instalaciones.
- _ Especificaciones de materiales.

2.5.1 UBICACION DE LAS PUNTAS.

Las puntas de protección deben colocarse sobre las cumbreras de los techos inclinados y en los planos, sobre los pretiles de los perímetros, tanto interiores como exteriores, así como en las esquinas.

Además de lo anterior, deben colocarse puntas en todas las partes no metálicas de las azoteas cuyo nivel sea mayor al de los pretiles.

En general, se considera 60 cm. como la distancia máxima a la que deben colocarse las puntas del objeto que protegen.

2.5.2 ESPACIAMIENTO DE LAS PUNTAS DE PROTECCION.

El espaciamento entre las puntas localizadas en perímetros y cumbreras no deben exceder de 6 m, excepto cuando las puntas tengan 60 cm. ó más en cuyo caso, los intervalos no deben exceder de 7.5 m.

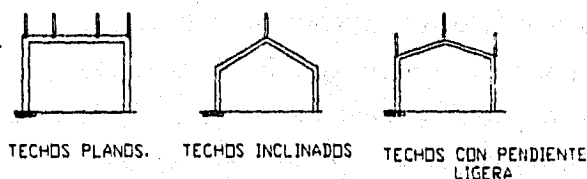


FIGURA 2.6. COLOCACION DE PUNTAS.

La forma de las puntas pueden ser sólidas o tabuladoras. Las primeras deben tener una sección mínima de 132.73 mm^2 , si son de cobre y de 198.07 mm^2 si son de aluminio. Las puntas tabuladoras deberán tener un diámetro exterior de 15.8 mm y un espesor de pared no menor de 0.812 mm.

CAPITULO 2

La altura de las puntas debe ser tal que su extremo superior quede a un nivel mínimo de 25 cm. y máximo de 90 cm. por encima del nivel más alto del objeto que se desea proteger.

Las puntas de protección deben fijarse a los mismos o que se soporten directamente. Cuando una punta tenga una longitud igual o mayor a 60 cm. deberá fijarse a un punto no menor de la mitad de longitud.

El recorrido de los conductores en los techos que sirve de interconexión con las puntas, deben formar un circuito cerrado con dos trayectorias mínimas de bajada a tierra. Las obstrucciones deberán ser evitadas y se rodearan en la trayectoria de conductor teniendo en cuenta que el radio mínimo de curvatura será de 20 cm. Y el ángulo de la curva no será diferente de 90 °, así como conservar una trayectoria horizontal.

2.6.3 TRAYECTORIA DE CONDUCTORES DE BAJADA.

Cualquier tipo de estructura salvo esta banderas, mástiles o similares debe tener por lo menos dos bajadas. Su localización será tan separada como sea posible, preferentemente en diagonal, en esquinas opuestas.

Cuando se tenga un perímetro que exceda de 95 m, debe tenerse una bajada adicional por cada 30 m de perímetro o fracción.

Los conductores de bajada deben ser protegidos de daños mecánicos y de corrosión. Se puede emplear para su protección materiales de madera, plásticos, etc. debiéndose evitar la protección con elementos metálicos, de no ser posible, se conectarán los extremos de la protección metálica al conductor del sistema.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

PROTECCION CONTRA EL RAYO Y LA ELECTRICIDAD ESTATICA

En el caso de la protección por corrosión con ácido puede protegerse con tubos revestidos de plomo o bien al propio cable del sistema.

2.5.4 CONEXIONES A TIERRA.

Cada conductor de bajada debe conectarse a tierra en forma permanente de acuerdo a las condiciones del terreno.

El medio de conexión debe hacerse en tal forma que prevea una suficiente superficie de contacto entre el electrodo y el terreno y que permita la disipación de una descarga sin causar daño, para ello se pueden utilizar medios tales como varillas de acero revestidas de cobre, placas metálicas, cables etc. En general es conveniente que la resistencia de cada electrodo independiente, sea baja, se considera que valores de 20 a 50 ohms son suficientes. En terrenos de baja conductividad (200 - 5000 $\Omega/cm.$).

Los electrodos deberán ser instalados a una distancia de 60 centímetros del límite de la construcción protegida.

2.5.5 CONEXIONES ADICIONALES.

Los cuerpos metálicos permanentemente unidos a una estructura pueden contribuir al peligro de una descarga ya sea debido a descargas directas sobre ellos o bien a que ellos se induzcan cargas eléctricas. En el primer caso pueden considerarse casetas, antenas, techos metálicos, ornamentos, etc.; en el segundo, cuerpo metálico cuya posición relativa, con respecto al sistema de pararrayos (menos de 1.80 m) facilita el que se induzcan cargas con potencial opuesto al de la tierra, lo que origina el peligro de descargas laterales, como por ejemplo de este tipo de elemento pueden considerar en exteriores; tanques de

CAPITULO 2

almacenamiento, rieles, elementos de fachadas, etc., en interiores; elementos estructurales, tuberías de vapor, gas, etc.

Para la debida protección de estos cuerpos metálicos, se deben interconectar al sistema de pararrayos, mediante cables de igual sección que los conductores principales en el caso de elementos conductivos, en el caso de los elementos inductivos, mediante conductores de enlace en edificios de menos de 25 m de altura, o iguales a los conductores principales en los de mayor altura.

2.5.6 DISPOSITIVOS DE PROTECCION COMPLEMENTARIA.

Un sistema de protección contra descargas que al incidir fuera de la construcción sobre los conductores de servicio eléctrico telefónico, antenas de radio, etc., pueden llegar a la construcción. A fin de que dichas instalaciones queden debidamente resguardadas deben instalarse dispositivos de protección (apertarrayos) en los puntos de entrada al edificio (o cualquier recinto), de los servicios mencionados.

2.6 PROTECCION CONTRA LA GENERACION DE ELECTRICIDAD ESTATICA.

Los primeros fenómenos observados de la electricidad fueron hechos por los griegos muchos miles años antes. Este fenómeno consistió en la observación del hecho que cuando el ámbar se frotaba con un paño de lana, el trozo de ámbar tenía la habilidad de atraer o repeler ligeros objetos.

Este fenómeno que en la actualidad se conoce como "electricidad estática", puede ser causa de serios problemas y accidentes en la vida moderna.

2.6.1 FUNDAMENTOS ACERCA DE LAS CAUSAS DE LA ELECTRICIDAD ESTATICA.

Es un cuerpo o sustancia neutro sin carga, los electrones, los cuales son la carga negativa del átomo y los protones, que son la carga positiva, están presentes exactamente en cantidades iguales y estos pueden ser separados por el gesto e energía usualmente por energía mecánica, térmica y química.

La electricidad estática es generada por el contacto y separación de diferentes materiales. Cuando los materiales están en contacto íntimo, los electrones de un material pueden moverse a través de la interfase a la superficie del otro, entonces el primer material tendrá una deficiencia de electrones y el segundo contará con un exceso o deficiencia en aproximadamente 100 000 átomos y la carga es muy fuerte.

Si el fenómeno sucede entre dos materiales buenos conductores, el exceso de electrones retornará al material que sufrió la disminución de electrones antes de terminar el contacto entre ellos.

Si por el contrario sucede entre materiales aislantes el exceso y deficiencia de electrones, permanecerá en cada material quedando "latente" la carga eléctrica, originando de este modo un peligro.

Este peligro se representa por la necesidad del material de igualar su carga. Este esfuerzo del átomo por equilibrar su carga eléctrica, puede originar una descarga eléctrica a un punto que le ofrezca la manera de neutralizar su carga.

2.6.2 CONDICIONES QUE AFECTAN LA PRODUCCION DE CARGAS ESTATICAS.

CAPITULO 2

El proceso de generación de electricidad estática y el valor de ella depende grandemente de las siguientes variables:

- _ Características de los materiales.
- _ Velocidad de separación.
- _ Área en contacto.
- _ Movimiento entre sustancias.
- _ Condiciones atmosféricas.

2.6.3 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES.

El grado de carga electrostática que puede existir entre dos materiales debe ser proporcional a la diferencia de sus constantes dieléctricas. Tanto que la carga positiva es usualmente mostrada en materiales de alta constante dieléctrica.

2.6.4 VELOCIDAD DE SEPARACION.

Si la velocidad de separación de dos sustancias de carga opuesta es aumentada también, es mayor a la carga que almacena cada material, incrementándose de esta manera la diferencia de potencial entre ellos.

2.6.5 AREA DE CONTACTO.

El área de contacto de sustancias es directamente proporcional al grado de electrificación porque a mayores áreas de contacto mayor será el grado de transmisión de iones positivos e iones negativos de una sustancia a otra.

2.6.6 CONDICIONES ATMOSFERICAS.

Las condiciones de temperatura y humedad son factores que dan un efecto al comportamiento del grado de carga eléctrica que puede obtener un material: A mayor humedad menor cantidad de acumulación de carga.

A menor cantidad de calor menor será la acumulación de carga.

2.7 VOLTAJES POSIBLES QUE SE PUEDEN ESPERAR EN ALGUNOS PROCESOS.

La tabla No.(2.1) muestra los valores de diferencia de potencial que se pueden esperar en algunos procesos.

RANGO DE VOLTAJE ESTATICO EN ALGUNOS PROCESOS.	
TIPO DE EQUIPO	RANGO DE VOLTAJE OBSERVADO EN KVA.
CINTAS EN MOVIMIENTO (BANDAS)	60 - 100
MANUFACTURAS MANUALES	15 - 60
MAQUINAS DE PAPEL	5 - 100
CARROS TANQUE	ARRIBA DE 25
BANDAS DE GRANO	ARRIBA DE 45

TABLA No.2.1

La tabla No. (2.2) muestra algunas distancias para diferentes tensiones a las que puede saltar la chispa, suficiente para proporcionar energía de ignición para algunas sustancias.

VOLTAJE KV	DISTANCIA mm.	VOLTAJE KV	DISTANCIA mm.
5	5.7	60	118.0
10	11.9	70	146.0
15	18.4	80	166.8
20	25.4	90	212.0
30	41.0	100	244.0
35	51.0	110	273.0
40	62.0	120	301.0
45	75.0	130	364.0

DISTANCIA DE ARQUEO PARA CARGAS ESTATICAS
TABLA No. 2.2

CAPITULO 2

El peligro propio que representan las cargas electrostáticas es el originar la chispa que provoque la ignición o explosión en algunos lugares donde se manejen sustancias de fácil combustión, explosión, etc.

La cantidad de energía que pueda causar ignición se calcula por la expresión de la ecuación siguiente:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \times 10^{-9}$$

Donde:

E: es la energía necesaria para la ignición en millijoules.

C: la capacitancia en pico farads.

V: potencial en volts.

2.7.1 METODOS DE DETECCION DE CARGAS ELECTROSTATICAS.

Existen diferentes métodos de detectar y evaluar los potenciales presentes en las sustancias y equipos. Algunos de ellos solo para uso en laboratorios y otros en la industria.

- Electroscopio
- Vólmetro electrostático
- Tubo de neón
- Tubo de vacío- vólmetro
- Detector de tubo electrónico
- Indicador de cargas estática

PROTECCION CONTRA EL RAYO Y LA ELECTRICIDAD ESTATICA

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

- La aviación
- La industria del carbón
- Las harineras y manejo de granos
- Refinerías y Petroquímicas
- La industria de la pintura
- Las imprentas y papeleras
- La industria de la pólvora
- La industria del hule
- La industria textil
- Hospitales

Se puede notar que el número de industrias que se ven sujetas al peligro que encierra el tener procesos que revisten un gran peligro en sus procesos de operación, se hace necesario entonces, la protección contra estas cargas electrostáticas.

Esta protección se realiza de varias maneras. Primero se cuenta con la experiencia de años de trabajo, y que como resultado de ella se han efectuado las clasificaciones de áreas de trabajo peligroso.

Las siguientes clasificación de áreas a locales peligrosos fueron del CODIGO NACIONAL ELECTRICO (NEC) de los Estados Unidos de Norteamérica.

CAPITULO 2

- Clase I:** Locales en los cuales existen o pueden existir gases inflamables y/o vapores en la atmósfera en cantidad suficiente para producir mezclas explosivas o inflamables.
- Clase II:** Locales en los cuales existen la presencia de polvos combustibles.
- Clase III:** Locales que son peligroso debido a la presencia de fibras o partículas fácilmente combustibles.

Dentro de cada clasificación de locales, el NEC reconoce dos divisiones. Para la clase 1, estas divisiones son:

- DIVISION 1:** Comprende las áreas que deben ser consideradas como peligrosas debido a la existencia de vapores o gases inflamables bajo condiciones normales.
- DIVISION 2:** El criterio para la clasificación de estos locales, es que en ellos se presentan vapores inflamables, solamente bajo condiciones anormales, tales como rotura o falla del equipo que contenga estos gases.

Además de acuerdo a los materiales implicados, los locales se subdividen en grupos. La clase I comprende los grupos A, B, C y D. La clase II los grupos E, F y G.

Algunas de las sustancias comprendidas en cada grupo son las siguientes:

PROTECCION CONTRA EL RAYO Y LA ELECTRICIDAD ESTATICA

Grupo A	Acetileno
Grupo B	Hidrógeno y gases o vapores de peligrosidad similar.
Grupo C	Etileno, Eter, Ciclopropano, etc.
Grupo D	Acetona, Amoníá, Butano, Propano, Gasolina, Alcohol, Heptano, Hexano, Petróleo, etc.
Grupo E	Povos metálicos, tales como los de Aluminio, Magnesio, etc. y sus aleaciones comerciales y otros metales de características peligrosas similares.
Grupo F	Povos no metálicos y electricamente conductores. Polvo de coque, carbón negro y materiales similares.
Grupo G	Povos electricamente no conductores, pero encendibles. Povos de almidón, harinas y granos.

2.7.2 METODOS Y ELEMENTOS DE PROTECCION.

El proteger vidas humanas, equipo, materiales y edificios de las cargas electrostáticas, no basta solo con realizar conexiones a tierra de todos y cada uno de los equipos que generan estas carga, puesto que los materiales son en muchos casos aislantes y estos presentan un alto valor de resistividad, por lo que las cargas no serán conducidas a tierra. Es por lo tanto que se recomienda seguir alguno de los siguientes métodos.

2.7.3 CONTROL DE HUMEDAD.

Donde la alta humedad no afecta los materiales y equipos esta se puede emplear para producir uno de los mejores caminos para controlar las cargas estáticas. El vapor inyectado en el área es especialmente necesario donde las cargas electrostáticas son acumulables, es tal vez el mejor camino para suplir la humidificación. El grado de humedad relativa que es requerida para el control de las cargas electrostáticas es difícil para determinar y varía con los procesos,

CAPITULO 2

sin embargo se recomienda un 60 % de humedad. Donde los procesos son afectados adversamente por la humedad, el uso de aire acondicionado puede ser un buen medio de control.

2.7.4 EFECTO ELECTROSTATICO.

Esta forma de control consiste de un rastrillo metálico, conectado a tierra, que este en contacto con los materiales de proceso, empleado mayor mente en la industria del grano y lugares de agitación de sustancias.

2.7.5 PISOS CONDUCTORES.

El uso de pisos de alto grado de conductividad o de muy baja resistencia, para que no se originen chisporroteos. El uso de zapatos conductores por los operadores reduce grandemente el peligro de chisporroteo.

2.7.6 PROTECCION DE EQUIPOS ELECTRICOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS.

Las sobretensiones más peligrosas a las cuales están expuesto los sistemas eléctricos son las provocadas por las descargas atmosféricas. Para reducir sus efectos pueden aplicarse diferentes dispositivos de protección tales como apartarrayos.

2.8 CARACTERISTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS Y SUS EFECTOS.

Las descargas atmosféricas producen sobretensiones en los sistemas eléctricos, ya sea, por descargas directas o por inducción electrostática, debidas a los campos eléctricos producidos entre las nubes y la tierra. Las tensiones máxima que se producen entre la línea y la tierra son para las descargas directas del orden de 15 MV, las descargas inducidas, que son las

PROTECCION CONTRA EL RAYO Y LA ELECTRICIDAD ESTATICA

más frecuentes, pueden producir tensiones de varios cientos de kilovoltios. Las corrientes de descarga pueden ser de varios cientos de kiloamperes.

Cuando se produce una descarga atmosférica en una línea aérea, las ondas de tensión y de corriente viajan aproximadamente a la velocidad de la luz en ambas direcciones de la línea (ver fig 2.6), si esta es uniforme la magnitud y forma de onda (ver figura 2.7) no variarán a lo largo de la trayectoria.

Las ondas de tensión y de corriente se identifican por su valor de cresta, por el tiempo en microsegundos que tarda en alcanzar su valor de cresta desde su origen y por el tiempo que tarda en decaer hasta el 50 % del valor de cresta.

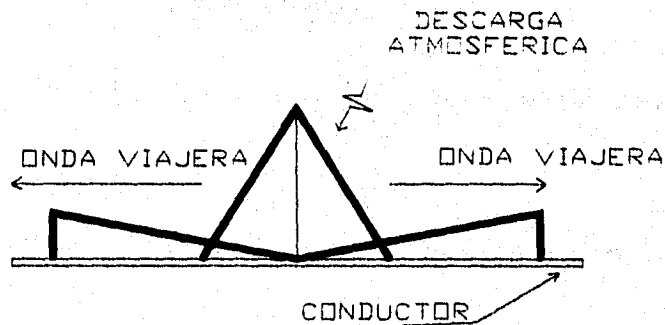


FIGURA 2.6. DESCOMPOSICION DE LA DESCARGA SOBRE UNA LINEA AEREA.

CAPITULO 2

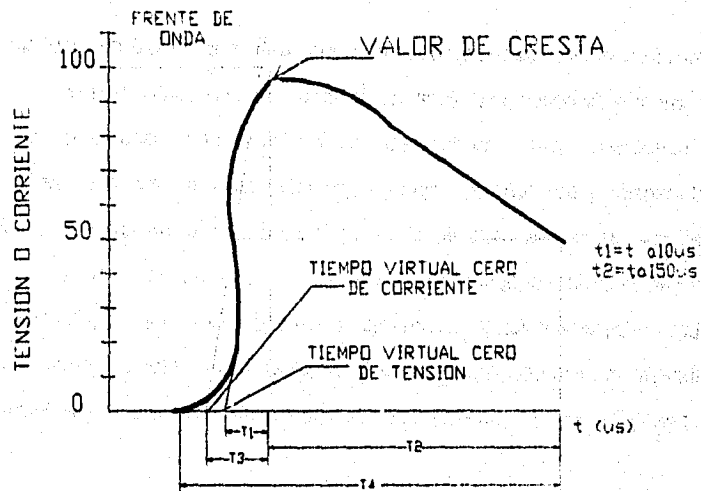


FIGURA 2.7. ONDA CONVENCIONAL DE TENSION O CORRIENTE.

La velocidad de las ondas de tensión y de corriente a lo largo de conductor es:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left[\frac{m}{s} \right] \dots\dots(2.2)$$

La impedancia característica de la línea se determina por la expresión siguiente:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ [ohms]} \dots\dots(2.3)$$

En la tabla No.(2.3) se dan algunos valores típicos de velocidades e impedancias características, para conductores y máquinas eléctricas, cuando una onda viajera circula por un conductor.

PROTECCION CONTRA EL RAYO Y LA ELECTRICIDAD ESTATICA

EQUIPO ELECTRICO	IMPEANCIA EN OHMS	VELOCIDAD DE ONDA m/us
LINEAS AEREAS	200 -- 800	300
CABLES	25 -- 40	100 -- 300
MOTORES	100 -- 3000	7 -- 30
TRANSFORMADORES	100 -- 20 000	120 -- 250
GENERADORES	40 -- 300	12 -- 30

VALORES TÍPICOS DE IMPEDANCIA Y DE VELOCIDADES DE ONDA.
TABLA NO. 2.3

Todas las ondas viajeras muestran un marcado cambio al circular por la unión de dos conductores de diferente impedancia. La onda original, llamada "onda incidente", da origen a dos ondas diferentes en el punto de transición la "onda refractada" que continua a lo largo del conductor derivado y la "onda reflejada" que circula por el primer conductor en sentido opuesto original, sumándose o restándose de ella.

Si:

E: tensión de la onda incidente en el punto de transición.

Er: tensión de la onda reflejada en el punto de transición.

Err: tensión de onda refractada.

Z₁: impedancia característica del conductor principal.

Z₂: impedancia característica del conductor derivado.

Se puede deducir:

$$E_r = \frac{E(Z_2 - Z_1)}{Z_2 + Z_1} \text{ [Volts]} \dots\dots\dots(2.4)$$

CAPITULO 2

$$Err = E + Er = \frac{2EZ_2}{Z_2 + Z_1} \quad [\text{Volts}] \dots\dots (2.5)$$

2.8.1 AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS.

Las máquinas eléctricas deben estar provistas del sistema de aislamiento adecuado para resistir las sobretensiones durante su vida útil.

Una de las características de los aislamientos es que la máxima tensión que deben soportar, en forma continua, es inversamente proporcional al tiempo que dure la sobretensión.

Por lo tanto, es necesario hacer un estudio técnico económico para determinar el punto óptimo entre el costo de la protección y el costo del equipo de utilización como son los conductores y máquinas con aislamiento, para que tengan una vida útil razonable.

El equipo que estará sujeto a estas sobretensiones debe ser capaz de soportar las pruebas:

_ Prueba de baja frecuencia a 60 Hz.

Usualmente de un minuto de duración que determina la habilidad del aislamiento para soportar sobretensiones modernas.

_ Prueba de impulso.

Determina la habilidad del aislamiento para soportar sin dañarse, sobretensiones de gran magnitud pero corta duración.

Las sobretensiones de origen atmosférico son de gran magnitud y de corta duración, por consiguiente debe efectuarse la prueba de impulso al aislamiento de los equipos que estén expuestos a este tipo de sobretensiones.

La prueba de impulso consiste en la aplicación al aislamiento de onda de tensión completa de $1.5 \times 40 \mu s$ ó de $62 \times 50 \mu s$ de un valor de cresta determinado. el valor de cresta de la onda es llamado "NIVEL BASICO DE IMPULSO DEL AISLAMIENTO" conocido como BIL o NIB.

Diversos organismos e institutos de investigación, entre otros IEEE, NEMA, CCONNIE, han establecido una serie de valores de tensión de cresta con objeto de simplificar el diseño y la aplicación de los aislamientos al equipo eléctrico dependiendo de sus condiciones de operación. (Ver tabla No. (2.4) al final del capítulo 2).

Para la protección de los equipos eléctricos que se ven sometidos a las descargas es necesario el uso de APARTARRAYOS que desvían a tierra estas descargas.

2.8.2 APARTARRAYOS (TIPOS Y FUNCIONAMIENTO).

Los apartarrayos tienen la característica de ofrecer una baja impedancia en presencia de sobretensiones y una impedancia muy alta cuando estas no están presentes. Según la teoría de las ondas viajeras, la tensión en el punto de unión con las terminales del equipo a proteger será menor que la tensión de onda incidente, siempre que la impedancia característica del apartarrayo sea menor que la impedancia de la línea.

Actualmente el tipo de apartarrayos más usado es el de resistencia variable (auto valvular). Esta formado por discos superpuestos de materiales especiales derivados del carbón y designados por el fabricante por diferentes nombres, en serie con los discos tienen un conjunto de espacios disruptivos, formando una

CAPITULO 2

unidad, encerrados en un cuerpo de porcelana con tapa y fondo metálicos donde se fijan las terminales de la línea y las de puesta a tierra.

2.6.3 SELECCION Y APLICACION.

La tensión nominal de un apartarrayo es designada por la tensión máxima, entre línea y tierra de operación permisible entre sus terminales, el cual esta destinado para ejecutar su ciclo de trabajo.

Este rango de tensión se indica en la placa de datos. Esta tensión no representa la de la descarga disruptiva, que según las normas de fabricación no debe ser menor, a 60 Hz, del 50 % de su tensión nominal. Las características de funcionamiento en apartarrayos Tipo Autovalvular están resumidas en la tabla No. (2.5).

Los apartarrayos autovalvulares se clasifican como sigue:

Secundarios	De 0.175	a	0.650	KV
Distribución	De 3	a	15	KV
Línea	De 20	a	73	KV
Estación	De 3	a	664	KV

2.6.4 LOCALIZACION.

Los apartarrayos deben localizarse tan cerca como sea posible del equipo que se desea proteger:

- En las terminales de los transformadores con terminales aéreas.
- En las terminales de las líneas aéreas.
- En todos los puntos de unión de las líneas aéreas.
- En las terminales de motores que operen con tensiones mayores de 1000 volts cuando son alimentados por líneas aéreas.

PROTECCION CONTRA EL RAYO Y LA ELECTRICIDAD ESTATICA

NIVELES DE AISLAMIENTO NORMALIZADOS PARA EQUIPOS

TENSION NOMINAL DEL EQUIPO KV (SIFCAZ)	TENSION MAXIMA DE DISEÑO KV (SIFCAZ)	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO NOMINAL (NIV DE FASES A TIERRA EN CUBIERTA)		TENSION RESISTENTE NOMINAL A 60 HZ DE FASE A TIERRA KV (SIFCAZ)
		DESGARDO DE 50% KV	TORNADA DE 50% KV	
4.4 6.9 13.8 24.0 34.0 50.0	4.4 7.2 10.5 20.4 30.0 40.0	65 75 85 110 150 200	75 85 95 110 150 200	19 28 34 50 70 95
TENSION NOMINAL DEL EQUIPO KV (SIFCAZ)	TENSION MAXIMA DE DISEÑO KV (SIFCAZ)	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO NOMINAL (NIV DE FASES A TIERRA EN CUBIERTA)	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO NOMINAL (NIV DE FASES A TIERRA EN CUBIERTA)	TENSION RESISTENTE NOMINAL A 60 HZ DE FASE A TIERRA KV (SIFCAZ)
60.0 110.0 150.0 180.0 240.0	72.0 123 165.0 170.0 240.0	200.0 250.0 300.0 350.0 400.0 450.0 500.0 550.0 600.0 650.0 700.0 750.0 800.0 850.0 900.0 950.0 1000.0 1050.0 1100.0	200.0 250.0 300.0 350.0 400.0 450.0 500.0 550.0 600.0 650.0 700.0 750.0 800.0 850.0 900.0 950.0 1000.0 1050.0 1100.0	180.0 185.0 230.0 180.0 230.0 275.0 270.0 275.0 320.0 320.0 320.0 370.0 370.0 370.0 370.0 370.0 370.0 370.0 370.0
TENSION NOMINAL DEL EQUIPO KV (SIFCAZ)	TENSION MAXIMA DE DISEÑO KV (SIFCAZ)	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO NOMINAL (NIV DE FASES A TIERRA EN CUBIERTA)	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO NOMINAL POR MANEJADORES DE FASES A TIERRA EN CUBIERTA)	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO NOMINAL POR MANEJADORES (NIV DE FASES A FASE EN CUBIERTA)
100 705	120 800	1000 1175 1350 1425 1500 1580 2100	800 900	1425 1500 2400 2500

TENSIONES NOMINALIZADAS PRESENTES UNIDAS EN MEXICO.

TABLA No. 2.4

CAPITULO 2

CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO EN APARATOS TIPO AUTO VALVULARES												
TIPO DE APARATOS Y RANGO DE VOLTAJE KV	FRONTE DEL FLAMBO DE LA ONDA DE IMPULSO											
	RANGO DE ALBERTO SI POR 1000	VOLTAJE DE DESCARGA KV EN 1000 MICROSEGUNDOS										
		KV			1000 AMPERES			10 000 AMPERES				
		PROB.	MAX.	(V)	PROB.	MAX.	(V)	PROB.	MAX.	(V)		
DISTRIBUCION												
3	25	18	23	23	14	17	17	16	20	20	18	23
5	50	34	46	46	26	34	34	30	38	38	34	44
6	75	46	62	62	38	51	51	44	57	57	51	66
9	100	61	77	77	46	62	62	56	69	69	62	78
12	125	73	91	91	61	77	77	66	87	87	78	98
15												
LINEA												
30	157	75	90	95	83	99	91	82	108	108	101	116
35	208	95	111	105	101	116	111	111	128	122	121	138
30	250	110	132	126	121	138	138	136	158	149	149	172
37	308	138	163	154	146	172	164	164	189	181	181	208
40	338	147	176	167	161	186	177	177	204	195	196	225
60	417	183	220	208	202	232	225	222	269	248	243	288
60	500	220	264	260	242	278	267	271	312	290	288	344
73	638	267	330	302	297	342	336	336	378	361	368	414
ESTACION												
3	25	13	15	15	10	11	11	11	13	12	12	14
6	50	23	26	26	20	22	22	22	25	23	24	27
9	75	35	38	38	30	33	32	32	37	36	36	38
12	100	43	50	48	40	44	43	44	48	47	47	51
15	125	53	61	59	50	55	54	54	60	58	58	63
30	167	72	83	80	67	74	72	72	80	77	78	84
35	208	88	102	98	83	92	89	90	98	96	100	107
30	250	108	122	117	100	110	110	107	128	119	118	126
37	308	131	151	144	124	137	138	132	148	141	146	158
40	338	138	167	150	134	148	143	144	168	164	168	184
60	417	178	205	198	167	184	178	178	197	191	191	211
60	500	214	248	238	202	230	214	217	239	231	234	258
73	638	261	300	288	246	278	268	268	298	278	288	313
97	835	348	397	388	329	388	348	348	384	372	377	418
100	835	358	408	397	338	408	368	368	394	384	384	433
121	1038	433	488	474	408	444	428	428	482	462	462	517
145	1288	518	588	568	488	538	508	508	582	562	562	622
168	1488	622	688	668	568	624	588	588	672	652	652	722
188	1633	681	768	750	647	713	681	681	768	744	744	822
242	2017	880	988	948	828	927	888	872	980	961	968	1054

TABLA No. 25

CAPITULO No. 3

" PROTECCION CONTRA FALLA A TIERRA "

CAPITULO 3

3.1 INTRODUCCION.

La falla a tierra tiene su origen en el rompimiento de los aislamientos y las causas se pueden resumir en:

- Reducción del aislamiento, debido a la humedad atmosférica, contaminación, objetos extraños, erosión del aislamiento, etc.
- Daño físico a los aislamientos.
- Excesivos transitorios o estados estacionarios de impulsos de voltaje sobre los aislamientos.

Este problema se soluciona en parte con buenas medidas de seguridad y mantenimiento. Empleando algún sistema de tierras vistos con anterioridad, también puede lograrse un control relativo de los efectos producidos por la falla a tierra.

Sin embargo, no bastan los puntos anteriores para protección del sistema eléctrico. Es necesario entonces tener un sistema de protección contra fallas a tierra.

En esta sección se esbozan dos formas y procedimientos con que se cuentan para tal fin. Así como algunos principios que deben ser tomados en cuenta.

3.2 FALLAS DE ARQUEO.

El mayor problema alrededor de la falla de arco son las interrupciones de fuerza, la destrucción del equipo y el peligro asociado al personal. La energía presente durante una falla de arco es localizada y puede ocasionar vapores de cobre o aluminio (según el material del conductor), esta energía puede también destruir y originar gases tóxicos del aislamiento orgánico del sistema.

PROTECCION CONTRA FALLA A TIERRA

La continuidad del arco en el punto de la falla puede generar grandes cantidades de energía y fuerzas electromagnéticas, esto tiende a propagar y transferir la falla a áreas no consideradas dentro del área fallada. En efecto la experiencia ha mostrado que el punto de la falla de origen y el punto más dañado no son los mismos.

3.2.1 FALLAS A TIERRA FRANCA.

La falla franca de línea de tierra se considera solo en sistemas de media y alta tensión. Y sus consecuencias se han analizado anteriormente.

3.3 CALCULO DE LAS CORRIENTES DE FALLA A TIERRA.

En el diseño de un sistema eléctrico siempre se acostumbra a considerar las máximas condiciones de falla. Y estas condiciones sirven para determinar la máxima capacidad interruptiva requerida en el sistema eléctrico.

La magnitud de la corriente de falla a tierra puede variar grandemente de un sistema a otro. Usando el método de componentes simétrica.

La corriente de falla de línea a tierra I en un sistema trifásico se puede calcular por la expresión siguiente:

$$I_{CF} = \frac{3V_{L-N}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_g} \dots\dots\dots(3.1)$$

Donde:

Z_1 : es la impedancia de secuencia positiva.

Z_2 : es la impedancia de secuencia negativa.

$Z_0 + 3Z_g$ es la impedancia de secuencia cero.

CAPITULO 3

El término $Z_0 + 3Z_0$, es la suma de la impedancia del camino del arco y la impedancia del neutro del sistema eléctrico.

TIPO DE FALLA	VOLTAJE NOMINAL DEL SISTEMA		
	0.40	0.38	0
LINEA-TIERRA	0.40	0.38	0
*LINEA-LINEA	0.65	0.74	0.02
*TRIFASICA	0.04	0.09	0.12

*NO INCLUYE TIERRA
TABLA No.3.1 VALORES DE "K"

Es interesante notar que si la falla ocurre en las terminales de la fuente se tendrá:

$$Z_1 = Z_2 = Z_0 \quad \text{y} \quad Z_0 = 0$$

Y esto en la ecuación (3.2) daría:

$$I_{corren} = K \left(\frac{3E}{3Z_1} \right) = K \left(\frac{E_{L-N}}{Z_1} \right)$$

Donde $\left(\frac{E_{L-N}}{Z_1} \right)$ expresa la corriente de corto circuito trifásico, entonces:

$$I_{corren} = K(I_{\phi_m})$$

Debe observarse que no obstante , que si la falla de línea a tierra por arqueo ocurre en otra parte del sistema, (Z_g) no será cero. El valor de ($Z_0 + 3Z_g$) viene a incrementar grandemente los valores de impedancia Z_1 y Z_2 como una ventaja para el sistema.

3.3.1 SELECCION DEL DISPOSITIVO DE PROTECCION.

La máxima protección contra fallas a tierra pueden ser obtenidas por la aplicación de la protección requerida por los diferentes tipos de carga. La mínima corriente de operación para toda la serie de dispositivos es alrededor del mismo.

La expresión de la ecuación (3.1) se emplea para determinar la magnitud de corriente de falla en sistemas de media y alta tensión, donde los problemas por falla de arqueo son minimizados por la presencia de un valor superior de tensión, considerándose despreciables la impedancia del arco.

En los sistemas de bajo voltaje donde se incrementa el reporte de fallas de arqueo, con problemas muy serios como los mencionados con anterioridad. Es necesario considerar la corriente de falla por arqueo.

Ahora bien calcular los valores exactos de corriente por falla de arqueo es una labor difícil, por varias razones:

- Los resultados son influenciados por la geometría, espacio, medio ambiente y las características del sistema.
- La forma de onda de corriente es generalmente irregular, con un contenido de armónicas.
- La corriente es de frecuencia discontinua.

CAPITULO 3

La corriente de falla a tierra, por arco es menor que la corriente de falla franca y esta reducción es contabilizada por una constante "K", la cual es una relación de la falla franca y de arco:

$$I_{GF \text{ arc}} = K \left(\frac{3E_{L-N}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_g} \right) \dots\dots\dots (3.2)$$

Los valores para "K" están dados en la tabla No. (3.1) y son solamente usados en sistemas de bajo voltaje puesto que el efecto de arco de voltaje es significativo en comparación con la tensión manejada. Esto es importante para recordar que este procedimiento de cálculo de corriente de falla por arco es solamente una aproximación. El mínimo valor de corriente de falla es dependiente de las condiciones en el sistema y el tiempo de duración de la falla. Permitida por el ajuste del tiempo de la protección seleccionada para cada circuito a proteger, éstas operarán progresivamente moviéndose desde la carga a la fuente.

El dispositivo de switcheo de la carga será abierto instantáneamente sobre la ocurrencia de la falla a tierra. El retraso de tiempo requerido entre los dispositivos de protección es determinado por la adición del tiempo de operación de los disparos del interruptor (ruptor), el tiempo de arco del circuito del ruptor y un margen de seguridad.

La corriente de falla a tierra puede ser manejada como un flujo hacia afuera de la falla a tierra o como el retorno del flujo al punto neutro de la fuente. La precaución que deberá considerarse es que el regreso de la corriente de falla se desvíe saliendo al transformador de corriente manejando el retorno de la corriente de falla a tierra.

PROTECCION CONTRA FALLA A TIERRA

Un dispositivo sensible de falla a tierra puede consistir de un relevador estático de voltaje y acompañado de sensores de corriente o un relevador de sobre-corriente (electromagnético o estático) usando el rango estándar apropiado con transformador de barra o ventana.

Los niveles del relevador son ajustables y el relevador puede ser equipado con un ajuste de retraso de tiempo a instantáneo. La operación del relevador activa el mecanismo de un dispositivo de interrupción.

La selectividad se consigue a través de un tiempo de retraso y/o del ajuste de corriente o bloqueando la función.

3.4 METODOS DE DETECCIÓN Y PROTECCION DE FALLA A TIERRA.

El desarrollo de los esquemas de protección y detección de falla a tierra dependerán grandemente del ingeniero amén de los costos que reflejarían el uso de dispositivos sofisticados y problemas de diferentes índoles técnicos como son los falsos disparos, etc.

Sin embargo, todos los esquemas posibles tendrán una característica común con alguno de los siguientes métodos:

- Conexión residual de los relevadores de sobrecorriente.
- Transformadores de corriente (tipo ventana).
- De secuencia cero.
- Protección diferencial con transformadores de corriente entre el neutro de los sistemas y los alimentadores.

- Detección del retorno de corriente de falla al circuito de tierra del equipo.

3.4.1 CONEXION RESIDUAL.

Una conexión residual a tierra con relevadores es generalmente usado para protección de sistemas de media tensión. La corriente a tierra es medida por el transformador de corriente, el cual esta interconectado a un relevador de tierra, que responderá a la corriente proporcionada por la falla.

Una conexión residual de relevadores esta representada en la figura (3.1).

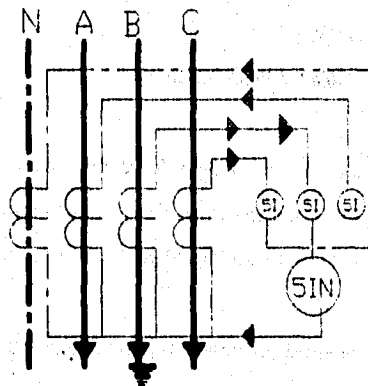


FIGURA 3.1. CONEXION RESIDUAL DE RELEVADORES.

En condiciones normales de operación no fluirá la corriente por la rama residual, pues las corrientes de fase serán iguales y su suma será cero y no ocurrirá operación alguna del relevador 5IN. En el momento de una falla a tierra esta creará un desbalance en el equilibrio vectorial de corrientes y se iniciará de esta manera un flujo de corriente hacia la rama diferencial, operándose por esta condición el relevador 5IN.

Quando se use este sistema deberá tenerse precaución de las siguientes limitaciones:

- La sensibilidad es influenciada por la desigual saturación de los transformadores de corriente además, la relación de transformación, la cual es seleccionada sobre bases de relativa mayor corriente de carga. Por lo tanto la sensibilidad de falla a tierra sufre tanto como se incrementa la relación de transformación.
- La transformación incorrecta, causa una débil diferencia en los transformadores de corriente de fase, puede no causarla en el secundario para sumar cero, cuando a través de la corriente del primario exista. Esta característica puede llegar a ser un problema durante el inicio de la corriente de falla la cuál contiene una componente directa.

Estos errores de corriente en los transformadores usualmente decaen rápidamente en un ciclo, pero algunas veces no con la suficiente rapidez para evitar una falsa operación de una conexión residual instantánea.

3.5 PROTECCION CON EL NUCLEO BALANCEADO.

También conocido como protección de secuencia cero o sensor de tierra.

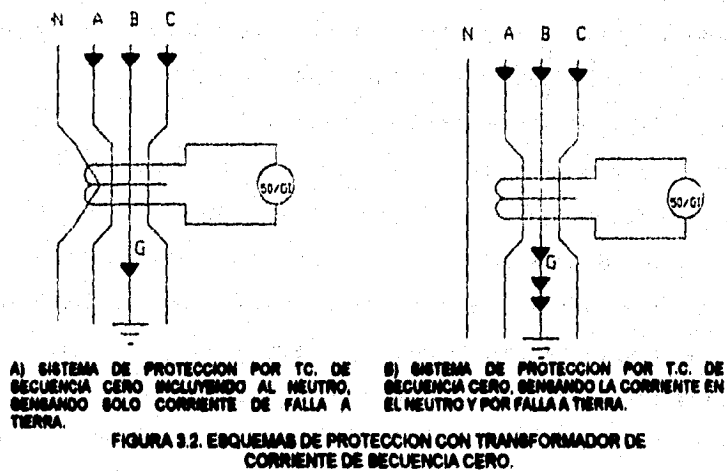
La protección con sensor de tierra esta provisto por una combinación de transformador de corriente tipo ventana, el cual encierra a los conductores en el mismo núcleo magnético. Bajo condiciones normales, esto es, balanceado, desbalanceado, o corrientes de carga en una fase, inclusive corto circuito que no incluyen tierra, todos los flujos de corrientes salientes y retornables a través de los transformadores de corriente. El flujo neto producido en el núcleo del

CAPITULO 3

transformador de corriente deberá ser cero y no fluirá corriente alguna por el relevador de tierra. Cuando una falla a tierra ocurre, la corriente de falla a tierra retorna a través de los circuitos conductores y el equipo de aterrizamiento (y posiblemente otros caminos) puentearán el transformador de corriente. El flujo producido en el transformador de corriente será proporcional a la corriente de falla a tierra y una corriente también proporcional circulará por el circuito del relevador.

El relevador conectado al transformador de corriente de secuencia cero puede ser ajustado a una alta sensibilidad detectando corrientes del orden de milimperas. Sin embargo, deberá tenerse cuidado de falsos disparos durante condiciones normales de operación o fallas que no involucren tierra.

La figura (3.2) muestra un esquema de protección con el empleo de un transformador de secuencia cero.



3.5.1 PROTECCION DE TIERRA DIFERENCIAL.

La protección diferencial de tierra es un método efectivo para mayor protección, ya que tiene una selectividad inherente. Con el esquema de la figura (3.3). Los transformadores de secuencia cero son instalados en cada una de las salidas de los alimentadores y otro es colocado al punto del neutro a tierra del sistema.

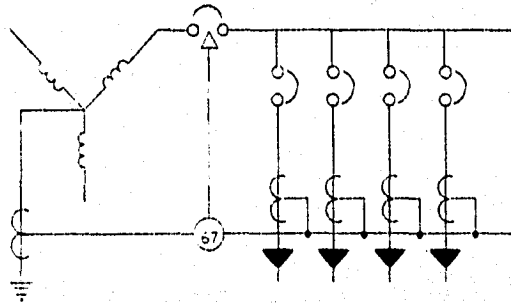


FIGURA 3.3. PROTECCION A TIERRA DIFERENCIAL.

Este arreglo ofrece una mayor sensibilidad a bajas corrientes de falla a tierra sin incurrir en disparo por fallas a tierra más allá del alimentador del transformador de corriente. Solo requiere de que todos los transformadores sean cuidadosamente iguales para prevenir disparos impropios por las magnitudes ocurridas fuera de la zona de protección diferencial.

3.5.2 PROTECCION DE RETORNO DE TIERRA.

La protección por retorno de tierra esta ilustrado en la figura (3.4). La corriente de falla a tierra retorna a través del transformador de corriente en el neutro a la conexión a tierra. Para alimentadores sobre segmentos aislados puede ser introducido un ducto o conduit como se muestra en la figura (3.5) y una conexión de puente sobre el aislador para conducir la corriente de falla a tierra. Un transformador de corriente detectará la corriente de falla a tierra. Este método no

CAPITULO 3

es muy recomendable para circuitos de alimentadores debido a la posibilidad de múltiple regreso de caminos de falla a tierra y a la dificultad de mantener una junta aislante.

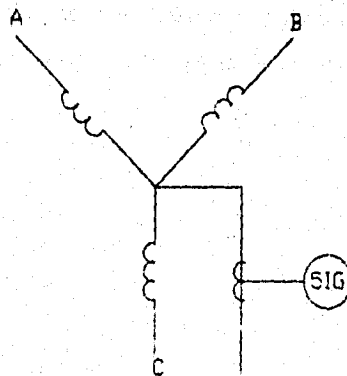


FIGURA 3.4. PROTECCION DE RETORNO DE FALLA A TIERRA.

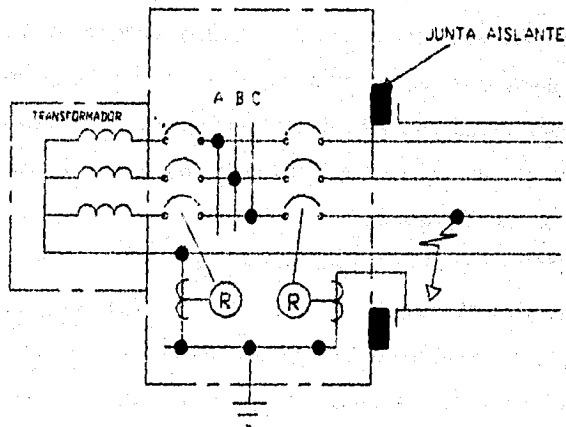


FIGURA 3.5. PROTECCION DE RETORNO DE FALLA A TIERRA.

3.5.3 DETECCION DE LA FALLA A TIERRA.

Generalmente en los sistemas eléctricos aislados de tierra resulta engorroso y problemático de una protección de falla a tierra. Esto es por la aplicación que tienen los sistemas sin aterrizar en procesos donde es importante la continuidad de servicio.

Dichos sistemas deberán entonces de contar con un sistema que detecte la señal de una falla a tierra.

En estos casos se emplea la variable de tensión originada por la sobretensión causada por la falla a tierra. Alrededor de 1.73 veces la tensión nominal.

El uso de transformadores de potencial es requerido para sensores la falla. Estos transformadores deberán conectarse en estrella con el neutro a tierra y su secundario podrá ser conectado en estrella con su neutro aterrizado o bien en delta dependiendo del tipo de detección que se este realizando.

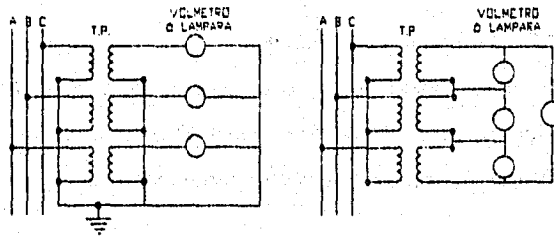
3.5.4 DETECCION E INDICACION DE LA FALLA A TIERRA.

La detección de la falla suele realizarse con el relevador 64 (clasificación ANSI).

La indicación de presencia de falla a tierra se puede hacer con lámparas o vólmetro. Las lámparas son adecuadas como indicadores, pero, se prefiere el uso de vólmetros puesto que ofrecen mayor sensibilidad y una cuantificación para estimar la resistencia de tierra. La desventaja del vólmetro es su mayor costo y el requerimiento de más espacio en su panel o gabinete.

La figura (3.6) muestra la conexión realizada para una detección a indicación de una falla a tierra.

CAPITULO 3



A) INDICACION DE FALLA A TIERRA POR MEDIO DE LAMPARAS O VOLMETROS

B) DETECCION E INDICACION DE FALLA A TIERRA.

FIGURA 3.6. ESQUEMAS DE DETECCION E INICIACION DE FALLA A TIERRA EN SISTEMAS SIN ATERRIZAR DE 3 HILOS, 3 FASES.

Una combinación de indicación de falla a tierra y una detección con el mismo transformador de potencial no es recomendable puesto que se incrementa la probabilidad de fallas en las conexiones del secundario con la consecuencia de falsas indicaciones de tierra.

CAPITULO No. 4

**" CRITERIOS DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION) "**

4.1 DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA BAJA TENSION.

Para efectos de análisis, consideremos BAJA TENSION hasta 1000 volts entre conductores, o hasta 600 volts con respecto a tierra, en C.A. y C.D.; por lo que nuestro estudio en esta parte, comprende todas las instalaciones y equipos industriales y domésticos con los que tenemos más contacto y que debemos conectar a tierra como medida de protección para las personas y para las instalaciones propias.

En baja tensión tenemos que para sistemas eléctricos trifásicos estos pueden ser efectivamente aterrizados, sistemas aterrizados a través de una alta resistencia o sistemas con neutro flotante. Los sistemas efectivamente aterrizados son para limitar el voltaje durante operaciones normales y para prevenir voltajes excesivos debido a descargas por rayos, ondas de línea o por contactos accidentales con líneas de alta tensión. Además, los sistemas efectivamente aterrizados también facilitan la operación automática de los dispositivos de protección cuando ocurre una falla de línea a tierra. Los sistemas aterrizados a través de alta resistencia o los de neutro flotante se usan cuando es deseable limitar la magnitud de la corriente de falla a tierra o para disminuir las interrupciones del servicio por fallas a tierra.

Por lo tanto en baja tensión tendremos que aterrizar los siguientes sistemas:

1. **Sistemas de Corriente Directa:**
 - a). **Sistemas de corriente directa de dos hilos**
Conectar a tierra el conductor negativo.
 - b). **Sistemas de corriente directa de tres hilos**
Conectar a tierra el conductor neutro del sistema.

CRITERIO DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).

2. Sistemas de Corriente Alterna

a). Al sistema trifásico conexión estrella de 220-127 Volts, 4 hilos y el sistema monofásico de 240-120 Volts, 3 hilos

Conectar a tierra el conductor neutro.

b). Sistema trifásico conexión estrella de 440-254 Volts 4 hilos.

Conectar a tierra el conductor neutro.

c). Sistema trifásico conexión delta de 140-120 Volts, 4 hilos en el cual un conductor del circuito se deriva del punto medio del devanado de una fase.

Aterrizar el conductor del punto medio.

Independientemente del tipo de sistema que se tenga bajo tensión, es necesario establecer un límite de tensión de contacto que puede soportar el cuerpo humano sin causar daño alguno, cuando ocurre una falla de línea a tierra; así tenemos que se considera peligrosa para personas una tensión superior a los 50 Volts y se funda en lo siguiente:

Los efectos de la energía eléctrica dependen, ante todo del valor de la intensidad de la corriente I_M que, en caso de accidente, circula a través del cuerpo humano. Este tiene, como se vio anteriormente, por término medio y prescindiendo de circunstancias especiales, una resistencia R_M del orden de 1000 a 3000 ohms. De este modo, una tensión de contacto V_T de 50 Volts resulta una intensidad:

$$I_M = \frac{V_T}{R_M} = \frac{50V}{1000\Omega \leq R_M \leq 3000\Omega}$$
$$16mA \leq I_M \leq 50mA$$

Que por regla general, estos valores no se consideran peligrosos para la vida como se vio en un subtema anterior.

CAPITULO 4

Por lo tanto, como medida de seguridad, se deben conectar a tierra todas las partes metálicas expuestas no portadores de corriente, de equipo fijo o portátil (conectado mediante cordón y clavija), incluyendo sus cubiertas y soportes metálicos, que pudieran quedar energizados bajo condiciones anormales, cuando se tengan cualquiera de las condiciones siguientes:

- a). Cuando el equipo opere a una tensión mayor de 150 Volts a tierra.
- b). Cuando el equipo este instalado o vaya a utilizarse en lugares húmedos o mojados, cualquiera que sea su tensión de operación.
- c). Cuando dichas partes se encuentren accesibles y en contacto eléctrico con estructuras metálicas que no estén puestas a tierra.
- d). En lugar clasificados como peligrosos.

Para poder mantener el límite de tensión de contacto, para el cuerpo humano, cuando ocurra una falla a tierra en un circuito, y para el funcionamiento seguro y confiable del sistema eléctrico, se debe emplear alguno de los métodos de puesta a tierra para instalaciones eléctricas citados:

- El empleo de las canalizaciones metálicas como conductor de puesta a tierra.
- La instalación de un conductor adicional en el circuito.
- El diseño de una red de tierras.

El método más seguro y/o confiable a emplear dependerá de las características propias de la instalación, así como del criterio propio del ingeniero diseñador. Aquí indicare el posible procedimiento a seguir para cada uno de los métodos, realizando comparaciones entre algunos de ellos, y mostrar por medio de resultados el mejor que se podría emplear.

**CRITERIO DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSIÓN).**

Ante todo cuando se seleccione cualquiera de los métodos se debe tener especial cuidado a que se cumpla con los objetivos y características básicas citadas anteriormente. Así tenemos:

El empleo de las canalizaciones metálicas.

Cuando un envolvente metálico conductor es usado como circuito conductor de puesta a tierra de equipo, éste debe tener una continuidad tan buena como la conductividad requerida para pasar la suficiente corriente para facilitar la operación de los dispositivos de sobrecorriente. En otras palabras, la corriente que circulará en un circuito con falla a tierra debe ser la mínima que libere el circuito en un tiempo razonable.

A). Tubería de fierro.

Cuando un tubo de fierro es parte de un circuito eléctrico, lo cual será cuando una falla ocurra, habrá un incremento en la resistencia del circuito y además ambas, la resistencia y la reactancia, variarán considerablemente con la cantidad de la corriente de falla. (Ver tabla 4.1).

Además, a pesar del hecho que aunque hay muchos caminos externos paralelos al tubo, la corriente que fluirá en todos los caminos paralelos será mucho menor (como se verá más adelante), y bajo condiciones normales debe ser menor al 10 %.

Otros dos factores que se deben tomar en consideración en la estimación del flujo de la corriente de falla, son el efecto de los acoplamientos de tubos en el incremento de la impedancia del circuito, y la caída de tensión a través del punto de falla.

CAPITULO 4

COL 1 DIAMETRO DE TUBO CONDUIT	COL 2 AREA DE LA PARED EN PULG. ²	COL 3 D.C. RESISTENCIA OHMS/FOOT	COL 4 CORRIENTE EN AMPERES	COL 5 DENSIDAD DE CORRIENTE Amp/Pulg. ²	COL 6 A.C. IMPEDANCIA OHMS/FOOT	COL 7 FACTOR %
1/2	0.264	0.320	61	200	1.57	4.9
			127	600	1.05	3.29
			254	1000	0.672	2.1
3/4	0.337	0.242	67	200	1.49	4.92
			134	600	0.779	3.2
			337	1000	0.608	2.1
1	0.53	0.154	200	378	0.632	4.07
			600	944	0.625	2.29
			1000	1690	0.352	1.39
1 1/4	0.69	0.120	200	294	0.529	4.42
			600	735	0.326	2.76
			1000	1470	0.204	1.71
1 1/2	0.79	0.103	200	253	0.611	4.96
			600	634	0.317	3.08
			1000	1270	0.197	1.92
2	1.03	0.079	200	194	0.435	5.52
			600	488	0.285	3.02
			1000	970	0.186	2.39
2 1/2	1.71	0.0476	342	200	0.29	6.1
			685V	600	0.189	3.9
			1710	1000	0.117	2.46
3	2.31	0.0382	200	86.6	0.330	6.39
			600	216	0.204	6.65
			1000	433	0.167	4.7
			2000	866	0.089	2.81
			3000	1300	0.073	2.07
3 1/2	2.7	0.0301	400	170	0.095	1.89
			640	200	0.214	7.1
			1380	600	0.123	4.1
			2700	1000	0.077	2.95
4	3.40	0.0239	640	200	0.044	1.49
			1720	600	0.171	7.1
			3400	1000	0.101	4.2
			6800	2000	0.061	2.95
5	4.3	0.0189	680	200	0.035	1.45
			2150	600	0.136	7.2
			4300	1000	0.083	4.4
			6800	2000	0.051	2.7
			6800	2000	0.029	1.6

VALORES DE RESISTENCIA EN C.D. E IMPEDANCIA DE TUBO CONDUIT RIGIDO.
TABLA No.4.1

Si los acoplamientos son instalados apretadamente, como lo requieren las Normas, el incremento en la impedancia del tubo con acoplamientos es aproximadamente el 50 % más que la impedancia para un tramo recto sin acoplamientos. Asimismo, todos los acoplamientos y uniones entre tubos deben estar bien apretados y en las uniones con cajas, gabinetes, etc., y/o usando puentes de unión donde sea necesario, por medio de zapatas, conectores de

**CRITERIO DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).**

presión, abrazaderas u otros accesorios semejantes. Esto es con el fin de que cuando ocurra una falla a tierra no exista entre estos acoplamientos una lluvia de chispas que puedan ocasionar que se quemé algún material combustible cercano y provocar un incendio.

Por lo tanto, no solo deben considerarse las tuberías como protección mecánica para los conductores, sino además debe tomarse en cuenta la posibilidad de una lluvia de chispas cuando se emplee como conductor de puesta a tierra.

Asimismo, cuando se emplee tubo conduit de fierro como conductor de retorno en una falla a tierra, su impedancia se incrementa con la distancia, ya que la caída de tensión del circuito de retorno que forma parte es mayor, llegando a limitar la corriente de falla a valores inferiores de la capacidad del dispositivo de protección.

Refiriéndose a la tabla (4.1), la cual da la impedancia del tubo para varios flujos de corriente; ajustamos los valores de impedancia mostrados para incluir los acoplamientos y permitir una caída de tensión de 50 Volts a través de la falla podremos calcular el valor de la cantidad de corriente de falla que fluirá.

Suponiendo 200 pies de tuberías conduit de 3" con conductores de 500 MCM en un sistema de 208/120 Volts con un dispositivo de protección de 400 Amp.

Un simple método para determinar si el tubo conduit ejecutará su función satisfactoriamente, es primero calcular el mínimo flujo de corriente deseado (en promedio 5 veces la capacidad del dispositivo de protección), la cual en este caso es:

$$5 \times 400 = 2000 \text{ Amp.}$$

Entonces con base de 70 Volts disponibles de los 120 Volts a tierra (120 V - 50 V) calculamos Z:

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

CAPITULO 4

$$Z = \frac{E}{I} = \frac{70 \text{ V}}{2000 \text{ A}} = 0.035 \text{ ohms}$$

De la tabla a encontramos la impedancia del tubo recto de 3" llevando 2000 Amp y aplicando el 50 % de factor de seguridad por acoplamientos:

$$Z = 0.01485 \text{ ohms} / 100 \text{ Ft.}$$

Para tener la impedancia de 0.035 ohms para los 2000 Amp. de corriente mínima, tenemos una longitud máxima de 235 Ft, por lo que determinamos que el tubo conduit de 3" es adecuado para la corriente mínima deseada ya que además circularán:

$$I_{cc} = \frac{E}{Z} = \frac{70 \text{ V.}}{0.0297 \text{ ohms}} = 2350 \text{ Amp.}$$

Por lo tanto para cualquier circuito y cualquier tamaño de tubería podemos derivar para cualquier dispositivo de sobrecorriente la máxima longitud segura de tubo la cual permitirá que el peso de la corriente de falla sea suficiente para facilitar la operación de los dispositivos de sobrecorriente (Ver tabla 4.2)

Si la longitud del circuito excede la longitud máxima segura, de acuerdo a los cálculos, será necesario emplear tubería de aluminio ó agregar un conductor adicional en paralelo con el tubo, como se verá más adelante.

B). Tuberías de aluminio.

De acuerdo a los resultados de pruebas realizadas entre tuberías de fierro y aluminio, se observó que la tubería de aluminio como conductor de puesta a tierra puede instalarse a mayores distancias que la tubería de fierro.

**CRITERIO DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).**

Para el ejemplo anterior la tubería de aluminio instalada en lugar de la de fierro, puede correr hasta 900 pies satisfactoriamente. (Ver tablas 4.2 y 4.3).

PRUEBA No.	TRAYECTORIA DE RETORNO.	CAIDA DE TENSION (VOLTS)	CORRIENTE DE FALLA EN (AMP).	
			PRONOSTICADA	REAL
1	3 PULGADAS TUBERIA DE ACERO	230	1290	1362
2	3 PULGADAS TUBERIA DE ACERO.	230	1290	1355
3	3 PULGADAS TUBERIA DE ACERO + CABLE CAL. 40 AWG.	190	2280	2350
4	3 PULGADAS TUBERIA DE ACERO + CABLE CAL. 40 AWG.	192	2300	2260

* CAIDA DE TENSION MEDIDA A 700 PIES DE LA FALLA (215 M).

TABLA No.4.2 PRUEBAS DE FALLA EN UN CIRCUITO REAL ALIMENTADOR DE 500 MCM.

TRAYECTORIA DE RETORNO DE FALLA	MAXIMA LONGITUD DEL ALIMENTADOR	
	208/120 SISTEMA DE TENSION	480/277 SISTEMA DE TENSION
2 1/2 PULGADAS TUBERIA DE ACERO	130	308
2 1/2 PULGADAS TUBERIA DE ACERO + CABLE CAL. 40.	22	890
2 1/2 PULGADAS TUBERIA DE ALUMINIO.	285	1140
2 1/2 PULGADAS TUBERIA DE ALUMINIO + CABLE CAL. 40.	382	1180

NOTA: LA LONGITUD MAXIMA HA SIDO CALCULADO, AUMIENDO QUE EL VALOR DEL DISPARO INSTANTANEO ES IGUAL A 2000 AMPERES.

TABLA No. 4.3 LONGITUDES MAXIMAS DE UN CIRCUITO ALIMENTADOR CALIBRE No. 4/0 AWG.

La instalación de conductor adicional en el circuito.

Asimismo, por medio de los resultados de los experimentos realizados, cuando a una tubería metálica se le instala un conducto adicional, el resultado es un reducción de la impedancia en la línea del conductor de falla a tierra, permitiendo

CAPITULO 4

por consiguiente alimentar circuitos de distancias mayores hasta de 1.7 veces más que la permisible para una misma capacidad que en la tubería de fierro. (Ver tablas 4.2 y 4.3).

Es práctica recomendable conectar el conductor y el tubo conduit juntos en intervalos de 30 mts o menos.

Las normas permiten que dicho conductor sea de cobre o aluminio, y además puede ser desnudo o aislado, sólido o trenzado. Sin embargo el que más se emplea es de cobre aislado, ya que el aluminio es más susceptible a la corrosión. Asimismo, cuando el conductor es desnudo pueden producirse arcos entre el conductor y el interior del tubo en los puntos en los cuales ocurre la falla. Tales arcos pueden dañar los conductores de fase, razón por la cual es más recomendable que el conductor sea aislado cuando se instale dentro de una canalización.

El tipo y tamaño del conductor de puesta a tierra permitido por las Normas varía con el tamaño del sistema.

Así tenemos que en cualquier sistema eléctrico de baja tensión necesitamos un conductor del electrodo de tierra y un conductor de puesta a tierra de equipos.

El conductor del electrodo de tierra es el que se emplea para conectar el conductor puesto a tierra del sistema (Neutro) y el electrodo de tierra. Su tamaño debe estar de acuerdo con la tabla No. (4.4), la cual esta basada en el tamaño de los conductores del servicio (Acometida).

CRITERIO DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).

CALIBRE DEL CONDUCTOR COMUN DEL ELECTRODO
DE PUESTA A TIERRA DE SISTEMAS.

TABLA No. 4.4

CALIBRE DEL CONDUCTOR (ACOMETIDA) O BU	MAS GRANDE EQUIVALENTE	DEL SERVICIO	CALIBRE DEL CONDUCTOR DEL ELECTRODO DE TIERRA PARA LONGITUDES NO MAYORES A 100 PIES A.W.G. No.
COBRE	ALUMINIO	COBRE	ALUMINIO
2 ó más	0 ó más	8	8
1 ó más	20 ó 30	8	4
20 ó 250	40 ó 250 MCM	4	2
mayor 30	mayor 250 MCM	2	0
300 MCM	ó 500 MCM		
mayor 300 MCM	mayor 500 MCM	0	30
ó 600 MCM	ó 600 MCM		
mayor ó 600 MCM	mayor 600 MCM	20	40
ó 1100 MCM	A 1750 MCM		
mayor 1100 MCM	MAYOR 1750 MCM	30	250 MCM

NOTA: PARA LONGITUDES DEL CONDUCTOR DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA MAYORES DE 100 PIES EL CALIBRE DEL CONDUCTOR SELECCIONADO DEBE SER TAL QUE LA CAIDA DE TENSION NO EXCEDA 40 VOLTS CUANDO CIRCULA 1 AMP POR CADA 30 C.M.

El conductor de puesta a tierra de equipos esta compuesto de un conductor continuo encerrado en el sistema (el cual incluye armazones, canalizaciones, etc., los cuales contienen conductores), y es de capacidad decreciente de acuerdo con el decremento del tamaño de los dispositivos de sobrecorriente conforme los circuitos derivados van de mayor a menor. (Ver tabla 4.5).

CAPITULO 4

CALIBRE DE LOS CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA DE EQUIPOS.

CAPACIDAD DEL DISPOSITIVO DE SOBRECORRIEN TE EN AMPERES	E.G.C. CONDUCTOR DE COBRE		CAPACIDAD DE CORTO TIEMPO DEL CONDUCTOR (E.G.C.) EN AMPERES	** FACTOR K	*** PORCIENTO DE LA CAPACIDAD DEL CONDUCTOR (E.G.C.) CON EL DISPOSITIVO DE SOBRECORRIENTE.
	A.W.G. No.	CIRC. MIL			
15	14	4107	137	9.1	0
20	12	4107	137	6.85	75
30	12	6530	218	7.2	80
40	10	10980	348	6.6	75
60	10	10980	348	6.8	80
100	8	10510	680	6.5	45
200	6	20280	875	4.4	32.5
400	4	41740	1391	3.4	2.1
600	2	65980	2212	3.6	19
800	0	109800	3517	4.4	18.8
1000	00	135100	4437	4.4	17.5
1200	(a) 000	167800	6893	4.7	16.7

TABLA No 4.5.

* UN AMPERE POR 30 CIRCULAR MILS PARA 5 SEGUNDOS

** FACTOR K; CAPACIDAD DE CORTO TIEMPO ENTRE LA CAPACIDAD DEL DISPOSITIVO DE SOBRECORRIENTE.

*** BASADO EN CONDUCTORES DE COBRE A 75 °C.

(a) PARA CAPACIDADES ARRIBA DE 1200 AMPERES EL CALIBRE DEL CONDUCTOR DEBE INCREMENTARSE PROPORCIONALMENTE.

El tamaño del calibre de ambos conductores esta basado en la capacidad de conducción de corto tiempo del conductor (incluyendo sus juntas o puntos de conexión).

La variación del tiempo corto de un conductor de cobre esta relacionada por la estimación I²t del conductor para un pico de temperatura la cual no afectará la continuidad establecida para las juntas de conexión. Por un periodo de 5 segundos el valor de corto-tiempo se toma aproximadamente como 1.0 Amperes por cada 30 Circular Mils de sección transversal, como se puede ver en la tabla (4.6).

CRITERIO DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).

CAPACIDAD DE CONDUCTORES Y CAIDA DE TENSION BAJA,
MAXIMA CAPACIDAD DE CORTO-TIEMPO

CALIBRE CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA AWG.	RESISTENCIA POR 100 PIES A 60 HZ.	CAPACIDAD DE CONDUCCION NA 75 °C	CIRCULAR MILS	CAPACIDAD DE TIEMPO CORTO AMPERES	RELACION ENTRE TIEMPO CORTO Y CAPACIDAD DE CONDUCCION	CAIDA DE TENSION POR 100 PIES A LA CAPACIDAD DE CORTO TIEMPO
8	0.0660	45	16510	550	12.2	36.3
6	0.0426	65	28250	875	13.5	37.3
4	0.0269	85	41740	1360	16.4	37.4
3	0.0213	100	52940	1785	17.5	37.4
2	0.0169	115	66370	2210	19.2	37.4
1	0.0134	130	83690	2780	23.4	37.4
1/0	0.01081	150	105500	3517	23.4	37.3
2/0	0.008448	175	133100	4440	25.4	37.4
3/0	0.006693	200	167800	5560	27.9	37.4
4/0	0.005261	230	211800	7050	30.6	37.1
MCM						
250	0.004462	255	250000	8330	32.6	37.2
300	0.003732	285	300000	10000	35.6	37.3
350	0.003209	310	350000	11670	37.8	37.4
400	0.002811	335	400000	13330	39.8	37
500	0.002260	380	500000	16670	43.8	38.2

TABLA No. 4.6

* BASADO EN 1 AMPERE POR 30 C.M. DE SECCION.
* NOTA: SI LA LONGITUD EXCEDE 100 PIES EL CALIBRE DEL CONDUCTOR DEBE INCREMENTARSE DE TAL FORMA QUE LA CAIDA DE TENSION BASADA EN TIEMPO-CORTO NO EXCEDE A 40 VOLTS.

Como puede observarse la tabla anterior esta basada en una longitud de 100 Fts.(30 mts); si el conductor para la puesta a tierra excede esta longitud debe incrementarse su calibre de tal forma que la caída de tensión basada en estimación de corriente de corto-tiempo, no exceda de 40 Volts. (Ver tabla 4.7).

CAPITULO 4

CALIBRE DE CONDUCTORES PARA LA PUESTA A TIERRA DE EQUIPOS PARA DISPOSITIVOS DE SOBRECORRIENTE DE 1000 A 500 AMPERES.

CAPACIDAD DEL DISPOSITIVO CONTRA SOBRECORRIENTE	CAPACIDAD DE COBRE MCM	CAPACIDAD DE CONDUCCION 75°C	CAPACIDAD DE TIEMPO-CORTO DEL CONDUCTOR EN AMPERES Ft	FACTOR K	PORCIENTO DEL CONDUCTOR AL DISPOSITIVO DE SOBRECORRIENTE
1.000	300	285	10,000	5.3(6.3)	17.8
2.000	400	335	13,300	6.0(6.7)	16.8
2.600	500	380	16,670	6.0(6.7)	15.2
3.000	600	420	20,000	6.0(6.7)	14.0
4.000	800	480	26,670	6.3(6.7)	12.3
5.000	1.000	540	40,000	6.4(6.0)	16.8

* UN AMPERE POR CADA 30 C.M. EN 5 SEGUNDOS.

TABLA No. 4.7

El valor Ft usado esta basado en la exactitud de un conductor de cobre y sus juntas de conexión para transportar los valores de corriente sin destruir sus características. Los valores se obtienen de la formula de Onderdok siguiente:

$$I = A \sqrt{\frac{\log_{10} \left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{S}}$$

donde:

I = corriente en amperes.

A = Sección transversal del cobre en Circular Mils.

S = Tiempo en segundos durante la cual la corriente I es aplicada.

Tm = Máxima temperatura permisible en grados centígrados.

Ta = Temperatura ambiente en grados centígrados.

Para nuestro caso tenemos:

S = 5

Tm = 250°C (juntas de conexión)

Ta = 75°C

CRITERIO DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).

Obteniéndose un amperé por cada 30 circular mils de sección. El tiempo de 5 segundos se emplea para proveer un factor de seguridad (4 segundos es la estimación de corto tiempo para los dispositivos de protección), y fue considerado razonable para sistemas de distribución de 600 Volts ó menos protegidos por elementos de alta capacidad interruptiva, fusibles limitadores de corriente y con protecciones de falla a tierra. (Características Tiempo-Corriente del National Electrical Code NEC). (Ver tablas 4.8 y 4.9).

CORRIENTE REQUERIDA PARA OPERACION DE FUSIBLES EN CINCO SEGUNDOS.

CAPACIDAD DE FUSIBLES EN AMPERES.	CORRIENTE REQUERIDA PARA LA OPERACION EN 5 SEGUNDOS.		* FACTOR K
	250 VOLTS AMPERES	600 VOLTS AMPERES	
100	360	400	4.0
200	650	680	4.4
400	2,000	2,000	5.0
600	3,400	3,000	5.7

*FACTOR K: VECES QUE LA CAPACIDAD DEL FUSIBLE REQUIERE PARA OPERA EN CINCO SEGUNDOS.
TABLA No. 4.8

Asimismo, el análisis de las tablas (4.4 y 4.5) para los calibres de los conductores de puesta a tierra, esta basada en la capacidad de conducción continua de cables tipo RH a 75 °C.

Obviamente el conductor de puesta a tierra de equipo debe ser lo bastante grande para conducir la cantidad de corriente por un dado tiempo, el cual es requerido para abrir el dispositivo de sobrecorriente con el cual esta asociado en un razonable tiempo y crear un daño extensivo.

CAPITULO 4

CORRIENTE REQUERIDA PARA OPERACION DE FUSIBLES DE ALTA CAPACIDAD INTERRUPTIVA LIMITADORES DE CORRIENTE EN 5 SEGUNDOS.

CAPACIDAD DEL DISPOSITIVO CONTRA SOBRECORRIENTE EN AMPERES	CORRIENTE REQUERIDA PARA LA OPERACION EN 5 SEGUNDOS	FACTOR K
800	4,000	5.0
1,000	5,000	5.0
1,200	6,000	5.0
1,800	8,400	5.3
2,000	12,000	6.0
2,500	15,000	6.0
3,000	18,000	6.0
4,000	25,000	6.3
6,000	34,000	3.6

FACTOR K = VECES QUE LA CAPACIDAD DEL FUSIBLE REQUIERE PARA OPERAR EN 5 SEGUNDOS.

TABLA No. 4.9

Entonces de las curvas características tiempo-corriente de los dispositivos de sobrecorriente aprobados podemos aprender como las corrientes de falla serán libradas por los dispositivos en 5 segundos. Estas corrientes pueden expresarse en k veces el valor del dispositivo de sobrecorriente. El calibre del conductor seleccionado para servir como conductor de puesta a tierra debe tener una estimación de corto tiempo, el cual cuando dividido por el valor del dispositivo de sobrecorriente será no menor que el valor K dado en la curva característica del dispositivo de sobrecorriente para 5 segundos.

Asimismo, mientras la capacidad máxima del conductor de puesta a tierra esta basada en un tiempo "t" de 5 segundos, sin destruir sus características, el valor de "I" puede incrementarse seguramente tan grande como "t" decrece para dar el mismo valor de I^2t .

En la práctica es muy común la condición de incrementar el valor de "t" y disminuir el valor de "I".

CRITERIO DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).

Es conveniente hacer notar, que la valoración de tiempo-corto del conductor de cobre, estimado por I^2t , no toma en cuenta el deterioro que sufre el aislamiento del conductor, (cuando se emplea conductor aislado), ya que no se considera importante porque sólo por él circulará corriente en condiciones de falla y no en forma continua y permanente. Además, existen varios dispositivos de sobrecorriente en los que se observa que sus curvas de tiempo-corriente no liberaran una falla a tierra de corto-tiempo (en 5 segundos) en condiciones críticas, por lo que es donde es necesario incrementar el valor de "I" y disminuir el valor de "t".

Para un mejor entendimiento de los sistemas de protección a tierra; citamos el siguiente ejemplo desarrollado por R.H. Kaufmann, el cual presenta los factores significativos que controlan el comportamiento de los circuitos de protección a tierra en sistemas de distribución de corriente alterna durante condiciones de corto-circuito.

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA.

Se tiene una instalación especial con una tubería convencional pared gruesa de 2½" de fierro, y un cable de cobre calibre 4/0; los cuales fueron instalados en un edificio de columnas de acero que fueron conectadas con un cable de 250 MCM de cobre. La instalación de prueba se muestra en la figura (4.1).

CAPITULO 4

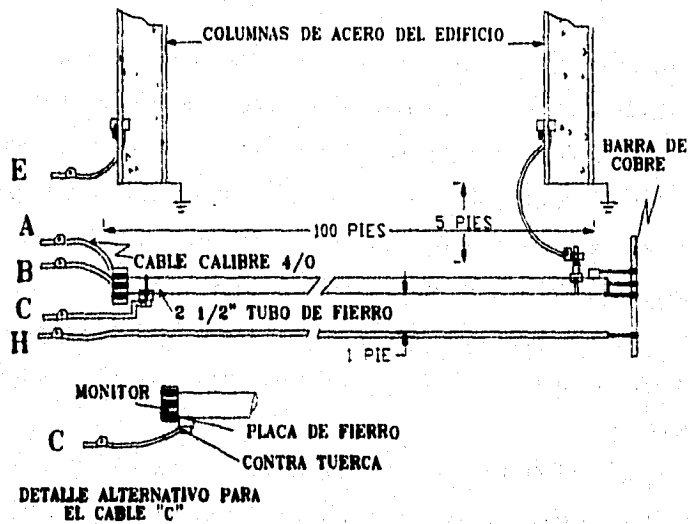


FIGURA No. 4.1 IDENTIFICACION DE LA INSTALACION DE PRUEBA.

El tubo conduit fue soportado en aisladores a través de 100 Fts. de longitud. El tubo se ubicó a 5 Fts. de la línea de las columnas del edificio. El conductor de 4/0 fue especificado a 1 Ft. de tubo en el lado opuesto de las columnas. Este arreglo es con el fin de simular un círculo alimentador con fuente de potencia en el lado izquierdo y varias condiciones de falla simuladas el final del lado derecho.

En todos los casos el flujo de corriente fue sobre el cable "A" y una variedad de diferentes caminos de retorno posibles se examinaron controlados por las conexiones del lado izquierdo.

Se realizaron pruebas con baja corriente, 200 y 350 Amp. que se podía mantener por extensos períodos. Una segunda serie de pruebas fueron realizadas con alta corriente 10, 000 Amp. con una duración de 1/4 de segundo.

**CRITERIO DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).**

TENEMOS COMO RESULTADOS LO SIGUIENTE.

La magnitud de tensión y corriente de todas las pruebas se presentan organizadas en la tabla (4.10).

La primera columna indica el número de la prueba, las próximas dos columnas identifican la conexión usada e indican el posible camino del flujo de la corriente; las próximas columnas indican los valores de corriente, primero el total de la corriente de entrada en el conductor "A" y la siguiente la corriente de retorno en el tubo y su porcentaje del total, y las magnitudes de corriente en los otros posibles caminos.

Ningún análisis adicional es necesario para mostrar las pruebas definitivas que sólo con el uso de un conductor interno para puesta a tierra se tendrá la corriente de retorno mayor; y que la extremadamente baja resistencia de la estructura del edificio es ineffectiva para reducir la magnitud de la corriente en el tubo, ver pruebas A6, A7, B6 y B7.

Es importante citar algunos efectos secundarios observados en el curso de las pruebas. La primera de alta corriente produjo una lluvia de chispas en los acoplamientos del tubo, por lo cual es necesario asegurar y apretar bien las uniones. Se colocó un puente entre los acoplamientos con un cable de 4/0 con lo cual aún continuaron las chispas en las pruebas.

En la parte inferior de la figura (4.1) se simuló la conexión a un gabinete o caja de conexiones, produciéndose bastantes chispas en la placa.

Durante la prueba B10 de alta corriente (circuito de tubería abierto) se presentaron lluvia de chispas en el intermedio de las columnas del edificio.

CAPITULO 4

PRUEBA NO.	EVALUO CONECTIVO SALIDA EN	RETORN O EN	IA TOTAL	RESERVAS DE CONECTIVO		RESERVAS DE VOLTAGE							
				APAREJOS	% DEL TOTAL	EAC	ECD	EAB	EAM	EAO	EQB		
A1	A	B	300	0	100	300	247	0.6	425				
A2	A	C	300	300	100	0	163	0.15	25				
A3	A	C	300	300	100	0	805	0.15	124				
A4	A	CH	300	300	100	0	140	0.15	285				
A5	A	CH	300	300	100	0	813	1.85	125				
A6	A	CG	300	300	100	0	145	1.50	254			144	
A7	A	CG	300	180	60	0	88	4.85	185			84	
A8	A	CB	300	62	20	200	480	2.80	425			284	245
A9	A	CB	300	0	0	300	240	1.40	223			171	181
A10	A	GM	300	0	0	300	140	1.5	15				
A11	A	GM	300	0	0	300	82	8.1					
BC	A	C	11,200	11,200	100	0	160	37					
B3	A	CH	11,000	11,000	100	0	172	37					
B4	A	CH	11,000	11,200	101	0	172	47					
B5	A	CG	11,000	11,000	100	0	175	17					
B6	A	CG	10,800	10,700	99	0	168		71				
B7	A	CG	10,800	10,200	95	0	172	9					
B8	A	CG	11,800	5,800	50	6,000	27	27				185	
B9	A	CG	11,200	6,000	53	5,200	27	27					
B10	A	GM	8,700	0	0	4,300	148						280

FORMA DE OVAL DESTROZADA, LOS VALORES TABULADOS SON DE CUESTA
 TABLA No. 419 RESERVAS DE LAS CANTIDADES ELECTRICAS.

PRUEBA NO.	EJECUCION DE COMERCIO		MANTENIMIENTO DE COMERCIO		MANTENIMIENTO DE VOLTAJE												
	EN	SALIDA	EN	SALIDA	IA TOTAL	AMPERES	% DEL TOTAL	W	IN	IG	EAC	ECO	EAB	EAN	EAG	EOB	
A1	A		B		300	0	100	300	0	0	2.07	0.05	480				
A2	A		C		300	300	100	0	0	0	10.0	0.19	25				
A3	A		CH		300	300	100	0	0	0	10.0	0.19	1.31				
A4	A		CH		300	300	100	0	0	0	10.0	0.19	2.88				
A5	A		CG		300	300	100	0	0	0	10.0	NADA	2.85				
A6	A		CG		300	300	100	0	0	0	10.0	NADA	2.84	14.4			
A7	A		CG		300	300	100	0	0	0	10.0	NADA	1.30	0.4			
A8	A		CB		300	300	100	0	0	0	10.0	NADA	4.85				
A9	A		CB		300	300	100	0	0	0	10.0	NADA	2.88				
A10	A		CH		300	300	100	0	0	0	10.0	10.5	2.3	28.4	28.4	24.8	
A11	A		CH		300	300	100	0	0	0	10.0	8.1	1.5	17.1	17.1	15.1	
B2	A		C		11,300	11,300	100	0	0	0	100	30'					90
B3	A		CH		11,300	11,300	100	0	0	0	175	30'					90
B4	A		CH		11,300	11,300	100	0	0	0	175	15'					90
B5	A		CG		10,800	10,800	100	0	0	0	175	17'	71				
B6	A		CG		10,700	10,700	100	0	0	0	100	100					
B7	A		CG		10,800	10,700	99	0	0	0	175	0					
B8	A		CB		11,300	11,300	100	0	0	0	175	0					
B9	A		CB		11,300	11,300	100	0	0	0	175	0					
B10	A		CH		8,700	8,700	100	0	0	0	100	0					

FORMA DE OBRAS DISTINGUIDAS, LOS VALORES TABULADOS SON DE CRISTA
 TABLA No. 4.10 MEDICIONES DE LAS CANTIDADES ELECTRICAS.

4.2 DISEÑO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA MEDIANA TENSION.

El diseño de un sistema de puesta a tierra para una instalación eléctrica de mediana tensión, se refiere propiamente al diseño de una red de tierras para subestaciones de distribución de 6, 13.8, 23 y 34.5 KV con elevados valores de corriente de falla y gradientes de potencial, que no pueden ser dispersados y reducidos a valores seguros con un sencillo arreglo geométrico de dispersores verticales y horizontales.

Por lo que la optimización de costos de material en base a la obtención de un diseño seguro y práctico, serán los propósitos específicos de este tema.

ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE UNA RED DE TIERRAS.

Para el análisis básico de una red de tierras usualmente se empieza por la inspección del lugar y del plano general de arreglo de la subestación donde se muestran todos los equipos y estructuras importantes.

Para establecer las ideas y conceptos básicos, los siguientes puntos pueden servir como guía para iniciar el diseño de una típica red de puesta a tierra.

1) Un conductor continuo debe rodear en forma curva el perímetro de la subestación, para encerrar toda el área que resulte práctico utilizar.

Esta medida ayuda a evitar la concentración de elevados valores de corriente y gradiente de potencial dentro del área de la red y cerca del cable proyectado entorno a la subestación.

Si se encierra más área, también se reduce la resistencia de la red de puesta a tierra.

CAPITULO 4

Debido a que las cercas metálicas son usualmente accesibles al público y pueden ocupar una posición sobre la periferia de la malla de tierra; se deben tomar las siguientes medidas:

- a) Si la cerca se coloca dentro de la zona correspondiente a la malla, se debe prolongar esta a 1.50 m. fuera de la cerca como mínimo.
- b) Si la cerca se encuentra fuera de la zona correspondiente a la malla, debe colocarse por lo menos a dos metros del límite de la malla.
- c) No deben conectarse las cercas metálicas a la malla misma, sino a sus propios electrodos de tierra excepto en aquellos casos en que la cerca se encuentra tan próxima a las partes de equipo puesto a tierra, que exista el riesgo de que una persona toque simultáneamente a la cerca y al equipo.

2) Dentro del anillo, los conductores deben ser tendidos en líneas paralelas y, donde resulte práctico a lo largo de las estructuras ó hileras de equipo; para dotarlos de cortas conexiones de puesta a tierra.

Al respecto deberá evitarse el tender conductores bajo las bases y cimentaciones del equipo.

3) Una red típica de puesta a tierra para una subestación puede incluir conductores de cobre desnudos calibre No. 4/0 AWG, enterrados de 0.30 a 0.50 m. bajo nivel del terreno natural y espaciados entre sí de 3 a 6 m. para el diseño de la red.

En cruces de conductores, estos deben ser firmemente unidos a través de conectores ó soldadura.

Las varillas de tierra deben empezar por ubicarse en las esquinas de la red y en cada segunda unión a lo largo del perímetro de la red.

**CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).**

Las varillas de tierra pueden también ser instaladas junto a los más importantes equipos.

En suelos multicapa ó de muy elevada resistividad será útil la utilización de varillas de mayor longitud siempre y cuando los terrenos sean blandos.

4) La red de tierras normalmente es extendida en toda el área que abarca la subestación y muy a menudo más allá del límite de la cerca metálica que la rodea.

Parrillas de cable de tierra ó conductores de mayor calibre pueden ser usados en la conexión a tierra del neutro de generadores, bancos de capacitores y transformadores por tenerse en ese punto elevadas concentraciones de corriente, en el momento de una falla.

Frecuentemente conexiones cruzadas, solo propician un relativo y menor efecto en la reducción de la resistencia de la malla. Ya que su principal función es la de asegurar un adecuado control de los potenciales superficiales.

Las conexiones cruzadas son también útiles en asegurar trayectorias múltiples para la corriente de falla, minimizando la caída de tensión en la malla y proporcionando una segura medida de redundancia y fluidez para la corriente de falla.

RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA CONDICIONES DIFÍCILES.

En áreas donde la resistividad del suelo es muy elevada, ó el espacio de la subestación es reducido y no es posible obtener una baja impedancia en el sistema de puesta a tierra aun con la diseminación de toda la malla de electrodos

CAPITULO 4

verticales. Propiciándose un difícil control de los gradientes superficiales; se recomiendan las soluciones siguientes:

- 1) Conexiones a redes de tierra remotas y sistemas de puesta a tierra adyacentes accesibles tales, como, un sistema combinado utilizando instalaciones de edificios separadas, bóvedas subterráneas, cimentaciones, etc.
- 2) Usando varillas de puesta a tierra de instalación profunda en pozos taladrados en la tierra, en combinación con el uso de tratamientos químicos para el suelo ó el uso de arcillas de bentonita para relleno.
- 3) Usando balanceadas esteras de alambre en áreas descubiertas, es factible combinar un material aislante y esteras prefabricadas, hechas de alambre de malla; metal expandido ó rejas.

Obteniéndose primero al igualar el campo del gradiente de potencial cerca de la superficie y después el reducir la conductancia de la superficie hacia las estructuras metálicas subyacentes.

Una malla balanceada típica puede consistir de un arreglo de alambres de acero revestidos de cobre, calibre No. 6 AWG dispuestos en un modelo de red de 0.6 por 0.6 m., e instalada de 0.05 a 0.15 m. bajo la superficie de la tierra y sobre la red de puesta a tierra principal, la cual es instalada a mayor profundizada; usualmente de 0.30 a 0.50 m.

- 4) Donde sea factible, el uso controlado de otros medios accesibles para disminuir la resistencia global de un sistema de puesta a tierra; tal como la conexión en alambres estáticos y neutros aterrizados, pueden ser utilizados. Típicos es el aprovechamiento de objetos metálicos sobre el sitio

**CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).**

para atenuar la resistencia, y que además pueden ser útiles como electrodos auxiliares de tierra ó como lazos de puesta a tierra para otros sistemas.

Las consecuencias de estas aplicaciones tienen que ser cuidadosamente evaluadas.

5) Donde resulte ser práctico, un depósito cercano de material de baja resistividad y de volumen suficiente, puede ser usado para instalar una red adicional (satélite). Esta red satélite una vez que es conectada a la red principal, disminuirá la resistencia global y en consecuencia la elevación del potencial de tierra. Dicho depósito con material de baja resistividad puede estar compuesto de arcilla o alguna parte de una gran estructura tal como la masa de concreto de una presa hidroeléctrica.

CONEXIONES A LA MALLA DE PUESTA A TIERRA.

Conductores de adecuada capacidad de conducción y resistencia mecánica, deben ser usados para las conexiones entre:

1. Todos los electrodos de tierra, tales como, redes de puesta a tierra, varillas verticales, tierras de pozo y donde sea factible tuberías metálicas subterráneas, tuberías de agua y gas, estructuras de pozos de agua, etc.
2. Todas las conductoras partes metálicas ubicadas sobre el terreno de la zona de la subestación; pueden llegar a ser accidentalmente energizadas; tales como, estructuras metálicas, armazones de maquinaria, cubiertas metálicas de equipo eléctrico, cercas metálicas, canalizaciones, etc.
3. Todas las fuentes de corriente de falla, tales como apartarrrayos, bancos de capacitores, conexiones de capacitores, transformadores y donde

CAPITULO 4

resulte apropiado neutros de aparatos, circuitos secundarios de alumbrado y fuerza.

Cables ó bandas de cobre son usadas empleadas para estas conexiones de tierra, aunados a soldaduras exotérmicas soldaduras de latón ó conectores de presión para las conexiones subterráneas.

CRITERIOS DE DISEÑO.

Los principales criterios a considerar para e diseño de un sistema de puesta a tierra para una subestación de mediana tensión bajo condiciones normales ó de falla son los siguientes:

- A) Proveer los medios suficientes para disipar ó drenar dentro de la tierra las corrientes de falla a la brevedad posible, sin exceder los límites del equipo y de su operación.
- B) Asegurar que una persona en las proximidades del equipo aterrizado no se exponga al daño de un crítico choque eléctrico.

El procedimiento de diseño que a continuación será descrito tiene como propósito fundamental el seguir valores seguros de las peligrosas tensiones de paso y de contactos dentro y en las proximidades de una instalación.

Considerándose a la tensión de malla como la peor tensión de toque posible dentro de una subestación (excluyendo las tensiones transferidas), estas será considerada como el fundamento de este procedimiento de diseño.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.

El diagrama de bloques de la figura (4.2) muestra la secuencia de los pasos para el diseño de la red de tierras.

**CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).**

Los parámetros mostrados en el diagrama de bloques están identificadas en el índice presentado en la tabla No (4.11).

Paso(1) El mapa de la propiedad y el plano general de ubicación de la instalación deben proporcionar una buena idea del área a ser usada para la puesta a tierra. La medición de la resistividad del suelo, descrita en un capítulo anterior anteriores, determinará el perfil y modelo del terreno (esto es, modelo uniformé ó de 2 capas).

Paso(2) El calibre del conductor será determinado por las ecuaciones señaladas con anterioridad (capit. No. 1). Donde la corriente de falla a tierra I_G será la máxima esperada que circulará por cualquier conductor del sistema de puesta a tierra, y el tiempo t_f debe reflejar el máximo espacio de tiempo posible (incluyendo el tiempo de apoyo).

Paso (3). Las tensiones de paso y toque tolerables son determinadas por las ecuaciones dadas en el subtema visto en el capítulo No. 1. La selección del tiempo t_s está basada en el criterio del ingeniero diseñador, pudiéndose tomar como referencia lo estipulado en el capítulo No. 1. Aunque usualmente su rango de ajuste oscila entre 0.25 a 1 segundos.

Paso (4). El diseño preliminar debe incluir un conductor entorno al área a usar, para la puesta a tierra, así como el cruzar conductores para proveer convenientes conexiones para el equipo por aterrizar.

Las estimaciones iniciales del espaciamiento de los conductores y ubicación de las varillas, debe estar basada en el valor de la corriente I_G y el área a usar para la puesta a tierra.

CAPITULO 4

Paso (5). Estimar el valor de la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra en base a las fórmulas de los incisos (a, b y c) y final; en base a las fórmulas del inciso (d).

a) Para suelos uniformes como una primera aproximación, un valor mínimo de la resistencia de puesta a tierra de la subestación, puede ser estimado por medio de la fórmula de una placa metálica circular a profundidad de 0 a 0.25 m.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \dots \dots \dots (4.3)$$

de donde:

R_g = Resistencia a tierra de la (subestación) en ohms.

ρ = Resistividad promedio de la tierra en Ωm .

A = Area ocupada por la red de tierras en m^2 .

b) Un valor más exacto de la resistencia de la red para suelos uniformes y enterrados a una profundidad no mayor de 0.25 m. se obtiene con la siguiente fórmula; que considera que la de una placa metálica. Y que dicha diferencia disminuye en la medida que se incrementa la longitud de los conductores enterrados.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \dots \dots \dots (4.4)$$

donde :

L = Longitud total de los conductores en metros.

CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).

TABLA No. (4.11)

INDICE DE PARAMETROS DE DISEÑO (SIMBOLO Y DESCRIPCION).

I_{fo}	Corriente de falla asimétrica en la subestación para conductores dimensionados en Amperios.
I_G	Corriente máxima de la red que fluye entre la red de tierras y tierra que la rodea en Amperios.
ρ	Resistividad del suelo en ohm-metros.
ρ_s	Resistividad de la capa superficial en ohm-metros.
h_s	Grueso de la capa superficial.
C_a	Factor de corrección de la corriente por el futuro crecimiento del sistema.
C_s	Factor de corrección para la resistividad de la capa superficial.
t_c	Duración de la corriente de falla para el dimensionamiento de conductores de tierra en segundos.
t_f	Duración de la corriente de falla para la determinación del factor de decremento, en segundos.
h	Profundidad de los conductores de la red de tierras en metros.
d	Diámetro de los conductores de la red en metros.
A	Área total que encierra la red de tierras en metros.
D	Espacio entre conductores paralelos en metros.
D_f	Factor de decremento para la determinación de I_G .
n	Número de conductores paralelos en metros.
K_m	Factor de espaciado para la tensión de malla.
K_p	Factor de espaciado para la tensión de paso.
K_f	Factor correctivo para la geometría de la red.
K_i	Factor correctivo del peso que ajuste los efectos de los conductores internos en las esquinas de la malla.
K_h	Factor correctivo de peso que ajuste los efectos de la profundidad de la red.
L	Longitud total de los conductores que componen el sistema de puesta a tierra, incluyendo los conductores de la red y varillas de tierra en metros.
R_a	Resistencia del sistema de puesta a tierra en ohms.
E_m	Tensión de malla en el centro de la esquina de la malla en voltio.
$E_{s(50)}$	Tensión de paso entre un punto exterior arriba de la esquina de la red y punto exterior o un punto diagonal de la red, en voltio.
$E_{toque(70)}$	Tensión de toque tolerable para cuerpos humanos con 70 Kg. de peso, en voltio.
$E_{paso(80)}$	Tensión de paso tolerable para cuerpos humanos con 80 Kg. en voltio.
$E_{paso(70)}$	Tensión de paso tolerable para cuerpos humanos con 70 Kg. de peso, en voltio.

CAPITULO 4

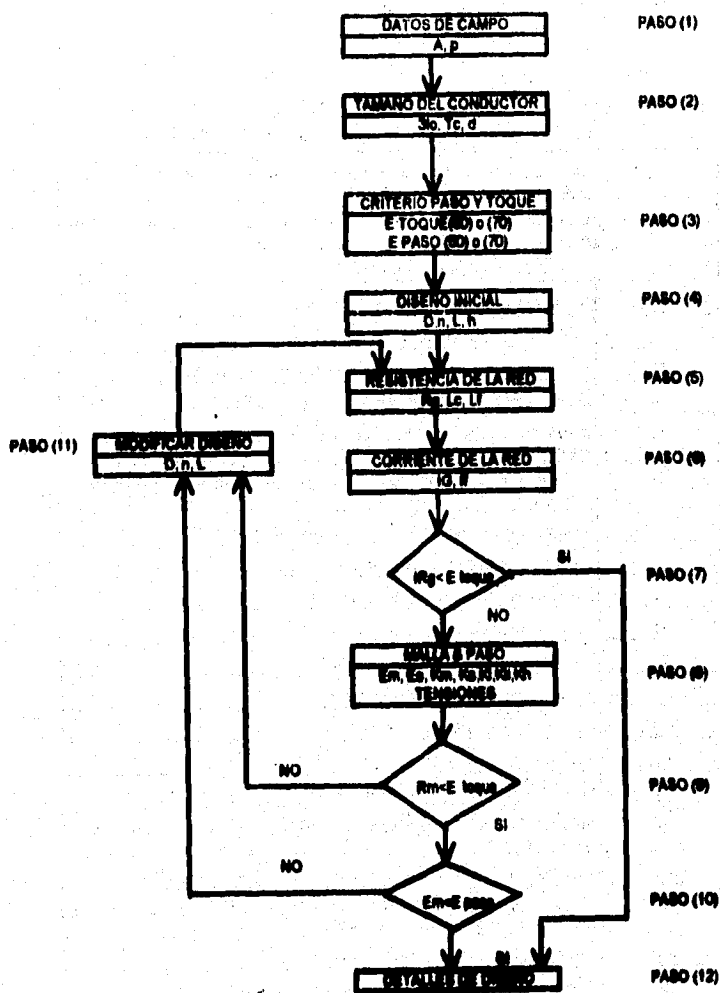


DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.

FIGURA 4.2

CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSIÓN).

Para redes enterradas a una profundidad de 0.25 a 2.5 m. el uso de la siguiente fórmula de aproximación es lo adecuado:

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{30A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{30/A}} \right) \right] \dots\dots(4.5)$$

donde:

h= profundidad de la red.

c) Para calcular la resistencia total de un sistema consistente de una combinación de dispersores horizontales y verticales, asumiendo condiciones de suelo uniforme se tiene la siguiente fórmula:

$$R_G = \frac{R_1 R_2 - 2R_{12}}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \dots\dots\dots(4.6)$$

donde:

R₁ = Resistencia de los conductores de la red.

R₂ = Resistencia de todas las varillas de tierra.

R₁₂ = Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la red y el grupo de varillas de tierra.

d) Sin embargo, en la práctica las varillas dentro de la tierra atraviesan varias capas de terrenos conductor, por lo que para la determinación de la resistencia de la red para suelos de dos capas, se tienen las siguientes expresiones; sobre la base de la ecuación (4.6).

CAPITULO 4

$$R_1 = (\rho_1 / \pi d_1) \left(L_n(2l_1 / h) + K_1(l_1 / \sqrt{A}) - K_2 \right) \dots \dots \dots (4.7)$$

$$R_2 = (\rho_2 / 2\pi \pi d_2) \left(L_n(2l_2 / d_2) - 1 + 2K_1(l_2 / \sqrt{A})(\sqrt{a} - 1)^2 \right) \dots \dots \dots (4.8)$$

$$R_{11} = (\rho_1 / \pi d_1) \left(L_n(2l_1 / l_1) + K_1(l_1 / \sqrt{A}) - K_2 + 1 \right) \dots \dots \dots (4.9)$$

donde:

ρ_1 = Resistividad del suelo encontrada a la profundidad (h) que son enterrados los conductores de la red en ohms-metros.

ρ_a = Resistividad aparente del suelo en ohms-metros.

H = Grueso de la capa del suelo más elevada en metros.

ρ_2 = Resistividad del suelo de profundidad (H) descendiente en ohms-metro.

l_1 = Longitud total de los conductores de la red en metros.

l_2 = Longitud promedio de una varilla de tierra en metros.

h = Profundidad a la que esta enterrada la red en metros.

$h' = \sqrt{d_1 h}$ para conductores enterrados a la profundidad (h) ó (0.5 d_1) para conductores en h=0 (sobre la superficie de la tierra).

A = Area cubierta por una red de dimensiones (a,b) en m².

n = Número de varillas de tierra localizadas en el área (A).

K_1, K_2 = Constantes relacionadas con la geometría del sistema (Ver figs.4.3 y 4.4).

d_1 = Diámetro del conductor de la red en metros.

d_2 = Diámetro de las varillas de tierra en metros.

a = Longitud de la red en su lado corto en metros.

b = Longitud de la red en su lado largo en metros.

CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).

Para los casos en que, ρ_1 es mayor ó igual a ρ_2 y donde la red este enterrada en la capa superior de ρ_1 ; pero las varillas de tierra estén enterradas en parte en ρ_1 y en parte en ρ_2 ; R_2 y R_{12} son calculadas con el uso de una resistividad aparente de suelo ρ_a ; definida como sigue:

$$\rho_a = l_2(\rho_1\rho_2)(\rho_2H + \rho_1(l_2-H)) \dots\dots(4.10)$$

Para el caso más usual en que el tope de las varillas de tierra este a la misma profundidad que la red;

$$\rho_a = \left(\frac{l_2(\rho_1\rho_2)}{(\rho_2(H-h) + \rho_1(l_2+h-H))} \right) \dots\dots(4.11)$$

Para suelos uniformes, $\rho_2 = \rho_1$

Paso (6) La corriente I_G es determinada por las ecuaciones dadas en el sistemas anteriores. Con el fin de prevenir un enorme sobre diseño del sistema de puesta a tierra, solamente la porción de la total corriente de falla I_G que fluye a través de la red a la tierra remota debe ser usada en el diseño de la red.

La corriente I_G debe sin embargo, reflejar el valor de la peor situación de falla, el factor de decremento (ver la tabla 4.13) y cualquier futura expansión del sistema.

Paso (7) Si el potencial máximo de tierra del diseño preliminar está bajo la tensión tolerable de toque no será necesario un adicional análisis. Solo el conductor adicional requerido para las conexiones a tierra del equipo.

Paso (8) El cálculo de las tensiones de malla y de paso para la red como diseño, puede ser hecho por las ecuaciones siguientes:

$$EM = \rho K_m K_1 I_G / L \dots \dots \dots (4.12)$$

$$EX = \rho K_s K_1 I_G / L \dots \dots \dots (4.13)$$

Para la obtención de un exacto valor de las tensiones de malla y de paso; en recientes fechas se han desarrollado algoritmos computarizados; los cuales requieren de una considerable capacidad de almacenamiento que es relativamente cara para ejecutarse. Además de que en la mayoría de los casos de los sistemas de puesta a tierra en las subestaciones de mediana tensión no resulta económicamente justificable su utilización ó ya sea que el diseñador no tenga acceso a una computadora con la capacidad requerida.

De ahí los valores de las ecuaciones (4.12 y 4.13) son obtenidos simplíficadamente como un producto de factores geométricos (K_m ó K_s , respectivamente); de un factor correctivo (K_1) el cual está considerado para el incremento de la densidad de corriente en los extremos de la red, por la resistividad del suelo y por la densidad de corriente promedio por unidad del conductor enterrado (I_G/L).

Para la tensión de malla se deriva un factor que está basado en la geometría de la red de tierras sin varillas. La relación entre K_m y E_m depende

CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).

principalmente de la densidad de corriente en el perímetro de los conductores contra la densidad de corriente en el interior del conductor.

$$K_n = \frac{1}{2\pi} \left[L_n \left(\frac{D^2}{16bd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{hd}{K_d} L_n \frac{8}{\pi(2h-1)} \right] \quad (4.14)$$

donde:

$K_n = 1$, para redes con varillas de tierra a lo largo del perímetro, ó para redes varillas de tierra en las esquinas de la red, así con ambas a lo largo del perímetro y en toda la extensión de la red.

$K_n = \frac{1}{(2n)^{2h}}$ para redes sin varillas ó redes con solamente unas pocas varillas de tierra, que no estén localizados en las esquinas ó en el perímetro.

$$K_n = \sqrt{1+h/bn}$$

$h_0 = 1$ m (referido a la profundidad de la red) y (D), (h), (n) y (d) están definidos en la tabla No. (4.12).

El factor correctivo K_1 es necesario para compensar la realidad que expone el modelo matemático de (n) conductores paralelos que no pueden ser calculados por los efectos de la geometría de una red, esto es, para los efectos de la geometría de una red, esto es, para dos series de conductores paralelos que son perpendiculares uno del otro e interconectados en sus puntos de cruce. Este factor es igual a:

$$K_1 = 0.656 + 0.172n \dots \dots (4.15)$$

CAPITULO 4

Si L_c representa la longitud total del conductor de la red y L_r representa la longitud total de las varillas de tierra, por lo tanto para redes con varillas de tierra se tiene que:

$$E_m = \frac{\rho IGK_m K_1}{L_c + 1.15L_r} \dots\dots\dots(4.16)$$

El multiplicador 1.15 para L_r refleja el porcentaje en que la densidad de corriente es más elevada en las varillas de tierra cerca del perímetro que en los conductores de la red.

Y para redes que no cuentan con varillas de tierra o con solamente unas cuantas varillas ubicadas dentro de la red pero alejadas de su perímetro.

$$E_m = \frac{\rho IGKMK_2}{L_c + L_r} \dots\dots\dots(4.17)$$

De la ecuación No. (4.13) se deriva el factor K_2 basado en la geometría de una red sin varillas de tierra de donde:

$L=L_c+L_r$ Para redes sin varillas de tierra ó solamente unas pocas en el centro de la red y alejadas de su perímetro.

$L=L_c+1.15 L_r$ Para redes con predominante cantidad de varillas de tierra a lo largo de su perímetro.

Por simplificación, se adopta que la máxima tensión de peso ocurra en una distancia igual a la profundidad que la red está enterrada (h), justamente por fuera del conductor perimetral.

Por lo tanto para usuales redes enterradas a una profundidad de 0.25m. $<h<2.5m.$, se tiene que:

CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.8^{n-1}) \right] \dots\dots\dots (4.18)$$

y para profundidades más pequeñas de 0.25 m.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} W \right) \dots\dots\dots (4.19)$$

Donde:

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \dots\dots\dots + \frac{1}{n-1} \dots\dots\dots (4.20)$$

ó para $n \geq 6$

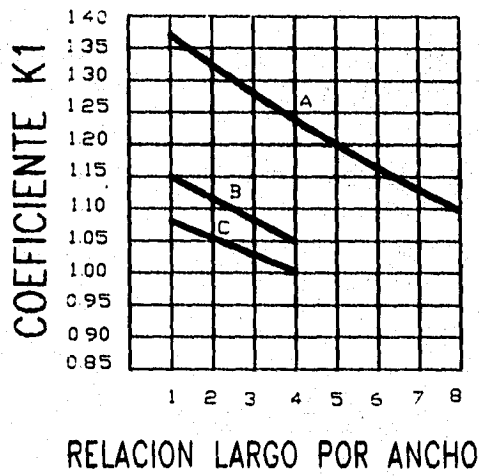
$$W = \frac{1}{2(n-1)} + Ln(n-1) - 0.423 \dots\dots\dots (4.21)$$

Por lo tanto para el uso de las diferentes ecuaciones del factor K_s se dependerá de la profundidad de la red (h), observándose que el valor de la tensión de paso disminuirá rápidamente con el incremento de la profundidad a la que sea enterrada la red.

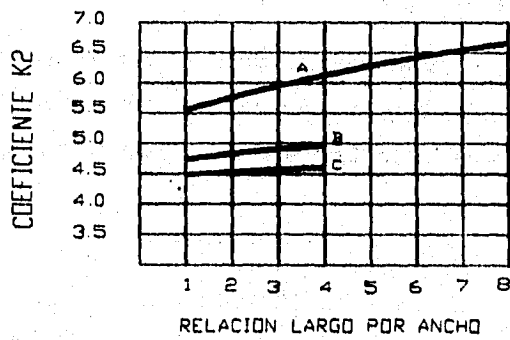
VALORES TÍPICOS DE D_f (FACTOR DE DECREMENTO)		
DURACION DE LA FALLA t_f (s)	CICLOS (60 Hz cc)	FACTOR DE DECREMENTO D_f
0.008	1/2	1.85
0.1	6	1.26
0.25	15	1.10
0.5 ó MAS	30 ó MAS	1.0

TABLA 4.12

CAPITULO 4



COEFICIENTE K1
FIGURA 4.3



- CURVA A PARA UNA PROFUNDIDAD $h=0$
 $y_A = -0.15x + 5.50$
 CURVA B PARA UNA PROFUNDIDAD $h=1/10$ AREA
 $y_A = -0.10x + 4.68$
 CURVA C PARA UNA PROFUNDIDAD $h=1/6$ AREA
 $y_A = -0.05x + 4.40$

COEFICIENTE K2
FIGURA 4.4

**CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).**

Paso (9) Si la tensión de malla calculada está por debajo de la tensión de toque tolerable, el diseño está casi terminado y deberá continuarse con el paso No. (10).

Pero si la tensión de malla calculada es más grande que la tensión de toque tolerable, el diseño preliminar debe ser revisado y deberá continuarse con el paso No. (11).

Paso (10) Si las tensiones de toque y de paso calculadas están por debajo de la tensión tolerable, el diseño solamente necesita el refinamiento requerido para proporcionar las conexiones a tierra del equipo de la subestación, Sino, el diseño preliminar deberá ser revisado (Ver paso No. 11).

Paso (11) Si cualquiera de los límites tolerables de las tensiones de toque ó de paso son excedidos, la revisión del diseño de la red será requerido. Los posibles remedios siguientes deben ser estudiados y aplicados donde sea apropiado:

a) Decrementar la resistencia total de la red de tierras para disminuir el valor del máximo potencial en la red y por lo tanto el máximo potencial transferido. El más efectivo camino para disminuir el valor de las resistencias de la red de tierras es incrementando el área ocupada por la red. Varillas profundas y pozos de tierra mejorados pueden ser utilizados si el área disponible está limitada.

Una simple ecuación puede ser usada para obtener una determinación preliminar del necesario conductor de red enterrado, para obtener que la tensión máxima de toque dentro del área aterrizada se mantenga bajo los

CAPITULO 4

límites seguros establecidos por las ecuaciones No. (4.22 y 4.23), se obtiene:

$$\frac{K_m K_l \rho_s G}{L} < (1000 + 1.5C(b, K) \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

Haciendo un nuevo arreglo de esta ecuación para (L), se obtiene:

$$L > \frac{K_m K_l \rho_s \sqrt{t_s}}{(116 + 0.174C(b, k) \rho_s)} \dots \dots \dots (4.22)$$

Similarmente para $E_m < E_{\text{toque}}(70)$, y combinando las ecuaciones No. (4.12) y (4.22), se obtiene:

$$L > \frac{K_m K_l \rho_s \sqrt{t_s}}{(157 + 0.235C(b, k) \rho_s)} \dots \dots \dots (4.23)$$

b) Mejorando el control del gradiente de potencial. esto puede incluir el reducir los espacios entre los conductores de la red, aproximándose a la condición de una placa continua.

El problema en el perímetro es aun más difícil de resolver, especialmente en pequeñas subestaciones, donde la resistividad del suelo es elevada. Sin embargo es usualmente factible enterrar el conductor perimetral de la red fuera del límite de la cerca, para asegurar que los gradientes perimetrales de la red no contribuyan a provocar peligrosos contactos de toque.

**CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).**

Otra efectiva y económica solución para controlar los gradientes perimetrales, es incrementando la densidad de varillas de tierra en el perímetro, esta densidad puede ser decreciente hacia el centro de la red.

Otro método de aproximación para controlar los gradientes del perímetro y potenciales de paso es enterrando dos ó más conductores paralelos alrededor del perímetro en sucesiva mayor profundidad como incremento de la distancia, respecto de la instalación.

c) Desviando una gran parte de la corriente de falla a otras trayectorias, por ejemplo conectándose a los hilos de tierra aéreos de las líneas de transmisión o por disminución de las resistencias a pie de torre en las cercanías de la instalación.

Sin embargo, el efecto de los gradientes de falla cerca de los pies de torre deberá ser estimado.

d) Limitando las corrientes de cortocircuito que fluyan en la tierra a más bajos valores.

Si es factible, ello disminuirá la elevación de potencial en la red y demás gradientes en forma proporcional. Por otra parte, no se recomienda resolver este aspecto aumentando el espacio de tiempo de la falla, ya que ello incrementará el peligro en vez de disminuirlo.

e) Cerrando los accesos a zonas limitadas donde sea impráctico eliminar la posibilidad de excesivas diferencias de potencial, durante la ocurrencia de una falla.

CAPITULO 4

Paso (12) Después de haber obtenido satisfactorios valores de las tensiones de paso y de toque, una adicional cantidad de conductores en la red y varillas de tierras puede ser requerida.

Los adicionales conductores para la red pueden ser requeridos si el diseño de la red no incluyó conductores cerca del equipo a ser conectado a tierra.

Las varillas de tierra adicionales pueden ser requeridas para conectar a tierra las bases de apartarayos, neutros de transformadores, etc.

LIMITACIONES DE LAS ECUACIONES SIMPLIFICADAS

PARA LAS TENSIONES DE MALLA Y DE PASO.

Diversas simplificaciones y suposiciones son hechas para obtener las ecuaciones por E_m y E_s . Estas suposiciones pueden proporcionar resultados inexactos para algunos casos, en comparación con los resultados de un riguroso análisis de computadora ó pruebas del arreglo a escala. La inclusión de factores de corrección dentro de las ecuaciones No. (4.12) y (4.13) prácticamente elimina la inexactitud (dentro de ciertos rangos para los distintos parámetros). Para la mayoría de los más prácticos diseños de redes de puesta a tierra cuando se utilicen dichas ecuaciones, los siguientes límites son recomendados para redes cuadradas o rectangulares, teniendo la misma cantidad de conductores en ambas direcciones:

$$\begin{aligned} 25 &\geq n \\ 2.5 &\geq h \geq 0.25 \text{ m.} \quad \text{m.} \\ d &< 0.25 h. \\ D &> 2.5 \text{ m.} \end{aligned}$$

**CRITERIOS DE DISEÑO PARA SIST. DE PUESTA A TIERRA
(BAJA Y MEDIANA TENSION).**

Aunque las ecuaciones para E_m y E_g han sido probadas para valores de (n) más grandes que 25 y se han encontrado que son suficientemente exactas bajo pruebas de modelos a escala; se recomienda tomar las debidas precauciones al exceder los límites dados.

Además, para iguales espacios en redes rectangulares (esto es, con mallas cuadradas) el valor de n para la determinación del factor para la tensión de malla K_m y el factor de irregularidad K_i será el medio geométrico del número de conductores en cualquier dirección, esto es:

$$n = \sqrt{n_a n_b} \text{ para calcular } E_m \dots \dots \dots (4.24)$$

donde:

n_a y n_b son el número de conductores en cada dirección.

El valor de n para la determinación del factor de la tensión de paso K_g y el factor de irregularidad K_i será el máximo de n_a y n_b :

$$n = \text{máximo } (n_a, n_b) \text{ para calcular } E_g \dots \dots \dots (4.25)$$

**EL USO DE ANALISIS COMPUTARIZADOS EN EL DISEÑO
DE UNA RED DE PUESTA A TIERRA.**

Existen varias razones que pueden justificar el uso de más exactos algoritmos de calculo en el diseño de un sistema de puesta a tierra. Estas razones incluyen:

1. El que uno o más de los parámetros geométricos excedan los límites descritos anteriormente.
2. Un modelo de suelo de dos capas sea requerido, debido a las significativas variaciones en la resistividad del suelo.
3. Una simétrica red (esto es, en forma de "L", con proyecciones, etc.) haga impráctico predeterminar la ubicación de la peor tensión de toque.

CAPITULO 4

4. Desigualdad de los espacios en los conductores de la red y varillas de tierra; que no pueda ser analizada usando los métodos señalados.
5. Más flexibilidad en la determinación de los locales puntos peligrosos, puede ser usado.

Diversas referencias describen los algoritmos computarizados para diversos modelos de sistemas de puesta a tierra.

En general, estos algoritmos están basados en:

- a) Modelando individualmente los componentes de que consta el sistema de puesta a tierra (esto es, los conductores de la red, varillas de tierra, etc.)
- b) Formulando una serie de ecuaciones que describen la interacción de estos componentes.
- c) Resolviendo las corrientes de falla a tierra que fluyen de cada componente dentro de la tierra, y
- d) Calculando el potencial en cualquier punto de la superficie deseado, debido a todos los componentes individuales.

La exactitud de estos algoritmos computarizados depende principalmente del tamaño y número de segmentos en que cada componente es dividido para el modelo.

Esto determina la exactitud de la densidad de la corriente calculada para cada segmento del conductor.

Así mismo, la exactitud también depende de otros parámetros tales como la estructura del suelo y valores de resistividad.

CAPITULO No. 5

" EJEMPLO DE APLICACION "

CAPITULO 5

5.1 EJEMPLO DE APLICACION.

Siguiendo la metodología indicados en el capítulo (1) ahora veremos un ejemplo de aplicación para hacer una "sistema de conexión de tierra".

Tomaremos como base una planta industrial, cuyo diagrama unifilar se muestra en la figura No. (5.1).

Obsérvese que tanto en el transformador-1, como en el generador se esta incluyendo un resistor en la conexión del neutro de ambos equipos. El insertar el resistor es con el fin de limitar la corriente de falla a tierra y dar protección a los motores de 4.16 KV con dicha limitación de corriente. El ejemplo mostrará la forma de realizar el cálculo de dicho resistor. Investigación de las características del suelo.

De acuerdo con las mediciones realizadas en campo(en el terreno) donde se encontrara la planta, así como las condiciones climatológicas existentes en el lugar se tiene:

Altitud: 6 M.S.N.M.

Temperatura promedio anual: 32.8 °C

Terreno salino; (conservando un alto grado de humedad en el terreno).

Humedad constante a 80 cm.

Resistividad a una profundidad de 80 cm. Igual a 12.8 Ω /m.

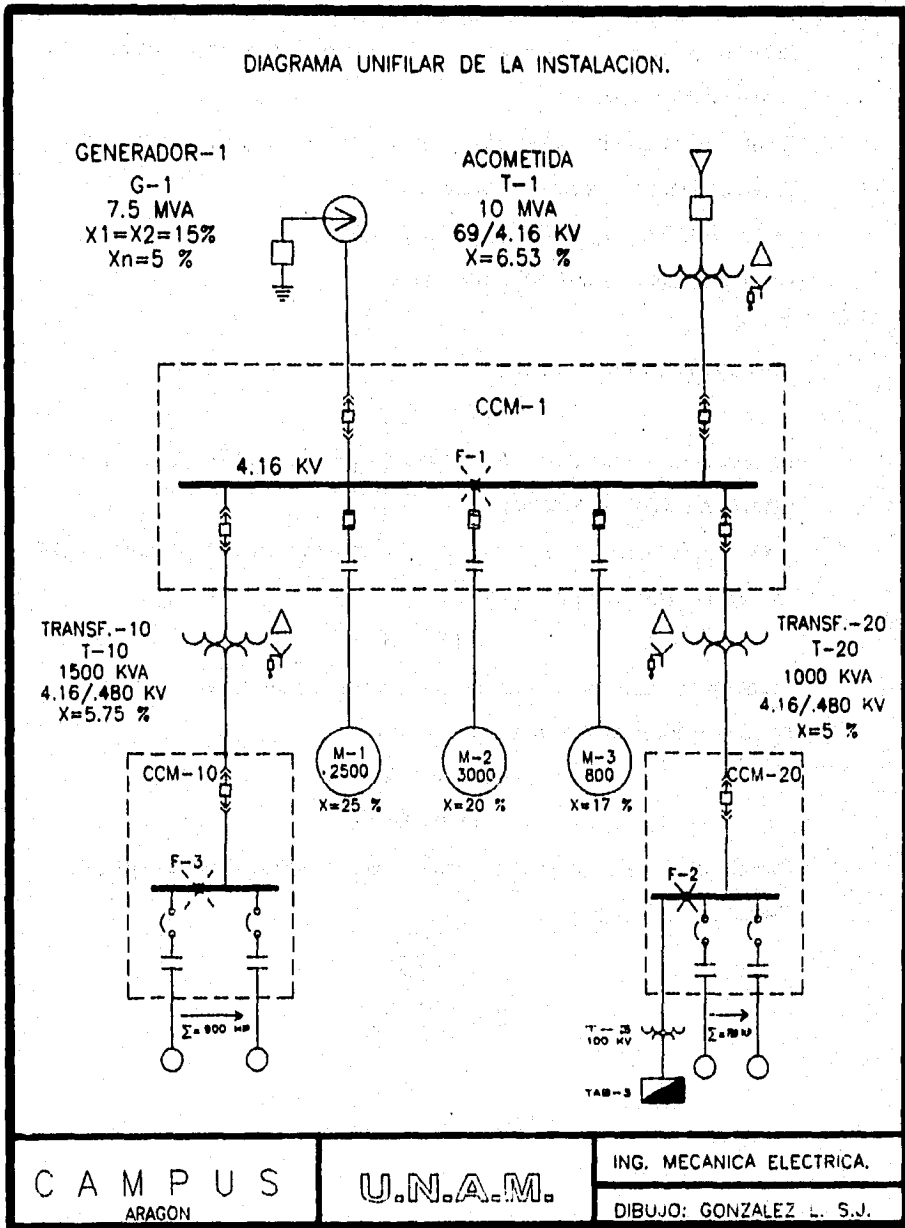
Resistividad superficial igual a 1500 Ω /m. Esto es porque se empleara roca triturada y concreto en los puntos críticos, como es por ejemplo en la subestación.

DETERMINACION DE LA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA.

El calculo de la falla de fase a tierra se realizara considerando tres puntos de falla; el primero se localizara en las barras de 4.6 KV. (CCM-1); la segunda falla se localizara en las barras de 480 V. (CCM-10) y las tercera también en las barras de 480 V. (CCM-20).

EJEMPLO DE APLICACION

DIAGRAMA UNIFILAR DE LA INSTALACION.



CAMPUS
ARAGON

U.N.A.M.

ING. MECANICA ELECTRICA.

DIBUJO: GONZALEZ L. S.J.

CAPITULO 5

Antes de proceder a la realización del cálculo es conveniente mencionar las consideraciones tomadas:

Se emplearán solo las reaktancias para determinar la impedancia del sistema, despreciándose los valores de resistencia.

Se desprecian las impedancias de cable y buses.

Las reaktancias de transformadores serán:

$$X_1 = X_2 = X_0$$

Los motores tendrán reaktancias:

$$X_1 = X_2 ; X_0 = \frac{1}{2} X_1$$

La reaktancia de un grupo de motores se calcula en base al 25 % de la capacidad del grupo de motores.

Para este problema demostrativo consideraremos que todos los motores son del tipo de inducción, y que se considera:

$$1 \text{ H.P.} = 1 \text{ KVA}$$

El cálculo se realiza por componentes simétricas con valores en por unidad.

Se consideran los valores bases del sistema:

$$\text{KVA}_b = 1500 \text{ MVA}$$

$$\text{KV}_b = 69 \text{ KV}$$

Cambiando las reaktancias de su propia base a los valores base del sistema.

Reaktancia de la red;

$$X_r = \frac{\text{MVA}_b}{\text{MVA}_r}$$

$$X_r = \frac{1500}{1500} = 1 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_r = 1 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_r = X_1 = X_2 = X_0 = 1.0 \frac{1}{\Omega}$$

EJEMPLO DE APLICACION

Reactancia del Transformador.

$$X_{T-1} = \frac{X\%}{100} \left(\frac{\text{MVA}_b}{\text{MVA}} \right) \left(\frac{\text{KV}}{\text{KV}_b} \right)^2$$

$$X_{T-1} = \frac{6.83}{100} \left(\frac{1000}{10} \right) \left(\frac{4.16}{4.16} \right)^2 = 9.795 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{T-1} = X_{1T1} = X_{2T1} = X_{0T1} = 9.795 \frac{1}{\Omega}$$

Reactancia del generador Generador-1:

$$X_{d1} = X_{2d1} = \left(\frac{15}{100} \right) \left(\frac{1000}{7.5} \right) \left(\frac{4.16}{4.16} \right)^2 = 30 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{d1} = X_{2d1} = 30 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{e1} = \left(\frac{5}{100} \right) \left(\frac{1000}{7.5} \right) \left(\frac{4.16}{4.16} \right)^2 = 10 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{e1} = 10 \frac{1}{\Omega}$$

Reactancia del transformador Transformador-10:

$$X_{T10} = \left(\frac{8.75}{100} \right) \left(\frac{1000}{1.5} \right) \left(\frac{4.16}{4.16} \right)^2 = 87.5 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{T10} = X_{1T10} = X_{2T10} = X_{0T10} = 87.5 \frac{1}{\Omega}$$

CAPITULO 6

Reactancia del transformador T-20:

$$X_{T20} = \left(\frac{5}{100}\right) \left(\frac{1500}{1}\right) \left(\frac{4.16}{4.16}\right)^2 = 75 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{T20} = X_{1T20} = X_{2T20} = X_{0T20} = 75 \frac{1}{\Omega}$$

Reactancias del motor Motor-1: 2500 1/Ω

$$X_{1M1} = X_{2M1} = \left(\frac{25}{100}\right) \left(\frac{1500}{2.5}\right) \left(\frac{4.16}{4.16}\right)^2 = 150 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{1M1} = X_{2M1} = 150 \frac{1}{\Omega} ; X_{0M1} = \frac{1}{2} X_{1M1} = \frac{1}{2}(150) = 75 \frac{1}{\Omega}$$

Reactancias del motor Motor-2: 300 HP.

$$X_{1M2} = X_{2M2} = \left(\frac{20}{100}\right) \left(\frac{1500}{3}\right) \left(\frac{4.16}{4.16}\right)^2 = 100 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{1M2} = X_{2M2} = 100 \frac{1}{\Omega} ; X_{0M2} = \frac{1}{2} X_{1M2} = \frac{1}{2}(100) = 50 \frac{1}{\Omega}$$

Reactancia del motor Motor-3: 800 HP:

$$X_{1M3} = X_{2M3} = \left(\frac{17}{100}\right) \left(\frac{1500}{0.80}\right) \left(\frac{4.16}{4.16}\right)^2 = 318.75 \frac{1}{\Omega}$$

EJEMPLO DE APLICACION

$$X_{1M3} = X_{2M3} = 318.75 \frac{1}{\Omega} \quad ; \quad X_{0M3} = \frac{1}{2} X_{1M3} = \frac{1}{2} (318.75) = 159.375 \frac{1}{\Omega}$$

Reactancia del grupo de motores del CCM-10:

$$X_{1CCM10} = X_{2CCM10} = \left(\frac{25}{100} \right) \left(\frac{1000}{0.9} \right) \left(\frac{0.48}{0.48} \right)^2 = 416.67 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{0CCM10} = X_{1CCM10} = 416.67 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{0CCM10} = \frac{1}{2} (416.67) = 208.33 \frac{1}{\Omega}$$

Reactancias del grupo de motores del CCM-20:

$$X_{1CCM20} = X_{2CCM20} = \left(\frac{25}{100} \right) \left(\frac{1500}{0.75} \right) \left(\frac{0.48}{0.48} \right)^2 = 500 \frac{1}{\Omega}$$

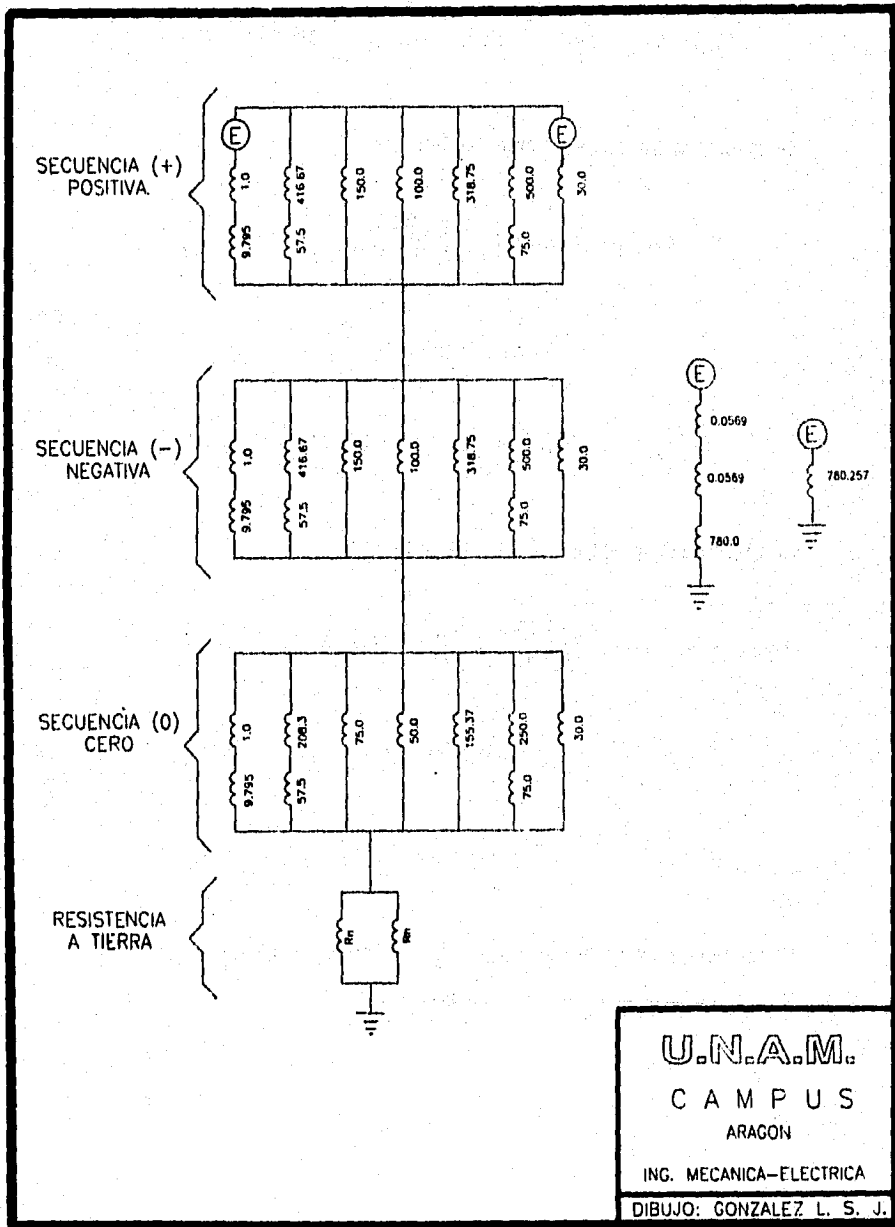
$$X_{0CCM20} = X_{1CCM20} = 500 \frac{1}{\Omega}$$

$$X_{0CCM20} = \frac{1}{2} (500) = 250 \frac{1}{\Omega}$$

EN SIGUIDA SE DETERMINAN LAS REDES DE SECUENCIAS Y SE SIMPLIFICAN.

PARA LA FALLA EN LAS BARRAS DEL CCM-4.16 KV.

CAPITULO 6



EJEMPLO DE APLICACION

Se calcula el valor de las resistencias de puesta a tierra, tanto para el Transformador T-1, como para el Generador G-1; se les insertaran resistores para limitar la corriente de falla a 400 Amp.

$$R_p = \frac{E_p}{I} \quad I = 400 \text{ A.} \quad E_p = \frac{4160}{\sqrt{3}} = 2401.7 \text{ V}$$

$$R_p = \frac{2401.70}{400} = 6.004 \quad R_p = 6 \Omega$$

Ahora calculando la impedancia base:

$$Z_b = \frac{KV_b^2}{KVA_b} = \frac{(4.16)^2}{1500} = 0.0115 \frac{1}{\Omega}$$

Referenciando el valor del resistor al sistema:

$$R_p = \frac{6}{0.0115} = 520.86 \frac{1}{\Omega} \quad R_p = 520 \frac{1}{\Omega}$$

$$3R_p = 1560 \frac{1}{\Omega}$$

Incluyendo este valor en la red de secuencias y reduciéndola, se esta en posibilidad de calcular la corriente de falla en por unidad:

$$I_s = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0 + 3R_p} \quad E = 1.0 \frac{1}{V}$$

$$I_s = \frac{3}{780.257} = 0.00384 \frac{1}{A}$$

CAPITULO 6

Se determina el valor de la corriente base en el nivel de 4.16 KV:

$$I_b = \frac{KVA_b}{\sqrt{3}KV}$$

$$I_b = \frac{1500000}{\sqrt{3}(4.16)} = 208179.2 \text{ Amp}$$

Por ultimo la corriente real de falla será:

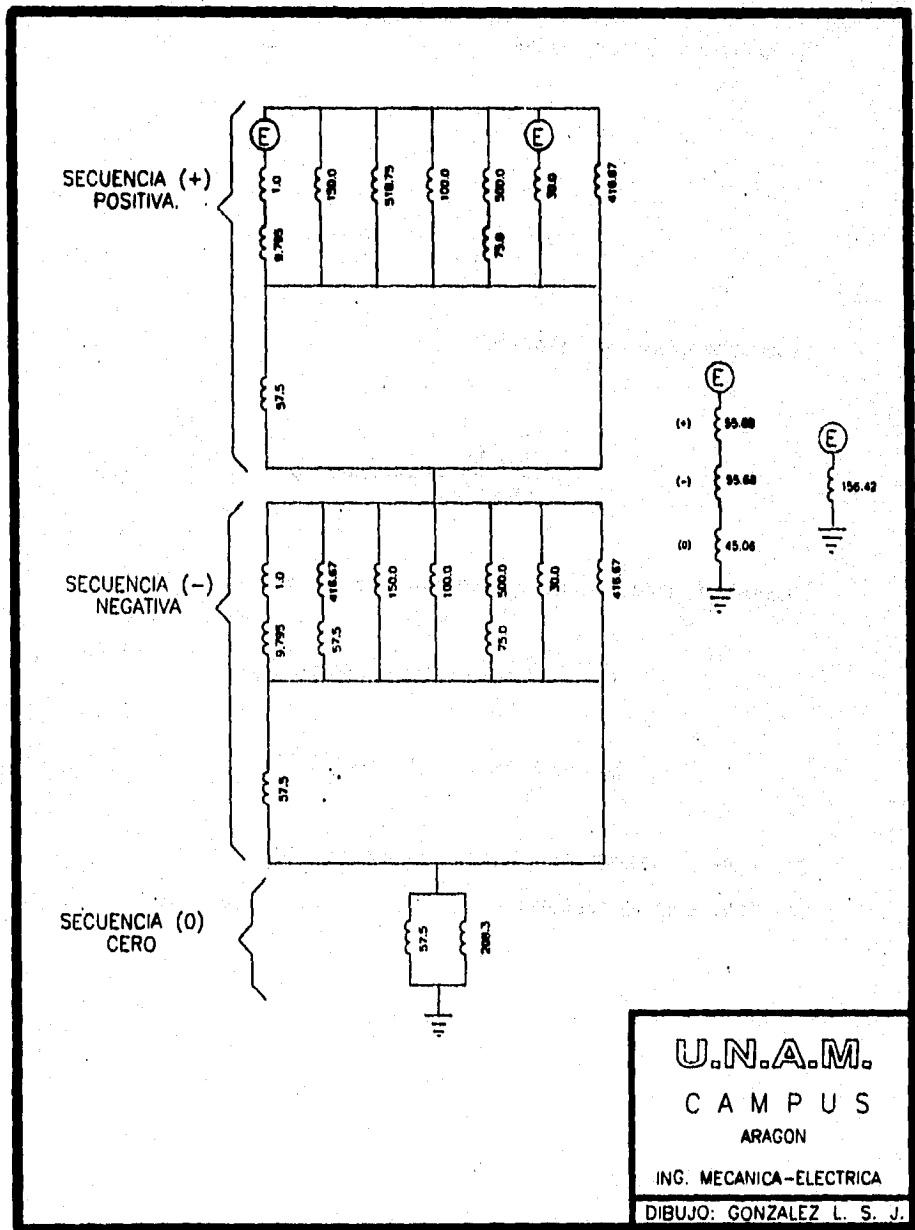
$$I_f = (I_f / A)(I_b)$$

$$I_{f1} = (0.00384)(208179.2) = 799.4 \text{ Amp}$$

$$I_f = 799.4 \text{ Amp}$$

LA RED DE SECUENCIA PARA LA SEGUNDA FALLA EN EL CCM-10 ES:

EJEMPLO DE APLICACION



U.N.A.M.
CAMPUS
ARAGON
ING. MECANICA-ELECTRICA
DIBUJO: GONZALEZ L. S. J.

CAPITULO 5

Se determina la corriente por unidad:

$$I_s = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0}$$

$$I_s = \frac{3}{186.42} = 0.01918 \frac{1}{A}$$

La corriente base en el nivel de 480 V:

$$I_b = \frac{180000}{\sqrt{3}(0.48)} = 1804219.6 \text{ Amp}$$

Entonces se puede determinar la corriente real de la falla:

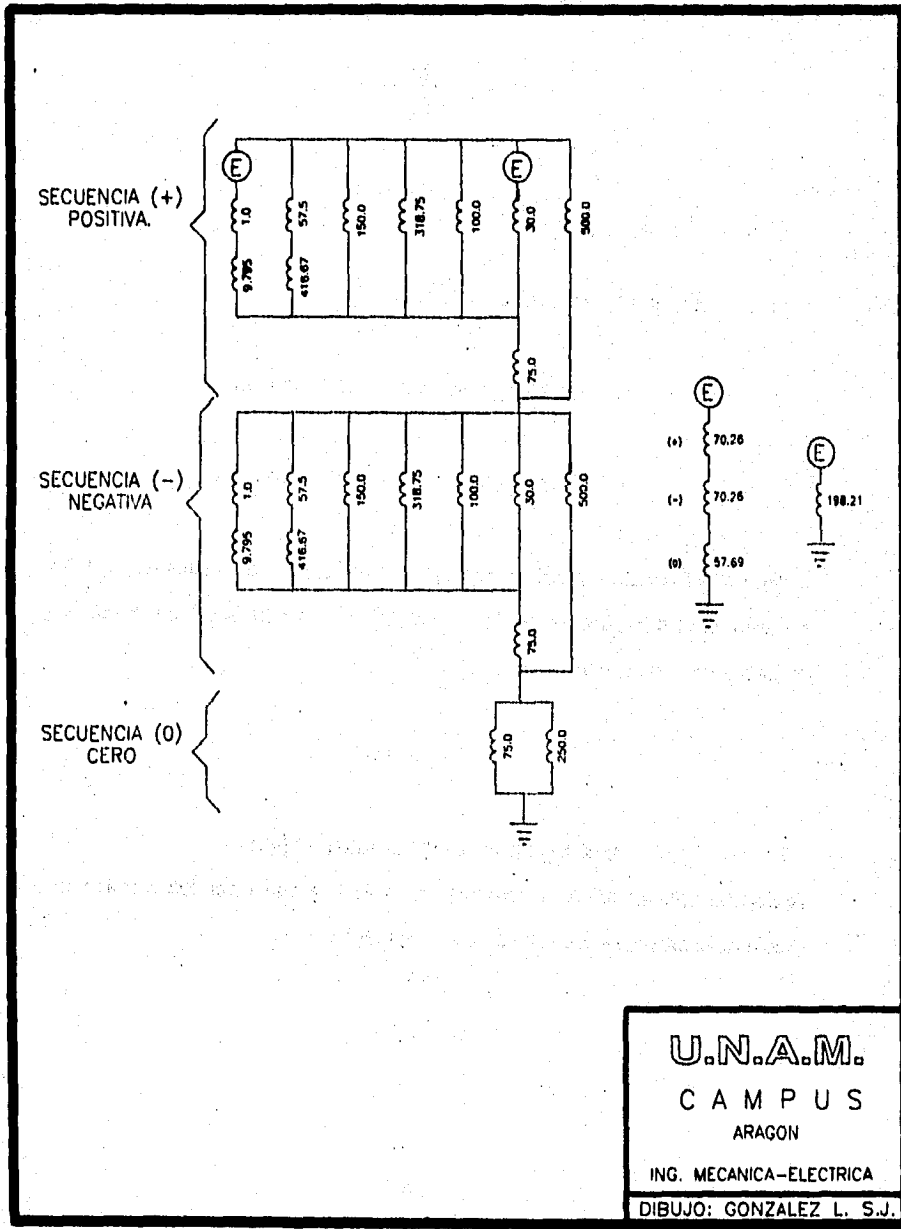
$$I_{r2} = (0.01918)(1804219.6) = 34603 \text{ Amp}$$

$$I_{r2} = 34603 \text{ Amp}; \quad I_{r2} = 34.603 \text{ KAmper}$$

POR ULTIMO SE DETERMINARA LA FALLA EN EL BUS DEL CCM-20

LAS REDES DE SECUENCIA SERÁN:

EJEMPLO DE APLICACION



U.N.A.M.
 CAMPUS
 ARAGON
 ING. MECANICA-ELECTRICA
 DIBUJO: GONZALEZ L. S.J.

CAPITULO 5

Ahora determinamos la corriente en por unidad:

$$I_a = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0}$$

$$I_a = \frac{3}{198.21} = 0.01513 \frac{1}{A}$$

Por lo que la corriente real será entonces:

$$I_{r1} = (0.01513)(1804219.6) = 27297.84 \text{ Amp}$$

$$I_{r2} = 27297.84 \text{ Amp}; I_{r3} = 27.297 \text{ KAmp}$$

Tenemos del calculo anterior se observa que los valores obtenidos que la falla en las barras del CCM-20, es la de mayor valor, por lo que será la que se emplee para el diseño de la red.

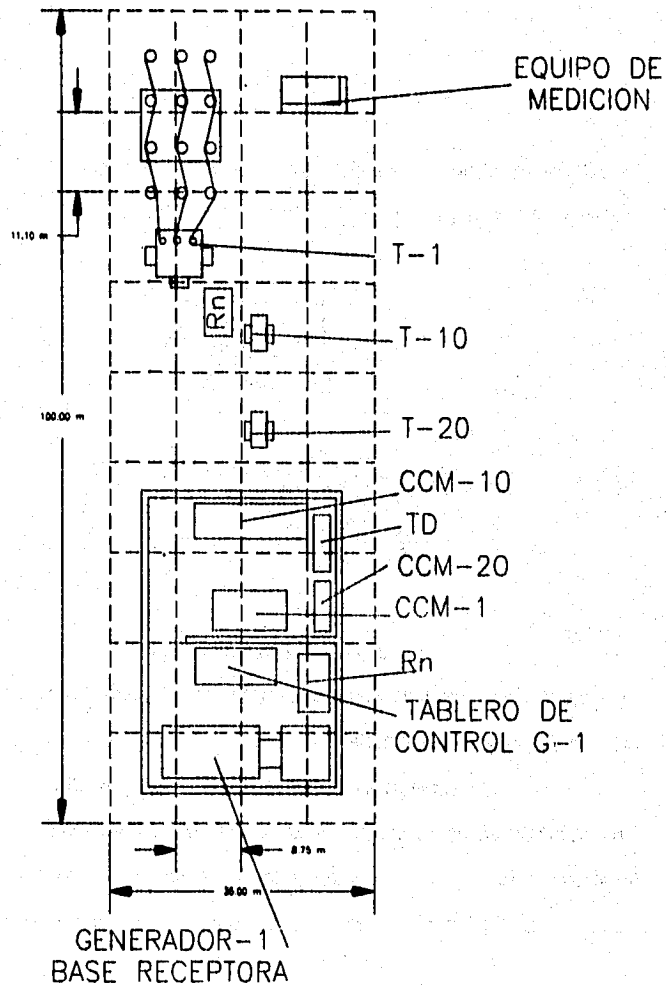
$$I = 34.6 \text{ KAmp}$$

DISEÑO PRELIMINAR DE LA RED DE TIERRA.

Ajustando primeramente la corriente de la falla a tierra por los factores de crecimiento futuro; se prevé un aumento del 25 %.

$$FC = 1.25$$

FIGURA No 5.2
PREDISEÑO DE LA RED DE TIERRAS
LOCALIZANDO LOS EQUIPOS.



CAPITULO 5

Y el factor de decremento para un tiempo de duración de acuerdo a la protección, se considera de 0.5 seg. (ver tabla No. 1.10, Capitulo 1).

$$FD = 1.0$$

La corriente ajustada será:

$$I = (1)(1.25)(34.6) = 43.25 \text{ KA}$$

Se determina ahora la sección del conductor requerido para soportar la corriente calculada. De la formula (1.28), (CAPITULO 1).

$$A = \frac{I}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{450 - 40}{234 + 40} + 1\right)}{33(0.5)}}$$

$$A = \frac{43.25 \text{ KA}}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{450 - 40}{234 + 40} + 1\right)}{33(0.5)}} = 278718.4 \text{ CM}$$

$$A = 278718.4 \text{ CM} = 278.718 \text{ MCM}$$

El conductor seleccionado comercialmente será de 300 MCM, el cual tiene un área de 152 mm² y 0.016 m de diámetro.

LA LONGITUD MINIMA REQUERIDA PARA LA RED.

Primeramente es conveniente realizar un arreglo preliminar de acuerdo con la localización de los equipos dentro de la planta, solo se considera lo que será la posible (subestación y la casa de maquinas y tableros, (Ver figura No. (5.2)).

EJEMPLO DE APLICACION

Dado que la área que interesa en el calculo de la red de tierras, se observa que se pueden trazar cinco conductores longitudinales de cien metros y una separación de 8.75 m. y diez conductores transversales de 35 m. de longitud, separados 11.10 m. la longitud será:

$$L = (35)(10) + (5)(100) = 600 \text{ m}$$

El calculo analítico de la longitud mínima se realizara con la ecuación (1.34), del Capitulo I, entonces es necesario determinar las constantes Km y Ki:

De la ecuación (1.33), y con n=5.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} L_m \left(\frac{8.75^2}{(16)(0.8)(0.016)} \right) + \frac{1}{\pi} L_m \left(\left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \right) = 0.7896$$

$$K_m = 0.7896$$

De la figura (1.22) tenemos que:

$$K_i = (0.65) + (0.172)(5) = 1.51$$

$$K_i = 1.51$$

Con los valores ya obtenidos de Km y Ki es esta en posibilidad de obtener la longitud mínima de la red;

$$L = \frac{(K_m)(K_i)(\rho)(I)(t)}{165 + (0.25)(\rho)}$$

CAPITULO 5

$$L = \frac{(0.7506)(1.51)(12.8)(43250)(\sqrt{0.5})}{165 + (0.25)(1500)} = 821.6 \text{ m}$$

$$L = 821.6 \text{ m}$$

Se ha de observar entonces que la longitud mínima calculada es menor que la longitud del prediseño gráfico entonces es aceptable dicha longitud. A continuación se procede a definir si es confiable la red.

CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA RED.

De la ecuación (1.37), Capítulo No. 1.

Tenemos que:

$$R = \frac{12.8}{(4)(10.55)} + \frac{12.8}{850} = 0.318 \Omega$$

$$R = 0.318 \Omega$$

CALCULO DEL MAXIMO POTENCIAL DE LA RED.

De la ecuación No. (1.38) del capítulo No. 1.

$$R = \frac{12.8}{(4)(10.55)} + \frac{12.8}{850} = 0.318 \Omega$$

$$R = 0.318 \Omega$$

EJEMPLO DE APLICACION

CALCULO DEL POTENCIAL EN LA RED.

La ecuación (1.32), Capítulo No.1 para determinar los potenciales de paso en la red:

$$E_{\text{PASO}} = K_s K_l p \frac{I}{L}$$

Donde K_s es el coeficiente que incluye los parámetros de espaciamento D , la profundidad de enterramiento h y el número de conductores en paralelo n , de la siguiente manera;

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

El número total de términos dentro del paréntesis será igual al número total de conductores en paralelo.

Entonces calculando K_s :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.8)} + \frac{1}{(0.75+0.8)} + \frac{1}{2(0.75)} + \frac{1}{3(0.75)} + \frac{1}{4(0.75)} + \frac{1}{5(0.75)} \right]$$

$$K_s = 0.2789$$

La tensión de paso de la red es:

$$E_{\text{PASO}} = (0.2789)(1.51)(12.0) \frac{43299}{880} = 274.3 \text{ Volts}$$

$$E_{\text{PASO}} = 274.3 \text{ Volts}$$

CAPITULO 5

DETERMINACION DEL NUMERO DE VARILLAS.

De la figura (1.24), se puede determinar el numero de varillas en base a la área de la red de tierras en pies cuadrados:

$$A = (350)(10.26) = 3766 \text{ pies cuadrados}$$

Entonces se tiene que se requieren 20 varillas de 3 mt de longitud y de 19 mm de diámetro.

CALCULO DE TENSIONES TOLERABLES.

Potencial de paso tolerable: de la ecuación (1.4), Capítulo No. 1 tenemos que:

$$E_{\text{PABO.T}} = \frac{165 + 1500}{\sqrt{0.5}} = 2354 \text{ V}$$

$$E_{\text{PABO.T}} = 2354 \text{ V}$$

Potencial de contacto tolerable: de la ecuación (1.6), del Capítulo No. 1 tenemos:

$$E_{\text{CONT.T}} = \frac{116 + (0.25)(1000)}{\sqrt{0.5}} = 694.34 \text{ V}$$

$$E_{\text{CONT.T}} = 694.34 \text{ V}$$

Comprobando las condiciones de seguridad se tiene:

Que el potencial de paso en la red debe ser menor o igual al potencial de paso tolerable:

EJEMPLO DE APLICACION

$$E_{\text{PABO RED}} \leq E_{\text{PABO TOLERABLE}}$$

$$274.9 \text{ V} \leq 2384 \text{ V}$$

Que el potencial de red debe ser menor que el potencial de contacto tolerable:

$$E_{\text{RED}} \leq E_{\text{CONTACTO TOLERABLE}}$$

O lo que es lo mismo:

$$\frac{K_m K_{lit}}{L} - 0.25 \leq 116$$

$$\frac{(0.7506)(1.51)(43250)(\sqrt{0.5})}{850} - 0.25(1500) \leq 116$$

$$147 \leq 116$$

Este resultado no satisface la condición anterior por lo que se procede a considerar la longitud de las varillas a tierra, siendo 20 electrodos a usar con una longitud total de 60 m, se incrementa la longitud de la red a 920 m, con esta distancia se calcula para la segunda condición :

$$\frac{(0.7506)(1.51)(12.8)(43259)(\sqrt{0.5})}{910} - 0.25(1500) \leq 116$$

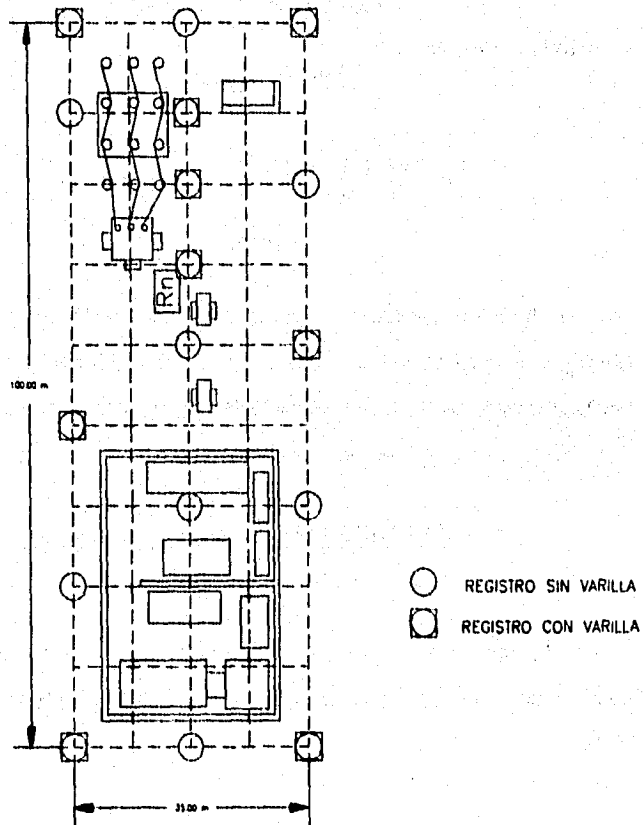
$$112.65 \leq 116$$

Con el incremento de la longitud se satisface esta segunda condición y se concluye que la red es segura, la red resultante queda definida por la figura No. (5.3).

CAPITULO 5

FIGURA 5.3

EL DISEÑO FINAL QUEDARIA DE LA SIGUENTE MANERA.



CONCLUSIONES

"CONCLUSIONES"

CONCLUSIONES.

El propósito de este trabajo es el de exponer en forma sencilla, la información básica para desarrollar un buen proyecto, diseño, construcción y mantenimiento de un sistema de tierra, sin la necesidad de profundizar.

Se ha visto que el tema de SISTEMAS DE TIERRA, se presenta a la vez de complejo, muy simple. Complejo a nivel teórico, ya que el suelo es un material en tres dimensiones, heterogéneo por naturaleza. Pero además de complejo, también cautivador, dado los desarrollos matemáticos que se pueden alcanzar. Pero es simple, desde el punto práctico, puesto que los valores de resistividad del suelo son conocidos y establecidos.

La descripción básica de la problemática de los sistemas de conexión a tierra presentada, permitirá comprender mejor los conceptos involucrados en el diseño, el análisis y la medición de sistemas de puesta a tierra de mediana y baja tensión. Los rangos de corriente tolerable y segura en el cuerpo humano, conociendo sus efectos y peligrosidad a su paso por partes vitales. Dichas magnitudes de corriente dependen de muchos factores, algunos de los cuales no se pueden controlar en el cuerpo mismo, pero si se sigue un diseño adecuado de puesta a tierra el riesgo de una corriente letal por el cuerpo será anulado.

Los límites de seguridad en las diferencias de potencial que se presentan en un sistema de puesta a tierra, entre distintos puntos con los que puede hacer contacto el cuerpo humano, dependen de:

CONCLUSIONES

- Cálculo de las tensiones de contacto y de paso seguras (menores a las máximas de no-fibrilación para un determinado caso).
- En caso de ser necesario para obtener lo arriba señalado el incrementar la resistencia superficial a través de delgadas capas de roca triturada, asfalto, piedra caliza, etc.

La resistividad del terreno depende de muchos factores que la hacen tener un valor alto ó pequeño en forma variable, por lo que para el diseño de un sistema de tierras es importante conocer su valor con precisión, y esto solo se logra midiéndola.

Dada la naturaleza del empleo de sistemas y conexiones a tierra; de seguridad y protección. Es bien importante, que las condiciones de cálculo y prácticas realizadas estén acordes, inclusive tratando de mejorarlas en el momento de su instalación.

Hemos visto en el transcurso del desarrollo de este trabajo que se puede presentar cierta confusión al referirse a la puesta a tierra del sistema eléctrico y a la puesta a tierra de equipo industrial. Por lo que es conveniente definirlos de la siguiente manera:

- Puesta a tierra del equipo industrial - es la conexión a tierra del equipo eléctrico o no eléctrico mediante una o más de sus partes metálicas que normalmente no conducen corrientes eléctricas.

CONCLUSIONES

- Puesta a tierra del sistema eléctrico - es la conexión a tierra del neutro o parte conductora de corriente.

Como recomendación se considera se deben hacer mediciones de resistencia a tierra periódicamente en las diferentes épocas del año y tomar las mediciones necesarias para que dicha resistencia sea menor de 25 ohms.

El sistema de tierra tiene la responsabilidad de brindar una seguridad completa a personas, animales, muebles e inmuebles evitándoles el peligro de tener contacto directo o indirecto con potenciales altos y puesto que el 25 % de los incendios industriales son originados principalmente por ausencia o sistemas de tierra defectuosos, es importante considerar esta protección.

En el caso de la puesta a tierra de sistemas eléctricos se ha podido ver que el alto desarrollo tecnológico ha tomado cartas en el asunto, a favor de la conexión del neutro a tierra, ya sea sólidamente aterrizado o bien a través de un resistor, reactancia o bien un transformador. Se ha comprobado por ejemplo que un sistema eléctrico a través de una alta resistencia tiene todas las ventajas que un neutro flotante, sin presentar las desventajas de este último.

De acuerdo al punto anterior se puede concluir que las tendencias para puesta a tierra del neutro del sistema son:

- Para sistemas de 600 volts y menores; sólidamente.
- Para sistemas de 601 volts a 15 kilovolts; a través de resistencia o reactancia.

CONCLUSIONES

- Para sistemas mayores de 15 Kilovolts; a través de reactancia o bien sólidamente.

La protección, indicación, detección y eliminación de la ocurrencia de una falla a tierra es el complemento esencial de la puesta a tierra de un sistema eléctrico y debe brindar selectividad, rapidez seguridad y precisión para eliminar al sistema o parte de él, donde haya ocurrido la falla.

La exposición a descargas atmosféricas -rayo- es también parte de la protección de personas, equipos, materiales, etc., por lo que se debe tener bastante cuidado al seleccionar la forma de protección adecuada con apartarrayos, pararrayos, telepararrayos y la red de tierras.

En el caso de procesos en donde se generen cargas estáticas deberán tenerse cuidado de seleccionar la mejor manera de eliminarlas, considerando la ventaja o desventaja que tendría el uso de una conexión a tierra.

Por otro lado, la instrucción, asimilación y ejecución de buenas prácticas de seguridad industrial, canalizarán una considerable reducción de los peligros que puedan surgir como resultado de una falla.

**APENDICE
Y
GLOSARIO.**

"APENDICE Y GLOSARIO"

VOLTAJES, CORRIENTES, IMPEDANCIAS Y REDES DE SECUENCIAS.

Todo sistema eléctrico es comúnmente representado por un Diagrama Unifilar, el cual se encuentra constituido por elementos activos y elementos pasivos. Ahora bien, cuando se presenta una falla en el sistema, como puede ser que dos puntos (nodos) se conecten en corto circuito, es necesario, determinar los valores de voltaje, corriente e impedancia para determinar la protección adecuada y dar al sistema los elementos necesarios para que pueda soportar en un tiempo determinado la presencia de la falla.

Los teoremas de Thevenin y Norton simplifican en gran medida el cálculo de los parámetros voltajes, corriente e impedancia.

El teorema de Thevenin dice textualmente:

Para un par de terminales, una red activa lineal se puede sustituir por una fuente generadora de voltaje y una impedancia en serie con dicha fuente.

Y el teorema de Norton menciona:

Para un par de terminales, una red activa lineal se puede sustituir por una fuente generadora de corriente y una impedancia en paralelo.

Asociando los teoremas anteriores, al diagrama unifilar, los elementos activos y pasivos, quedando sustituidos por sus impedancias correspondientes y procediendo a tomar una referencia, que generalmente es tierra, se reduce el sistema a un equivalente de Thevenin mediante aritmética simple, transformación serie-paralelo y estrella delta.

La información disponible respecto a los parámetros del sistema o red equivalente vienen dados en dimensiones distintas, puede ser ohms, en por ciento, en por unidad, inclusive los voltajes de operación son distintos. Es entonces evidente la necesidad de hacer homogénea toda la información disponible. Se puede manejar

en valores de por ciento, entonces deberá considerarse que al producto de dos cantidades se dividirá entre 100 y al cociente de dos cantidades se deberá multiplicar por 100. Si la decisión de análisis es en ohms, será necesario conservar a lo largo del procedimiento un multiplicador igual a la relación de vueltas al cuadrado $(n1/n2)^2$. El método en por unidad ofrece definitivamente más ventajas, por que los datos pueden ser aplicados directamente, además con este método se puede realizar un estudio de flujo de potencia y estabilidad del sistema eléctrico.

Como datos, para el análisis en por unidad, se tienen las potencias, voltajes, corrientes e impedancias diferentes, por lo que se hace necesario unificar todos los valores tomando una base o referencia de estos parámetros. Usualmente solo una de estas cantidades se escoge con entera libertad; la potencia base, el resto de las referencias es obligada; la tensión base es nominal de operación. Entonces tratándose de sistemas trifásicos:

Se escoge : KVA base

Se escoge: KV base

Se determina: $I_{base} = \frac{KVA_{base}}{\sqrt{3}KV_{base}}$

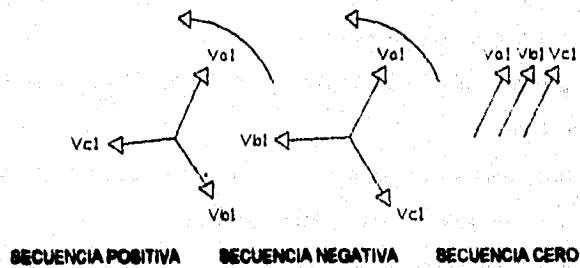
$$Z_{base} = \frac{KV_{base}^2}{MVA_{base}}$$

Como confirmación final, se dice que existe una potencia base única y tantos voltajes base, como etapas de transformación se tengan en el sistema.

El circuito equivalente de un dispositivo eléctrico, dependiendo de sus conexiones es diferente, cuando se intercala en una red de secuencia cero. Es por lo tanto,

oportuno mencionar los conceptos de componentes simétricas. Sin pretender alcanzar el desarrollo matemático que ellas involucran.

El método de las componentes simétricas es una forma de análisis de los circuitos eléctricos y consiste en la descomposición de las magnitudes vectoriales desbalanceadas a magnitudes balanceadas. Una red se puede dividir en red de secuencia positiva, otra de secuencia negativa y una más de secuencia cero. Las componentes de secuencia positiva (marcadas con subíndice 1), son tres vectores de igual magnitud y dirección angular de 120 entre ellos, con secuencia normal (ABC). Las componentes de secuencia negativa (marcadas con subíndice 2), son tres vectores de igual magnitud y separación angular de 120 entre ellos, con secuencia inversa (ACB). Las componentes de secuencia cero (marcadas con subíndice 0), son tres vectores de igual magnitud y de la misma dirección.



El resultado del análisis matemático de las componentes simétricas expone las siguientes expresiones:

$$V_{a0} = 1/3 (V_a + V_b + V_c)$$

$$V_a = 1/3 (V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_b = 1/3 (V_a + a^2V_b + aV_c)$$

$$I_{a0} = 1/3(I_a + I_b + I_c)$$

$$I_a = 1/3(I_a + aI_b + a^2I_c)$$

$$I_b = 1/3(I_a + a^2I_b + aI_c)$$

Con las expresiones de las ecuaciones anteriores se esta en posibilidad de:

- Calcular las cantidades de fase conocidas las componentes simétricas.
- Calcular las componentes simétricas en función de las cantidades de fase.

Para los valores de impedancias y para facilitar el cálculo se han tenido algunas convenciones; en los generadores las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero son diferentes y son proporcionadas por el fabricante, es el mismo caso para los motores síncronos. Para el caso de motores del tipo de inducción se conoce prácticamente el valor de la impedancia positiva, en el caso de la impedancia de secuencia cero igual a un medio de la impedancia de secuencia positiva. Para el caso de transformadores y líneas de transmisión, distribución, etc., las tres impedancias se consideran iguales.

Además es necesario considerar las siguientes reglas que limitan el empleo de las componentes simétricas:

- Voltajes de secuencia positiva, negativa o cero inducen únicamente corrientes de secuencia positiva, negativa o cero respectivamente.
- Corrientes de una determinada secuencia generan voltajes de esa misma secuencia.
- Los puntos anteriores se resumen diciendo que no existe interacción entre secuencias distintas.
- Los elementos activos de la red, solo generarán voltajes de secuencia positiva. Lo anterior es obvio, para que una máquina genere tensiones de secuencia negativa tendrá que girar en sentido contrario. Sería así mismo imposible que

APENDICE

V_a , V_b , V_c fueran iguales en magnitud y estuvieran en fase, características de las cantidades de secuencia cero.

- Los voltajes de secuencia negativa y cero se consideran generados en el punto de la falla; disminuyen en magnitud tan pronto se alejan del punto de falla.
- El voltaje de secuencia positiva en el punto de la falla es cero, y máximo en los puntos de generación.
- Como las corrientes de secuencia cero, están en fase y son de la misma magnitud, necesitan del neutro en conexión a tierra para poder circular.

Para la formación de la red de secuencia positiva se hará con una fuente de voltaje en serie con la impedancia de secuencia resultante de aplicar el teorema de Thevenin. La red de secuencia negativa, se construye de la misma manera que la red de secuencia positiva, pero sin fuente de voltaje. En el caso de secuencia cero también se carece de fuente de voltaje y su estructura dependerá de la conexión a tierra que se tenga en los diferentes elementos de la red. Las tablas mostradas a continuación indicarán las diferentes formas de los circuitos equivalentes de secuencia cero, para generadores y transformadores respectivamente.

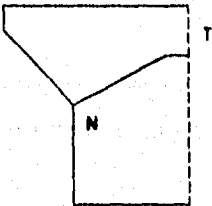
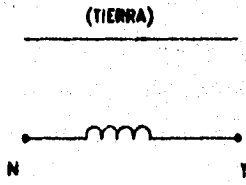
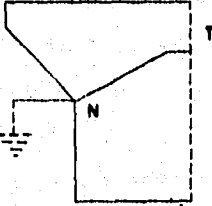
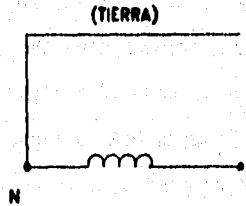
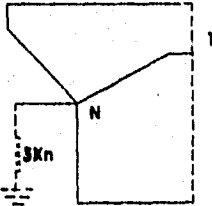
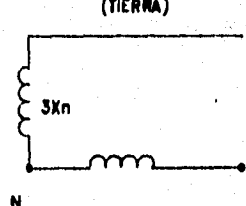
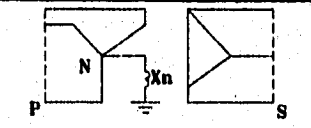
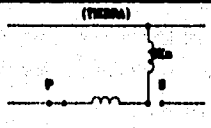
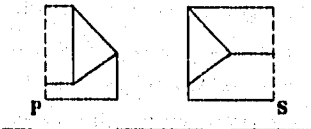

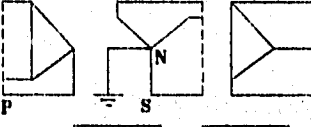

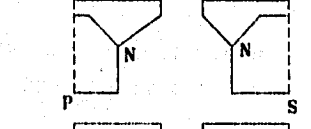
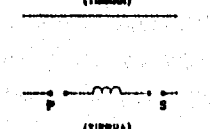
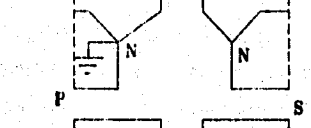
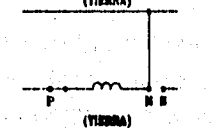
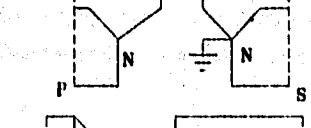
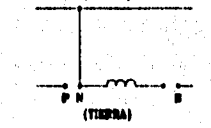

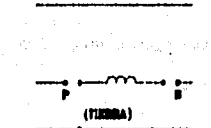
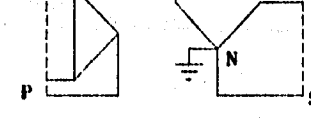
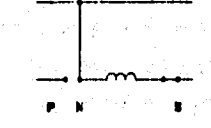
TABLA PARA SIMPLIFICAR LA SECUENCIA CERO DE LA CONEXION A TIERRA DE GENERADORES	
CONEXION DEL NEUTRO A TIERRA	DIAGRAMA DE SECUENCIA CERO
 <p>NEUTRO AISLADO</p>	
 <p>NEUTRO EFECTIVAMENTE CONECTADO A TIERRA</p>	
 <p>NEUTRO CONECTADO A TIERRA A TRAVES DE REACTANCIA O RESISTENCIA</p>	

TABLA PARA SIMPLIFICAR LA SECUENCIA CERO DE LA CONEXION A TIERRA DE TRANSFORMADORES	
CONEXION DEL NEUTRO A TIERRA	DIAGRAMA DE SECUENCIA CERO
	
	
	
	
	
	
	
	

INDUSTRIAS JORDAN S.A.

ANION.

Ion con carga negativa. Ion que durante la electrólisis es atraído por el ánodo.

ANODO.

Es el electrodo (dispersor) de una celda galvánica ó voltaica, donde la corriente eléctrica positiva fluye desde el electrodo a la solución.

ANODO DE SACRIFICIO.

Es una masa de metal (comúnmente de magnesio, zinc ó aluminio) enterrada y conectada a una estructura metálica, la cual es resguardada de los efectos de la corrosión por la formación de una célula entre esta y el ánodo de sacrificio; la cual tiene el efecto de hacer la estructura más negativa con respecto del medio que la rodea, y evitando así su corrosión.

ATERRIZAR.

Conexión intencional a la tierra ó algún conductor extendido que supla a éste.

BARRA O COLECTOR DE TIERRAS.

Es una barra o conductor al que se conectan los conductores de tierra de varias partes de equipos, y que a su vez está conectado a la malla de tierras en uno ó más puntos.

BENTONITA.

Es una arcilla natural que contiene una gran cantidad de compuestos minerales los cuales fueron formados por la acción volcánica de años atrás; es anticorrosiva, estable y tiene una resistividad de 2.5 ohms-metro en 300% de humedad. La baja resistividad resulta principalmente de un proceso electrolítico entre agua, Na₂O (Soda), K₂O (Potasio), CaO (Cal), MgO (Magnesia) y otras sales minerales las cuales ionizadas forman un electrolítico duro con PH de 8 a 10.

CATION.

Es un ion cargado positivamente, el cual migra hacia el cátodo bajo la influencia de un gradiente de potencial.

CATODO.

Es el electrodo ó porción de un electrodo, en el cual una reacción reductora ocurre resultado de su tendencia a compensarse.

CELDA O CELULA ELECTROLITICA.

Celda en la cual se producen reacciones electroquímicas por la aplicación de energía eléctrica, ó que suministra energía eléctrica por efecto de reacciones electroquímicas, en el primer caso recibe el nombre de celda de electrólisis y en el segundo el de celda galvánica.

CONDUCTORES DE CONTROL DE GRADIENTES DE POTENCIAL.

Son los conductores instalados en el área inmediatamente cercana de una estructura ó equipo en la superficie de la tierra ó apenas abajo de ella, que este conectado tanto a la malla ó red de tierras como al metal sobre la superficie. Se usa para reducir al mínimo las diferencias de potencial entre las estructuras, equipo y tierra circundante, también para reducir al mínimo los gradientes de potencial sobre la superficie de la tierra circundante.

CONDUCTOR DEL ELECTRODO DE TIERRA.

Es el conductor usado para conectar el dispensador de puesta a tierra a el conductor de puesta a tierra del equipo y/ó al conducto puesto a tierra (neutro) del circuito del equipo de servicio, ó en la fuente de un sistema derivado separado.

CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA (O DE FALLA A TIERRA).

Conductor que en condiciones normales no conduce corriente, y que sirve para unir a tierra partes metálicas expuestas al contacto del personal en máquinas ó equipos. La puesta a tierra tiene el fin de evitar los peligros de sacudidas eléctricas ó electrocución que existirían en el caso de falla de aislamiento, entre los conductores vivos y dichas partes metálicas (se le llama también conductor de conexión a tierra).

CONDUCTOR PUESTO A TIERRA (CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO).

Conecta el neutro de un transformador, la terminal de tierra de un apartarrayos, el neutro de capacitores, de interruptores de tierras, etc., a la malla de tierra.

CORRIENTE A TIERRA.

Es la corriente que se inyecta a la tierra, ya sea en el conductor de puesta a tierra ó en la malla de tierra.

CORRIENTE DE FALLA A TIERRA.

Es el valor máximo de la corriente que fluye en el corto circuito durante una falla de línea a tierra.

CORRIENTES PERDIDAS.

Son corrientes que fluyen en el suelo y provienen de instalaciones eléctricas, partes de las cuales no son alejadas del suelo.

CORRIENTE RESIDUAL.

Es la suma vectorial de las corrientes, exclusivamente en los conductores de fase. Vale normalmente $3I_0$, donde I_0 es la corriente de secuencia cero.

CORRIENTE DE SECUENCIA CERO.

Es aquella porción de las corrientes trifásicas desbalanceadas que pueden representarse matemáticamente, con un conjunto de vectores balanceados que están en fase. Las corrientes de secuencia cero pueden circular del neutro a tierra en alguna carga conectada en estrella, ó en bancos de transformadores. Se designa por I_0 .

CORROSION ELECTROQUIMICA. Es la corrosión de un metal causada por el flujo de la corriente entre un ánodo y un cátodo, ubicados dentro de un electrólito, como el suelo ó el agua.

DISPERSORES ARTIFICIALES.

Son aquellos que son contruidos especialmente para la puesta a tierra; están intencionados solamente para el propósito de hacer una conexión a tierra, y son instalados entorno ó tan cerca como sea practicable su localización.

DISPERSORES DE CIMENTO.

Es un conductor el cual está embebido en concreto y cuyo contacto con tierra es sobre una gran área.

DISPERSOR DE CONTROL.

Es un dispersor que por cuya forma y arreglo sirve más para el control de potencial, que para el mantenimiento de una definida resistencia de disipación.

DISPERSOR NATURAL.

Es un elemento metálico el cual está conectado a la tierra, ó con agua ó está conectado vía concreto; cuyo propósito original no es la conexión a tierra, pero que actúa como dispersor pudiendo ser: tuberías, pilotes de concreto, partes de acero de un edificio, estructura, etc.

DISPERSOR DE TIERRA.

GLOSARIO

Es un conductor enterrado en el suelo y que tiene conexión eléctrica con él, ó es un conductor el cual esta enterrado en concreto y tiene contacto con el suelo sobre una gran área; el cual tiene por objeto mantener al potencial de tierra los conductores a el conectados, así como drenar a tierra las corrientes que eventualmente circulan por aquellos.

ELECTRODO DE TIERRA.

(Ver dispersores).

ELECTROLITO.

Líquido ó medio acuoso (ácidos, bases ó sales disueltas en agua) que pueden ser descompuestos por el paso de una corriente.

ELECTROLISIS.

Descomposición química de compuestos líquidos al pasar por ellos una corriente continua. La electrólisis se funda en la propiedad que tienen ciertos cuerpos llamados electrólitos, que es la de descomponerse cuando los atraviesa una corriente eléctrica, como resultado de la división de la molécula del electrólito en dos partes diferentes electrizadas: el catión que se acumula en la superficie del cátodo, y el anión que aparece en el ánodo.

IMPEDANCIA A TIERRA (Z).

Es la resistencia en corriente alterna entre un sistema de tierras y una tierra de referencia.

LUGAR DE CONDICIONES CORROSIVAS.

Se incluyen en ésta designación los lugares húmedos ó mojados; lugares situados en zonas costeras (hasta aproximadamente 5 Km. tierra adentro); los lugares donde existen gases, vapores ó polvos de productos químicos, ácidos ó alcalinos y lugares similares.

MALLA DE TIERRA.

Porción metálica subterránea es un sistema estirizado que dirige hacia la tierra todo flujo de corriente. La red se compone en general de varias mallas interconectadas por la unión de conductores longitudinales con conductores transversales.

PARTES NO CONDUCTORAS EXPUESTAS.

Partes metálicas externas de un equipo, que generalmente sirven para protegerlo o reforzarlo mecánicamente y que, por su situación, pueden ser tocadas por las personas.

PARTES VIVAS O ENERGIZADAS.

Son aquellas que se encuentran conectadas a una fuente de potencial eléctrico o cargadas de electricidad en tal forma que tienen un potencial diferente al de tierra.

PISO DE TIERRA.

Es la expresión para la tierra en su calidad de designación de lugar.

POTENCIAL DE MALLA.

Es el valor peor posible de un potencial de toque a ser encontrado dentro de una malla de una red de tierras, y es aquel que existirá sobre la superficie del suelo en el centro ó en el contorno de la malla.

POTENCIAL DE PASO.

Es el potencial máximo que se aplicará a una persona entre sus pies, cuando en el instante de una falla se encuentre caminando en el área o inmediatamente fuera de la red, prácticamente, el potencial de paso es aquel que existe entre dos puntos separados 1.0 mt. sobre la superficie del suelo; en general éste valor es más crítico en los límites del área que cubre la red.

POTENCIAL DE TIERRA.

Es el potencial de referencia que la tierra mantiene en ausencia de influencias eléctricas externas.

POTENCIAL DE TRANSFERENCIA.

Son aquellos que se presentan en sitios alejados de una malla donde ocurre una falla; y es el caso de un potencial de toque en una área remota donde el potencial de choque puede ser aproximadamente ó igual a la elevación total del potencial de tierra de un dipensor enterrado. Usualmente estos potenciales se deben a la presencia de estructuras enterradas en la cercanía de una red de tierras como tuberías, cercos metálicas, rieles de ferrocarril, etc., ó bien a neutros e hilos de comunicación que salen de una instalación cualquiera.

POTENCIAL DE TOQUE.

Es el potencial máximo que se experimentará una persona que se encuentre de pie dentro del área en que se extiende la red de tierras y que durante la ocurrencia de una falla este tocando con una o ambas manos una estructura ó cualquier elemento conductor directamente unido a la red de tierras. Desde del punto de vista práctico, el

potencial de toque queda establecido por la diferencia máxima de potencial de toque queda establecido por la diferencia máxima de potencial que existe en condiciones de falla entre la red de tierras y un punto cualquiera sobre la superficie del suelo.

PROTECCION CATODICA.

Es la reducción o prevención de la corrosión de un metal dentro de un medio conductor de la acción de corrientes eléctricas galvánicas ó directas.

PUENTE DE UNION.

Es cualquier barra o conductor aislado de corta longitud usado para proveer una conexión eléctrica entre partes en un sistema, tales como el gabinete de un tablero metálico y tuberías metálicas que parten del tablero principal de la entrada del servicio.

RED DE TIERRAS.

(Ver malla de tierras).

RELLENO.

En protección catódica, especiales rellenos son utilizados para llenar los registros de los dispersores (ánodos). Estos rellenos son seleccionados para reducir la resistencia a tierra del dispersor. Pudiendo ser bentonita y yeso y su mezcla así como carbón vegetal; entre los más conocidos.

RESISTENCIA A TIERRA.

Resistencia de tierra. resistencia entre un conductor puesto a tierra y la masa de tierra. - Para dispersores artificiales el valor de la resistencia a tierra no debe ser superior a 25 ohms-. Cuando no se pueda lograr ésta resistencia con un solo electrodo deben emplearse dos o más electrodos conectados en paralelo.

RESISTENCIA DE MALLA DE TIERRAS.

Es la resistencia óhmica entre la malla de tierras y un dispersor de tierras remoto de resistencia cero. En ocasiones puede considerarse como la resistencia de contacto de la malla de una tierra de resistencia cero.

RESISTIVIDAD DE LA TIERRA (ρ).

Es la resistividad eléctrica de la tierra y se expresa en ohms-m²/m=ohms*m y se representa la resistencia de un cubo de tierra de 1.0 m de lado.

SISTEMA DE TIERRAS.

Es la red completa, tanto arriba como abajo, de la superficie de la tierra que proporciona un aterrizaje en una subestación e incluye un conductor a tierra, una malla ó red de tierras y la tierra que rodea al conductor ó a los conductores.

SUELO.

Es la expresión para la tierra en su calidad de material; por ejemplo: humus, arcilla, arena, grava, roca, etc.

TENSION A TIERRA.

Para circuitos puestos a tierra es la tensión que existe entre un conductor dado y el punto ó conductor del circuito no aterrizados es la tensión más grande encontrada entre un conductor dado y cualquier otro conductor del circuito.

TIERRA.

Es la designación para el suelo y para el piso de tierra. Es la masa conductiva de la tierra ó de cualquier otro conductor en directa conexión eléctrica con la tierra. La tierra considerada como un conductor de grandes dimensiones que sirven de conductor de retorno de muchos sistemas eléctricos.

Cualquier cuerpo metálico utilizado como conductor de retorno de uno ó varios circuitos.

TIERRA DE REFERENCIA (Tierra Neutral).

En el área de la tierra en particular de la superficie, el cual es un punto lejano del rango de influencia de un dispersor de tierra ó sistema de tierras sin apreciable diferencia de potencial debida a la corriente a tierra ocurrida entre cualquiera de los dos puntos de ésta área.

TRAYECTORIA EFECTIVA DE PUESTA A TIERRA.

Es aquella trayectoria de circuitos, equipos y conductores aislados al cual es permanente, continuo con capacidad suficiente para conducir con seguridad cualquier probable corriente de falla y aquella que tiene suficientemente baja impedancia para limitar la tensión a tierra y facilitar la operación de los dispositivos de protección del circuito.

UNION.

Esta definición cubre un concepto general para aquellas partes metálicas que son conductivamente conectadas por un cable, alambre, perno, tornillo o alguna otra conexión metálica de insignificante impedancia.

BIBLIOGRAFIA.

"BIBLIOGRAFIA"

BIBLIOGRAFIA.

LIBROS:

1. **THE IEEE GREEN BOOK (IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Power Systems). EDITION 1993.**
Autor: Power System Technologies Committee of the IEEE Industry Applications Society.
IEEE Std. 142 (Revision of ANS/IEEE Std. 142-1972).
2. **AMERICAN ELECTRICIANS HANDBOOK (Tenth Edition, McGraw Hill Book Company) 1991.**
Autor: Terrell Croft, Clifford C. Carr, John H. Watt and Wilford Y. Summers.
3. **CALCULO DE REDES DE TIERRA (Compañía de Luz y Fuerza del Centro) Mayo 1988.**
Autor: Ing. J.V. Schmill.
4. **INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA (Serie el instalador Calificado, mercombo Bolexareu Editores). 1989.**
5. **NATIONAL ELECTRICAL CODE 1987 (ANS/NFPA 70 an American National Standard).**
Autor: National Fire Protection Association.

BIBLIOGRAFIA.

- 6. NATIONAL ELECTRICAL CODE HANDBOOK (19 th Edition Based on the current 1987 National Electrical Code, McWraill-Hill Book Company).**
- 7. PRACTICAL ELECTRICAL CALCULATIONS (Based on the 1987 NEC, Editors of Electrical Construction and Maintenance.
Autor: Vittorio Re.**
- 8. INSTALACIONES ELECTRICAS TOMO 1 Y 2 (MANUAL SIEMENS DOSSAT, S.A. 1981).
Autor: Albert F. Spitta.**
- 9. MANUAL DE DISEÑO DE REDES DE TIERRA PARA SUBESTACIONES ELECTRICAS DE POTENCIA. (Instituto de Investigaciones Electricas Diciembre de 1980).
Autor: R Velazquez S., H. Sarmiento U., J.V. Schmill, R. Valdivia H.**
- 10. GETTING EARTH TESTER (Null Balance, Instruction Manual 25-J-3b).
Autor: Bidle Instruments.**
- 11. EARTH RESISTENCES (London, George Newnes Limited).
Autor: G.F. Tagg.**
- 12. NATIONAL ELECTRICAL SAFETY CODE (Edition 1977 ANSI C2)
Autor: Standars Departament IEEE.**

13. NORMAS TECNICAS PARA INSTALACIONES ELECTRICAS (Parte Y, Instalaciones para el uso de energia eléctrica. Edición 1995).

Autor: SEPAFIN (D.G.N.)

14. GROUNDING ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS FOR SAFETY (Marsh Publishing Company, Inc.).

Autor: Eustace C. Soares P.E.

15. GENERAL FUNDAMENTAL OF ELECTRICAL GROUNDING TECHNIQUE.

Autor: Pierre Laurent.

REVISTAS ESPECIALIZADAS:

1. ALL- STEEL NETWORK GROUNDS SUBSTATION (May 2 1995 pp 59-61)

Autor: Stephen J. Schwarz.

2. STEEL GROUND GRIDS WORKSWELL (May 1995, pp63-65)

Autor: W.F. Dunkle.

3. GROUNDING IN CORROSIVE AREAS (May 1983 pp.65-67)

Autor: Donald H. McIntosh.

BIBLIOGRAFIA.

4. DETECCION SOBRE EL MANUAL DE DISEÑO DE REDES DE TIERRA PARA SUBESTACIONES ELECTRICAS DE POTENCIA (Abril 1981 pp. 126-127).
5. DISEÑO DE SISTEMAS DE CONEXION A TIERRA EN SUBESTACIONES (Septiembre 1986, pp. 165-169).
Autor: Raúl Velázquez.
6. OBJETIVO DE UN ESTUDIO DE COORDINACION DE PROTECCIONES. (Noviembre de 1981. Vol 5, Núm. 11)
Autor: Jesus Rubén Ramírez G.
7. LET'S LOOK TO STATION GROUNDING (MAY 2, 1955, pp 55-58)
Autor: Stephen J. Schwarz.
8. ALL STEEL NETWORK GROUNDS SUBSTATION (May 2, 1955, pp: 59-61)
Autor: Glen Appleman and S.J. Litides
9. A METHOD TO CALCULATE ELECTRODE RESISTANCE (May 2, 1955. pp. 63-65)
Autor: W.F. Duntis.
10. CHARTS DETERMINE SUBSTATION GROUNDS (January 15, 1979, pp. 58-59. Transmission/Distribution).
Autor: H. Wayne Besty.

11.DETECCION Y DESENERGIZACION DE FALLAS DE ALTA IMPEDANCIA

(Marzo/Abril - 1983 pp 56-62).

Autor: Victor Carrillo.

**12.COMENTARIOS SOBRE EL MANUAL DE DISEÑO DE REDES DE TIERRA
PARA SUBESTACIONES ELECTRICAS DE POTENCIA (Abril 1981 pp. 126-**

127).

Autor: Héctor G. Sarmiento.

13.OBJETIVOS DE UN ESTUDIO DE COORDINACION DE PROTECCIONES.

(Noviembre de 1981. Vol 5, No. 4).

Autor: Jesús Rubén Ramírez Guzmán.

14.EFFECTS OF ELECTRIC CURRENT ON MAN (Vol 60, February 1941 pp. 63-

66)

Autor: Charles F. Dalziel F. Dalziel and B. Legen.

15.PERCEPTION OF ELECTRIC CURRENTS (Vol. 69, september, 1950 pp. 794-

800).

Autor: C.f. Dalziel and T.H. Mansfield.

BIBLIOGRAFIA

NORMAS:

1. A.I.E.E. (AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS) Norma No. 61 Recommended guide for measuring ground resistance and potential gradients in the earth.
(AIEE No.61 MAY 1962).

Norma anal/ese guide for safety in alternating-currents substation grounding)

2. IEEE (No. 60 approved March 21 1965)

Autor: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

3. NORMA VDE 0100 de proteccion Electrica.

(editorial Marcombo 1978)

4. NORMA PEMEX 3.348.02 INSTALACION DE SISTEMAS DE CONEXION A TIERRA. (ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIONES DE OBRAS, Edición :2da 1981 pp.1-25

Autor : PETROLEOS MEXICANOS.ELECTRICAL CODE 1987 (ANSI/NFPA 70 en American