



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRA EN
UNA SUBESTACION

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECANICO-ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

ATAHUALPA CARBAJAL MAYORGA

ASESOR: ING. ELEAZAR MARGARITO PINEDA DIAZ



FES Aragón

MÉXICO

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Facultad de Estudios Superiores Aragón

DIRECCIÓN

ATAHUALPA CARBAJAL MAYORGA

Presente

Con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Facultad, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobado su tema de tesis y asesor.

TÍTULO: "DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRA EN UNA SUBESTACIÓN"

ASESOR: Ing. ELEAZAR MARGARITO PINEDA DÍAZ

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Nezahualcóyotl, Estado de México a 23 de septiembre de 2011

EL DIRECTOR

M. en I. GILBERTO GARCÍA SANTAMARÍA GONZÁLEZ



C p Secretaría Académica
C p Jefatura de Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica
C p Asesor de Tesis

GGSG/JGPO/vr



DEDICATORIAS

- a dios y a virgen de Guadalupe por darme vida, salud y una familia maravillosa. Gracias
- a mi padre Oscar, que es el mejor padre del mundo, que guía mi camino día tras día, que admiro mucho y que es un gran tipo, por darme el apoyo, tener la paciencia, la confianza, y tener fe en mi para realizar mi tesis, además de su valiosa ayuda, este logro es para ti. Te quiero mucho papa. Gracias
- A mi madre María, que la quiero mucho, por todas sus atenciones, por educarme, por estar a mi lado y por su amor.
- A mi esposa Claudia, porque la amo y siempre a estado a mi lado en momentos difíciles, por su apoyo, por su confianza, por su paciencia, por su amor, por su comprensión, por todo lo lindo que comparte conmigo.
- A mi hijo Owen, por que es lo más hermoso que tengo, porque es mi felicidad, porque es mi motivación y espero que algún día pueda superarme. Te amo hijo
- A todos mis sobrinos que los quiero mucho, espero que esta tesis sirva de ejemplo, para que algún día puedan superarse
- A mi hermano Gus, además de mi amigo, que lo estimo mucho, y que en las buenas y en las malas a estado conmigo, por su amistad y consejos, además de su apoyo, por entenderme y ayudarme. Gracias
- A mi tío Sergio, que fue parte de este proyecto, por confiar en mi, por su tiempo y por el esfuerzo que a echo para ayudarme muchas veces, le agradezco
- Al ingeniero Eleazar M. Pineda Díaz, mi asesor de tesis, por su dedicación, por su tiempo, su amistad, su confianza y sus enseñanzas como maestro. Gracias

A MI HIJO:

EL JUEGO DE LA VIDA

Toma el balón, hijo mio,
Y te nombro “quarter back” de tu equipo
En el juego de la vida.
Yo soy tu “coach” y te la doy tal como es.
Solo hay un calendario de juegos:
Dura toda la vida y es un solo juego

Es un partido largo,
Sin tiempos fuera ni sustituciones.
Tú juegas el partido entero toda la vida.
Tendrás un gran “backfield”
Y mandara señales;
Pero tus otros tres compañeros
Atrás de la línea tienen gran prestigio,
Se llaman: fe, esperanza y caridad.

Jugaras detrás de una línea
Verdaderamente poderosa.
De un extremo a otro, se hallan:
Honestidad, lealtad, devoción al deber,
Respeto a ti mismo, estudio,
Limpieza y buena conducta.

Los postes del gol
Son las perladas puertas del cielo,
Dios es el réferi y único arbitro.
El hace todas las reglas
De acuerdo con tu propia religión.

Hay también una regla fundamental:
Lo que tú quisieras que otros hicieran por ti,
Hazlotú por ellos

En este juego, si llegas a perder el balón,
Pierdes también el juego.

Aquí esta el balón.
Es tu alma inmortal.
Estréchala contra ti.
Ahora, hijo mio:

¡Sal al campo y veamos que puedes hacer con ella!

Vince Lombardi

CONTENIDO

INTRODUCCION

CAPITULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 Conceptos básicos	1
1.2 Aspectos básicos en el diseño	4
1.3 Consideraciones generales	5
1.4 Condiciones inadecuadas	6
1.5 Sistema de tierra en ampliación de subestaciones	7
1.6 Disposición física de la red de tierra	8
1.7 Modificación del diseño del sistema de tierra	10
1.8 Consideraciones para el crecimiento del sistema eléctrico	11
CAPITULO 2: SISTEMA DE TIERRA	11
2.1 Sistema de tierra	11
2.2 Funciones principales de un sistema de tierra	12
2.3 Componentes básicos de un sistema de tierra	13
2.3.1 CONDUCTORES	13
2.3.2 ELECTRODOS DE TIERRA	18
2.3.3 CONECTORES CON SUS ACCESORIOS	20
2.4 Características de los elementos del sistema de tierra	22
2.5 Sistemas básicos de las redes de tierra	23

CAPITULO 3: ANÁLISIS DE LAS POSIBLES FALLAS QUE SE PUEDEN PRESENTAR	24
3.1 Naturaleza y causas de las fallas	24
3.2 Determinación de la corriente máxima de la red de tierra	25
3.3 Factor de decremento y efecto de la asimetría	27
3.4 Tipos de fallas	30
3.4.1 SOBRECORRIENTES	31
3.4.2 FALLA A TIERRA	31
3.4.3 CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO	33
CAPITULO 4: CARACTERISTICAS Y SELECCIÓN DEL MODELO DEL SUELO	38
4.1 Características generales	39
4.2 Recomendaciones para la medición de la resistividad	40
4.3 Métodos para medición de la resistividad	42
4.3.1 METODO DE LOS CUATRO PUNTOS (WENNER)	43
4.3.2 METODO DE LOS CUATRO PUNTOS (SCHLUMBEGGER-PALMER)	44
4.3.3 METODO DE LOS TRES PUNTOS (CAIDA DE TENCION)	46
4.4 Modelo del suelo	47
4.5 Resistencia total del sistema de tierra	51
4.6 Tratamiento del suelo para bajar la resistividad	58
CAPITULO 5: CORRIENTES Y TENSIONES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO	60
5.1 Efecto de la corriente	60
5.2 Límite y rango de corriente tolerable por el cuerpo humano	61
5.3 Importancia de las componentes de protección	62

5.4 Resistencia del cuerpo humano	63
5.5 Materiales aislantes en la superficie de la subestación	64
5.6 Tensiones tolerables por el cuerpo humano	65
5.6.1 TENSION DE TOQUE	66
5.6.2 TENSION DE PASO	67
5.6.3 TENSION DE TRANSFERENCIA Y GPR	68
5.7 Calculo de los potenciales de malla y de paso	70
5.7.1 TENSION DE MALLA MAXIMA	70
5.7.2 TENSION DE PASO MAXIMA	73
CAPITULO 6: PROCEDIMIENTO DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE TIERRA DE ACUERDO A LA NORMA NRF-011-CFE	75
6.1 Norma NRF-011-CFE	75
6.2 Plano de la subestación y datos de campo	81
6.3 Calculo de la sección transversal del conductor	84
6.4 Cálculo de las tensiones de paso y de contacto	86
6.5 Diseño preliminar de malla	86
6.6 Calculo de la resistencia de tierra	88
6.7 Calculo de la corriente máxima de malla IG	89
6.8 Calculo del potencial de la red de tierra GPR	90
6.9 Calculo de la tensiones de malla y de paso	90
6.10 Comparación de las tensiones de contacto y de malla	92
6.11 Requerimientos	92
6.12 Modificación de diseño	93

6.13 Detalles finales	93
CONCLUSIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	98
DIRECCIONES DE INTERNET	99

INTRODUCCION

la seguridad es un aspecto fundamental en la vida diaria de las personas, y es un factor aun mas importante en las instalaciones eléctricas, debido a que las personas pueden tener contacto directo con la corriente eléctrica y sufrir accidentes que pueden lastimar o incluso, provocar la muerte, para evitar esto es necesario realizar un diseño de un sistema de tierra que brinde en primer lugar seguridad al personal de operación de las instalaciones, así como al publico en general, además de la protección de los equipos y eficiencia del sistema eléctrico.

En el diseño de una central, subestación eléctrica, o instalación eléctrica es necesario definir diversas conexiones a tierra (puesta a tierra) para conectar a la propia red de tierra los neutros, tanques y carcasas de los equipos, los cables de guarda, las estructuras metálicas y todas aquellas partes metálicas que deben estar a potencial de tierra.

La oposición que se presenta a la circulación de la corriente de falla a tierra se llama resistencia de tierra, por lo tanto, el objetivo de una conexión a tierra es facilitar la disipación de la corriente de falla.

La circulación de corrientes de falla a través de las conexiones a tierra, produce a su vez elevaciones de potencial del equipo conectado a tierra y gradientes de potencial sobre la superficie del terreno. Las circunstancias que pueden provocar una descarga eléctrica son las siguientes:

- Una corriente de falla a tierra relativamente alta en relación con el dimensionamiento del sistema de tierra.
- Gradientes de potencial altos en uno o varios puntos de la superficie de la tierra, debidos a la resistividad elevada del terreno, que provoca una inadecuada distribución de la corriente a tierra.
- La presencia de una persona en un determinado lugar que provoque continuidad en dos puntos con alta diferencia de potencial.
- Ausencia de una resistencia de contacto suficiente o de otras resistencias en serie que limiten, a un valor seguro, la corriente a través del cuerpo.
- Tiempo suficiente de duración de la falla y del contacto del cuerpo (flujo de corriente a través de él), tal que cause daño considerando una intensidad de corriente dada.

En los sistemas eléctricos, el método de aterrizamiento puede determinar la magnitud de las sobre tensiones tanto en estado estable como en estado transitorio. Los sistemas no aterrizados están sujetos a sobretensiones muy elevadas que reducen la vida de los equipos, principalmente en los transformadores y máquinas rotatorias.

Por lo general se utiliza el sistema sólidamente aterrizado para limitar las sobretensiones, en 400 y 230 kV. En 23 kV los transformadores se conectan a tierra a través de una reactancia con objeto de abatir la magnitud de la corriente de corto circuito a tierra.

Por lo anterior, se debe diseñar un sistema de tierra adecuado y seguro que ayude a cumplir las funciones descritas. Una resistencia baja del sistema de tierra, no implica ensí una garantía de seguridad. No existe una relación simple entre la resistencia del sistema de tierra en conjunto y el potencial máximo de choque que pueda sufrirse; la peligrosidad disminuye al desarrollar diseños de tierra adecuados, considerando que una subestación de baja resistencia a tierra puede ocasionalmente hacerse peligrosa y, por el contrario, subestaciones con alta resistencia pueden ser seguras.

La corriente de falla a tierra total, provoca elevación en el potencial, y cuando se cuenta con cables con pantalla, neutros aterrizados, barras aisladas en gas SF₆, alimentadores subterráneos, etc., se provee una trayectoria de baja impedancia en paralelo de retorno hacia la fuente, que abate la magnitud de las sobretensiones esperadas.

El efecto de la corriente que entra a la tierra debe analizarse, considerando la localización de los electrodos de tierra, las características del terreno, en general los elementos que conforman la malla de tierra y el tiempo de operación de los dispositivos de protección, para determinar las tensiones peligrosas que se puedan presentar durante las condiciones de falla, debido a que estos gradientes de potencial se producen dentro y alrededor de la subestación. La idea generalizada de que puede tocarse todo objeto conectado a tierra es falsa y resulta evidente que ella ha sido la causa de muchos accidentes.

Este contenido esta orientado principalmente para la interpretación de la función y calculo de tierra en las instalaciones de alta tensión. Se pretende que este trabajo sea una gran guía y ayuda básica, donde se presentan los problemas que se tienen en el diseño de tierra con sus respectivas soluciones

Para realizar nuestro diseño del sistema de tierra tomamos como referencia la central termoeléctrica petacalco mas formalmente llamada presidente Plutarco Elías calles que es como su nombre lo dice una central termoeléctrica ubicada en el municipio de la unión de Isidoro montes de oca, guerrero cercana a la comunidad de petacalco, a 8 km de la ciudad de lázaro cárdenas Michoacán. Que inicio operaciones el 18 de noviembre de 1993, con 6 unidades (350 mw c/u) capaces de generar 2100 mw. Además de que es una central dual ya que opera con carbón y diesel. en la actualidad cuenta con 7 generadores capaces de generar 2800 mw. 6 generadores ya existían y se construyo una nueva unidad de 700mw. La construcción de la nueva central lleva por nombre 62 CCE pacifico y es una planta carboeléctrica de energíaeléctrica de 700 mw. Unidad (7) Que opera a base de carbón, que comenzó su construcción en mayo de 2006 y la fecha programada para su operación es en febrero de 2010. Los trabajos consistieron en preparación del sitio, una expansión (ampliación) de la subestación de 400 kv. Una laguna de cenizas para 30 años de operación, la isla de calderas, la isla de turbina y

generador, sistemas auxiliares y balance de planta. Pacifico es la primera unidad supercrítica que se monta en México. El proyecto fue ejecutado por un consorcio formado por Mitsubishi heavy industries y techint S. A. de C. V. esta planta carboeléctrica (unidad 7) tendrá una capacidad neta garantizada de 651.16 mw. El costo del proyecto es de 611 MDD. De acuerdo al documento de CFE “informe anual 2010”

Nuestro diseño del sistema de tierra es para la nueva subestación lázaro cárdenas potencia de 400 kv. Que forma parte del proyecto 62 CCE pacifico. Tiene forma rectangular Cuyas dimensiones aproximadas son 225m de largo por 125m. de ancho. El predio donde se construirá la subestación está ubicado en el interior del sitio que actualmente ocupa de la central termoelectrica presidente Plutarco Elías calles (ctppecc) como una ampliación de la misma

La energía producida por esta central debe ser transmitida a la subestación existente lázaro cárdenas potencia ubicada dentro del predio de la central Plutarco Elías calles, en caso de que se opte por dos unidades una será conectada a una bahía de 230 kv, y la otra en una bahía de 400kv, y por medio de un autotransformador de 230/400 conectarse a una bahía de 230kv.

La seguridad esta básicamente gobernada por los códigos eléctricos (normas) y estándares adoptados y que deben tomarse en cuenta por el diseñador del sistema de tierra, ya que el diseñador debe seleccionar la mejor alternativa para cumplir con los requisitos de las normas vigentes.

Para poder realizar el diseño de nuestro sistema de tierra de la subestación Lázaro Cárdenas Potencia de 400 kv. Nos enfocamos a la normatividad de CFE. Ya que las normas de diseño proporcionan los límites de diseño que deben satisfacerse y explican como pueden diseñarse los sistemas de tierra para ajustarse a ellas. Las normas generalmente incluyen formulaciones para realizar los cálculos necesarios o una guía detallada sobre los aspectos practico, para lo cual a sido elaborada la norma NFR-011-CFE. Esta norma de referencia es actualmente la que se emplea en el diseño de redes de tierra y a sido elaborada de acuerdo a las normas de operación del comité de normalización de CFE (CONORCFE) habiendo participado en la aprobación de la misma las áreas de CFE y organismos miembros del CONORCFE.

Este trabajo de tesis es un trabajo de investigación y verificación que hace referencia a la norma NRF-011-CFE la cual la norma aplica el método de los 12 pasos y explica que se necesita para el diseño del sistema de tierra, sin embargo explica de una forma muy resumida quedando algunas dudas, quizás para las personas que no tienen relación con el área eléctrica, mi objetivo es profundizar, investigar y desarrollar varios temas para tener un conocimiento mas amplio y mas preciso, que el lector pueda entender y así de esta forma se pueda diseñar un sistema de tierra eficiente que cumpla con las características necesarias para la seguridad y sobre todo que cumpla con la normatividad vigente.

Para realizar el diseño de un sistema de tierra se requiere de dos estudios previos (en nuestro caso) que son: el estudio de corto circuito y el estudio de la resistividad del terreno y lo que nos interesa de estos dos estudios son la corriente de corto

circuito máxima monofásica suministrada por el sistema y el valor de la resistividad del suelo y que dichos estudios los realizo anteriormente CFE. Estos valores los utilizamos para aplicarlos en los cálculos, únicamente sustituyendo cada valor en las formulas correspondientes.

Es necesario señalar que a pesar de contar con herramientas computacionales adecuadas y el conocimiento actualizado de los procedimientos de cálculo, el diseño de nuestro sistema de tierra ha sido diseñado por métodos manuales analíticos y que pueden existir discrepancias entre los valores obtenidos en el cálculo manual o en el asistido por computadora. Por lo cual es deseable que el diseñador tenga los suficientes conocimientos teóricos y prácticos en la materia con objeto de realizar un análisis profundo de los resultados obtenidos.

Los objetivos de esta tesis son:

- 1.-establecer seguridadal personal y proteger a los equipos eléctricos bajo condiciones de falla y entre puntos que puedan ser tocados por los operadores
- 2.-describir la función y elementos que forman parte de una red de tierra.
- 3.-analizar los riesgos que un operario puede correr cuando trabaja en presencia de corriente eléctrica
- 4.-describir a las diferentes características que pueden existir en un suelo determinado y algunas de las formas para mejorar su conductividad
- 5.-mostrar la aplicación de la norma NRF-011-CFE en la subestación lázaro cárdenas potencia para calcular una red de tierra
- 6.-Establecer las condiciones que deben cumplir el sistema de tierra, el diseño y los cálculos para asegurar un funcionamiento confiable de los equipos instalados en la central generadora y en el área de la subestación.
- 7.-analizar los tipos de fallas que se presentan en la subestación

A manera de resumen se puede hacer una descripción básica de cada uno de los 6 capítulos que se encuentra estructurada esta tesis y que es: en el primer capítulo mencionamos a los conceptos básicos para que se pueda entender mejor este trabajo, además de los aspectos que se deben considerar en el diseño de la red, en el segundo capítulo analizamos a un sistema de tierra además de sus funciones, aplicaciones, constitución y características, en el tercer capítulo analizamos los tipos de fallas más comunes e importantes para el diseño, en el cuarto capítulo analizamos el tipo de suelo y sus características además de los métodos para medir la resistividad, en el quinto capítulo analizamos las corrientes y voltajes tolerables por el cuerpo humano, sus efectos y algunas consideraciones para la seguridad, finalmente en el sexto capítulo realizamos el cálculo para el diseño de la red de acuerdo a la norma NRF—011-CFE que se aplica en la actualidad en subestaciones y que enuncia un método llamado de los 12 pasos para el diseño el cual aplicaremos en el mencionado capítulo para el diseño del sistema de tierra.

CAPITULO 1 GENERALIDADES

1.1 conceptos básicos

Con objeto de facilitar la comprensión de los conceptos relacionados con el sistema de tierra en subestaciones eléctricas, a continuación se definen algunos términos esenciales relacionados con las secciones de los presentes Capítulos.

Aterrizamiento

Conector a tierra de sistemas, circuitos o aparatos con el propósito de establecer un circuito de retorno por el suelo para mantener su potencial al potencial del suelo

A tierra

Conexión conductora, intencionada o accidental, entre un circuito o equipo eléctrico y el terreno natural o algún cuerpo conductor que sirva como tal.

Circuito de retorno a tierra

Es un circuito en el cual la tierra o un cuerpo conductor equivalente es utilizado para completar el circuito y permitir la circulación de la corriente desde o hacia la fuente de corriente

Conductor de puesta a tierra

Conductor que se utiliza para conectar a tierra, en el punto requerido, las cubiertas metálicas de los equipos y otras partes metálicas que pudieran transportar corrientes indeseables a través de ellas.

Corriente a tierra

Es la corriente que se fluye hacia o fuera de la tierra, ya sea en el conductor de puesta a tierra, en la malla, en la red ó en el electrodo de tierra.

Corriente de falla a tierra

Es el valor máximo de la corriente de corto circuito que fluye durante una falla de fase a tierra.

Corriente de falla asimétrica efectiva

Es el valor rms de la onda de corriente asimétrica, integrada en el tiempo de duración de la falla.

Corriente asimétrica de malla

Es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye de la malla de tierra hacia el terreno que la rodea

Corriente simétrica de falla a tierra

Representa el valor rms de la componente simétrica en el primer medio ciclo de una onda de corriente que se desarrolla después del instante de una falla en un tiempo cero.

Electrodo de tierra

Cuerpo metálico conductor o conjunto de cuerpos conductores agrupados y enterrados cuya función es establecer el contacto ó conexión con la tierra, en la cual los conductores desnudos para interconexión con el electrodo, se consideran parte de este. Generalmente se emplean varillas de acero-cobre de tres metros de longitud.

Elevación de potencial de tierra (GPR)

Tensión máxima que la red del sistema de tierra de una subestación puede relativamente alcanzar, en un punto aterrizado que esta al mismo potencial de un sistema de tierra remoto. Este potencial GPR es igual a la corriente máxima de malla multiplicada por la resistencia de malla

Factor de decremento

Es un factor de ajuste usado junto con la corriente de falla a tierra simétrica inicial en los cálculos de tierra orientados a seguridad, permite obtener un equivalente rms de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada, para tomar en cuenta el efecto del offset de c. d. inicial y su atenuación durante la falla.

Factor de reflexión (K)

En el modelo heterogéneo de las dos capas (del suelo), el factor de reflexión K define los cambios abruptos de la resistividad en la frontera de ambas capas ρ_1 y ρ_2 este factor de reflexión varia entre los limites -1 y +1. Un suelo con cambios extremos en los valores de resistividad, tendrá asociado un factor de reflexión cercano a la unidad. Mientras que un suelo con valores de resistividad similares tendrá asociado un factor de reflexión cercano a cero

Material superficial

Material instalado encima del suelo, el cual consiste en grava triturada, asfalto, etc. El material superficial, dependiendo de su resistividad, puede impactar significativamente en la corriente a través del cuerpo para tenciones de paso y contacto.

Potencial eléctrico

Es la diferencia de voltaje entre un punto y alguna superficie equipotencial que generalmente es la superficie del suelo, la cual es seleccionada arbitrariamente como de potencial cero.

Puesta a tierra

Grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo, que distribuyen la corriente eléctrica de falla en el suelo.

Red de tierra

Porción metálica subterránea de un sistema aterrizado que consiste en la interconexión de conductores longitudinales y transversales enterrados generalmente en forma horizontal que disipa hacia la tierra todo flujo de corriente.

Resistencia de tierra

Resistencia ofrecida al paso de la corriente eléctrica hacia el sistema de tierra existente, y esta en función de la resistividad del terreno, longitud y área de los conductores, así como de las características físicas de los electrodos de tierra.

Resistividad del terreno

Propiedad del terreno que consiste en oponerse al paso de la corriente eléctrica y esta determinada por las características del suelo (composición química, compactación, homogeneidad, humedad y temperatura).

Resistencia eléctrica del cuerpo humano

Es la resistencia eléctrica medida entre extremidades, esto es, entre una mano y ambos pies, entre ambos pies o entre ambas manos.

Sistema aterrizado

Sistema de conductores en el cual al menos uno (normalmente el neutro de un transformador o generador) está intencionalmente puesto a tierra ya sea sólidamente o a través de una impedancia.

Sistema de tierra

Conjunto de conductores desnudos y aislados, en su caso, que se interconectan con una o varias mallas y/o electrodos enterrados.

Tensión de paso

Tensión que, al ocurrir una falla de fase a tierra, puede resultar aplicada entre los dos pies de una persona situada a una separación de un metro (un paso).

Tensión de malla

Máxima tensión de contacto que puede ocurrir en el reticulado de la malla del sistema de puesta a tierra. El potencial de malla se presenta siempre al centro de la cuadrícula de la red.

Tensión de tierra

Es la tensión de referencia que la tierra mantiene en ausencia de influencias eléctricas externas.

Tensión de toque

Es la tensión a la que puede verse sometido el cuerpo humano ocasionada por el contacto con los gabinetes, tanques o estructuras metálicas de la instalación, que normalmente no conducen corriente, pero que, eventualmente, pueden conducir como consecuencia de alguna falla de aislamiento.

Tensión de transferencia

Es la tensión a la que puede verse sometido el cuerpo humano al transferirse esta, como consecuencia del contacto de un conductor conectado a la red de tierra de la subestación.

Tierra

Cuerpo capaz de mantener estable su potencial, sin importar la cantidad de cargas eléctricas que se le inyecten, absorbiendo y disipando las corrientes indeseables, brindando protección y limitando los problemas de ruido, adicionalmente se considera referencia eléctrica con potencial cero.

1.2 Aspectos básicos en el diseño

Al proporcionar los caminos requeridos para drenar las corrientes a tierra se cumplen dos funciones primarias al ocurrir una falla a tierra: se limitan las tensiones tolerables por el cuerpo humano a valores aceptables en condiciones normales de operación, y se protegen los equipos instalados en la subestación cuando existen gradientes de potencial al presentarse la falla, y de esta manera no afectar la continuidad del servicio de energía eléctrica.

Considerando que la construcción de una red de tierra implica interconectar una serie de mallas, es necesario por lo tanto utilizar conductores transversales y longitudinales (enterrados horizontalmente), conectados a su vez a un determinado número de electrodos verticales enterrados (varillas de tierra), por las siguientes razones:

- a) En la subestación, un solo electrodo de tierra, es insuficiente para proporcionar la seguridad requerida en el sistema de tierra. Cuando se emplean varias varillas de tierra interconectadas entre sí por medio de

conductores, el resultado es una red de tierra que al estar enterrada en un suelo de baja resistividad, proporciona un buen sistema de tierra.

- b) Cuando se pretende disipar corrientes a tierra elevadas, una red de tierra con resistencia baja, cumple esta función limitando a valores seguros los gradientes de potencial esperados, con las siguientes ventajas adicionales:

Los conductores horizontales enterrados a 0.3 o 0.5 m, facilitan la disipación de las tensiones de toque y de paso y se auxilian de los electrodos de tierra para distribuir y estabilizar los potenciales en el área de la subestación, debido a que en las capas altas del suelo no se tiene por lo general una resistividad homogénea, a diferencia de las capas más profundas que mantienen una resistividad similar.

Las capas superiores del suelo tienen generalmente mayor resistividad que las capas más profundas. Por lo tanto las varillas de tierra permiten disipar las corrientes de falla a través de las diversas resistividades del suelo.

Por lo tanto, la red de tierra consiste de un conductor continuo que rodea la mayor área posible de los equipos. Dentro de la red se disponen conductores desnudos en líneas paralelas en ambos sentidos (longitudinal y transversal) y de acuerdo a la distribución de los equipos principales. En los puntos de cruce, los conductores deben unirse sólidamente y las varillas de tierra se colocan generalmente en la periferia de la red y en las regiones donde se requiera, considerando la importancia del equipo por aterrizar. Estas varillas pueden fabricarse de tubos, fierro galvanizado o de acero revestido de cobre (copperweld) de 16 mm de diámetro y 3 metros de longitud, Estas varillas “copperweld” son generalmente las más utilizadas por sus ventajas como son: buena conductividad, excelente resistencia a la corrosión, buena resistencia mecánica y la combinación de la baja resistencia del cobre y la rigidez del fierro.

La resistencia eléctrica del material con que está hecha la varilla, es importante en la determinación de la capacidad de conducción de corriente de la varilla como límite seguro, para evitar sobrecalentamiento y caída de tensión peligrosa del circuito a tierra; sin embargo, la resistencia de una varilla de Sección circular se reduce al incrementar su diámetro, pero tiene un límite en el que ya no es recomendable aumentarlo debido a que el valor de la resistencia del terreno permanece constante, por lo cual es común emplear varillas de acero-cobre para conformar los electrodos de tierra.

1.3 Consideraciones generales

Los criterios de diseño de un sistema de tierra, implican el análisis de los elementos que conforman la red y el asegurar la integridad del personal que opera y mantiene a la subestación. Considerando que se cuenta con un terreno para alojar la subestación y se ha distribuido el equipo eléctrico en este, incluyendo las estructuras y cercas que la conforman, se deben evaluar los siguientes aspectos genéricos:

- a) De acuerdo con la configuración del terreno disponible, se debe instalar un conductor desnudo enterrado mínimo 0.5 m alrededor del perímetro del área o fuera de esta y dentro de este perímetro, conductores horizontales colocados transversal y longitudinalmente para formar mallas que permitan proporcionar trayectorias de conexión cercanas a los equipos y estructuras; no es necesario que la malla tenga forma rectangular ya que la configuración puede adaptarse a las condiciones del terreno que ocupa la subestación. Las tensiones de malla se incrementan ligeramente hacia las esquinas dependiendo de factores como: tamaño de la red, número y localización de varillas, espacio entre conductores paralelos, diámetro y profundidad del conductor que forma la malla, etc., por lo cual es común reforzar la malla hacia las orillas colocando los conductores más cerrados. Los conductores desnudos utilizados son generalmente de una Sección transversal de 107.2 mm^2 (No. 4/0). En las esquinas del perímetro o puntos de unión o cercano a equipos mayores o apartarrayos, se instalan electrodos verticales de 3 m. de longitud, los cuales pueden ser más largos cuando se tengan resistividades de terreno altas o de múltiples capas.
- b) La red de tierra se debe extender lo más posible dentro o fuera del predio de la subestación considerando, cuando es necesario, conductores robustos o en paralelo cuando existen altas corrientes de falla para conectar a tierra el neutro de los generadores, los bancos de capacitores o los transformadores de potencia.
- c) Las mallas que conforman una red de tierra, generalmente el tamaño de sus lados tiene la relación de 1:1 a 1:3, pero estrictamente se determinan por los cálculos propios del diseño y se debe procurar que sean cuadradas o rectangulares para lograr un mayor control de los gradientes de potencial. Las diversas conexiones cruzadas entre los conductores transversales y longitudinales, minimizan la caída de voltaje, proveen continuidad cuando un conductor se desconecta y contribuyen ligeramente en abatir la resistencia de la red, pero su primordial función es controlar los potenciales que se presenten en la superficie del terreno.

1.4 Condiciones inadecuadas

Adicionalmente, existen condiciones no propicias para poder contar con un sistema de tierra confiable como son un terreno escaso y de alta resistividad, lo cual dificulta controlar los gradientes de potencial. Existen algunas soluciones como son:

- a) Considerar conexiones a una tierra remota, evaluando los voltajes de transferencia peligrosos y la apropiada ubicación de apartarrayos en los puntos críticos. Una caída de tensión significativa puede presentarse entre la tierra local y la remota sobre todo cuando se tienen fuentes de alta frecuencia.
- b) Utilizar electrodos de tierra profundos por medio de pozos barrenados, que conecten con resistividades bajas del terreno.

- c) El uso de aditivos y compuestos químicos como bentonita, resinas sintéticas, mezclas a base de sulfato de sodio o de cobre, carbón mineral tipo coke, que se colocan alrededor de los conductores enterrados o electrodos utilizados, permite abatir la resistividad del terreno.
- d) Se pueden utilizar mallas prefabricadas para igualar los gradientes de potencial (superficies equipotenciales), las cuales consisten de conductores de cobre acerado con Sección transversal de 13.3 mm² (No. 6) en cuadros de 0.6 m de lado, instaladas de 5 a 15 cm bajo la superficie de la tierra y conectadas en diversos puntos a la red de tierra principal.
- e) En donde sea posible, se pueden utilizar materiales cercanos a la red de tierra original que permitan reducir la resistencia de tierra y los gradientes de potencial. Estos materiales deben ser de baja resistividad tales como algunas estructuras metálicas, o masas de concreto armado que pueden utilizarse como una red de tierra adicional conectada a la red de tierra principal.

1.5 sistema de tierra en ampliación de subestaciones

Para el caso de subestaciones existentes donde la malla para tierra no cubre la totalidad del terreno, si no únicamente una parte del área total y además no se cuenta con información anterior del sistema de tierra existente. Para determinar el sistema de tierra en la ampliación se recomiendan los siguientes procedimientos:

- a) Realizar mediciones de resistividad en áreas cercanas a la rejilla para tierra existente
- b) Realizar mediciones en áreas ubicadas en sitios alejados de la malla para tierra existente, pero dentro del terreno de la subestación y
- c) En caso de no ser posible el inciso b), realizar las mediciones en áreas exteriores pero colindantes con la subestación.
- d) Hacer un análisis de resultados y seleccionar el valor de resistividad más alto, lo cual debe permitir determinar el tipo y forma de la malla para tierra más óptima a utilizar en la ampliación.

Recomendaciones generales

Donde se suponga que en el terreno pueden existir problemas de corrosión en el material del sistema de tierra se deben realizar análisis físicos y químicos del suelo a fin de conocer la composición del mismo y seleccionar los materiales adecuados para el sistema de tierra.

Todos los materiales a utilizar en el sistema de tierra, deberán estar certificados por un laboratorio reconocido y que cumplan con la totalidad de las normas nacionales e internacionales.

Las uniones de los electrodos verticales deberán hacerse con rosca y agregarse elementos inhibidores que eliminen la corrosión.

La red de tierra en la ampliación, conservara las mismas características de a red existente como por ejemplo el mismo tamaño del calibre del conductor, la misma separación entre conductores, la forma, etc.

1.6 Disposición física de la red de tierra

El cable que forma el perímetro exterior de la malla para tierra debe ser continuo de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo de la subestación, con ello se evitan altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y en las terminales cercanas.

La malla para tierra estará constituida por cables colocados paralelo “y” perpendicularmente, con el espaciamiento requerido conforme al cálculo de su resistencia eléctrica y de las tenciones de paso y de contacto considerados en el diseño del sistema de tierra.

Los cables que forman la malla para tierra deben colocarse preferentemente a lo largo de las hileras de las estructuras o equipos para facilitar la puesta a tierra de los mismos.

En cada cruce de conductores de la malla para tierra, estos deben conectarse rígidamente mediante conectores y en donde se haya determinado a electrodos verticales (varillas para tierra).

En el caso de plantas hidroeléctricas, de la malla para tierra de la zona del desfogue, subirán cables para conectarse al cable que rodeara cada piso de la casa de máquinas embebido en el concreto, empleando los muros, dejando los registros correspondientes a lo largo y ancho de la casa de máquinas, para de estos sacar derivaciones o conexiones a cada equipo.

Las conexiones en los registros deben hacerse con conectores atornillables. Se hace de esta manera para evitar que los cables de tierra queden expuestos a la intemperie y los mismos puedan reaccionar con el ambiente contaminado y a la vez protegerlos del vandalismo.

Las estructuras metálicas de la planta y de subestaciones, así como las partes metálicas de equipos, deben estar puestas a tierra conectadas a tierra para evitar accidentes por descargas eléctricas en casos de fallas.

Los diferentes niveles de las casas de máquinas deben contar con circuitos cerrados de cable conductor para interconexión a equipos sistemas o estructuras a tierra.

Dichos circuitos deben conectarse directamente al sistema de tierra principal e interconectarse entre sí y estar embebidos en concreto.

En general la malla para tierra del sistema de tierra debe estar a nivel del tubo de aspiración 0.50 m. Bajo el concreto en contacto directo con la roca.

Los parámetros físicos del sistema de tierra se basan en limitaciones tanto físicas como económicas presentes en la instalación de la propia malla para tierra. Por ejemplo una limitación física se encuentra en la excavación y relleno de las cepas para enterrar el conductor, por lo que el espaciamiento de la malla para tierra puede ser de 3m. En adelante, los espaciamientos típicos van de 3 a 15 m.

No existe una ecuación para determinar el número óptimo de electrodos verticales (varillas para tierra) que tengan una disipación efectiva de corriente, estos pueden instalarse con una separación mínima de 2 veces su longitud.

Como se mencionó, las fórmulas para el cálculo del sistema de tierra, contemplan profundidades que van de (0.3-1.5 m). Es importante enterrar la malla a la profundidad de la capa de menor resistividad y que al mismo tiempo se encuentra dentro del intervalo antes mencionado, tomando en cuenta aspectos económicos relacionados con el material, excavación y relleno. Las mediciones de resistividad del terreno deben considerar el procedimiento descrito posteriormente.

En la propuesta inicial de la configuración de la malla para tierra se pueden considerar arreglos de sistemas de tierra en subestaciones y terrenos similares existentes; la longitud total del conductor, el arreglo de la malla para tierra, así como la cantidad de electrodos verticales (varillas para tierra) se verifican en función de los resultados de los cálculos de la resistencia eléctrica máxima y de las tensiones seguras de paso y de contacto si es necesario se podrán modificar.

Para el diseño del sistema de tierra se considera únicamente el conductor enterrado con o sin electrodos verticales (varillas para tierra)

En el diseño inicial debe considerarse el colocar electrodos verticales (varillas para tierra) en los extremos de la malla para tierra y en algunos puntos de la unión del perímetro, Se deben también colocar electrodos verticales (varillas para tierra) en equipos como apartarrayos, interruptores y transformadores de potencia.

En suelos con alta resistividad, es conveniente utilizar electrodos verticales de longitud apropiada instalados en los puntos de unión de la malla para tierra.

En el caso de plantas termoeléctricas, se implementa un sistema de tierra, el cual consiste de las siguientes zonas: subestación, transformadores, casa de máquinas, generador de vapor. De la malla se conectan cables a las áreas de oficina, almacenes, y talleres, torres de enfriamiento, obra de toma, tanques de almacenamiento, etc. Dejando registros a lo largo y ancho de la malla de tierra y se toman derivaciones y conexiones a cada equipo, así mismo se implementan registros que sirven como puntos de conexión y prueba para verificar que todas las zonas del sistema de tierra que conforman la planta están unidas entre sí.

1.7 Modificación del diseño del sistema de tierra

Cuando el estudio basado en el diseño preliminar indica que podrían presentarse diferencias de potencial peligrosas dentro de la subestación, las siguientes recomendaciones pueden ser aplicadas apropiadamente.

Disminuir la resistencia total de la red:

- a) Una reducción en la resistencia total de la red del sistema de tierra disminuirá la máxima elevación de tensión de la red de sistema de tierra. El método más efectivo para reducir la resistencia total de la red es aumentando el área ocupada por la misma red. Cuando el área de la red está restringida para poderla agrandar se pueden utilizar electrodos de tierra profundos introducidos hasta una capa de baja resistividad.
- b) Reducir la distancia entre conductores: al disminuir la separación entre conductores hasta aproximarse más estrechamente a la condición de una placa metálica continua, permite limitar las tensiones peligrosas dentro de la subestación
- c) A las tensiones tolerables por el humano, pero a un alto costo. El problema en el perímetro puede resultar más difícil, especialmente en una subestación cuando la resistividad del terreno es alta. Sin embargo los conductores de la red enterrados fuera de la cerca, aseguran que los gradientes de tensión escarpados inmediatamente después del exterior del perímetro no contribuyan a peligrosos contactos de toque. Otro método efectivo y económico para el control de gradiente de tensión es incrementar el número de varillas de tierra en el perímetro de la red. Otra alternativa para el control de gradientes de tensión y las tensiones de paso en el perímetro de la red, es reducir la separación entre los conductores más próximos al perímetro de la red o con conductores paralelos alrededor del perímetro de la red enterrados a diferente profundidad.
- d) Esparcir una capa, con un espesor entre 8 a 15 cm, de roca triturada en la superficie del terreno para incrementar la resistencia en serie con el cuerpo humano.
- e) Limitar la corriente de falla: la elevación máxima de la tensión de la red se reducirá si se disminuye, cuando sea posible, la corriente total de falla. Pero el incremento del tiempo de liberación de la falla aumenta el daño que pueda causar el choque eléctrico a una persona.
- f) Restringir el paso a ciertas áreas.

Al tomar en cuenta una o más de las recomendaciones anteriores, es necesario realizar nuevamente todos los cálculos, para verificar que el nuevo diseño resulta seguro.

1.8 Consideraciones para el crecimiento del sistema eléctrico

En el diseño de un sistema de tierra, es necesario tomar en cuenta el incremento de la corriente de falla en la subestación y el factor económico, provocado por los cambios futuros en la topología o en el aumento en la capacidad del sistema. Debido a que modificaciones posteriores a la red de tierra resultan imprácticas y costosas, por lo cual generalmente no se realizan, dando motivo a que el sistema de tierra sea inseguro.

Como en muchos otros aspectos de la ingeniería, se debe invertir ciertas cantidades de dinero con el propósito de dar seguridad de operación en los sistemas para salvaguardar la vida de las personas en el trabajo y a los equipos. En el caso particular de los sistemas de potencia existe un límite económico para asegurar la protección de estos sistemas, es decir, que existe un compromiso entre la seguridad, la confiabilidad en los sistemas y la economía que en términos generales no representa un problema de fácil solución dado el número de elementos que intervienen y la multiplicidad de alternativas que se pueden representar, sin embargo como un indicador a grandes rasgos de la importancia que se le debe dar a la inversión en la protección, se puede mencionar que esta no debe “exceder el 5%” del total de la inversión del sistema bajo estudio.

Al realizar los estudios de cortocircuito se considera la expansión del sistema con períodos de diez años. Para tener un sistema de tierra seguro durante la vida de la subestación, se debe considerar el caso más desfavorable de la magnitud de corriente de falla en el mismo período.

CAPITULO 2 SISTEMA DE TIERRA

2.1 sistema de tierra

Un sistema de tierra es un conjunto de conductores, (cables, electrodos conectores, etc.) que forman una malla envueltos por un medio (tierra) y tiene por finalidad principal inyectar en el suelo una corriente eléctrica además de la protección de las personas y de los equipos.

Un sistema de tierra se instala en el área de un terreno a una profundidad específica con la finalidad principal de permitir el paso de una corriente eléctrica hacia el suelo. Consiste básicamente en la conexión de los equipos eléctricos y electrónicos a tierra, para evitar que se dañen los equipos (protegerlos) en caso de una corriente transitoria peligrosa, o también por la falta de aislamiento en uno de los conductores y al quedar en contacto con una parte metálica y que pudiera ser tocados por alguna persona que podría ocasionarle lesiones o incluso la muerte, Por estas razones, se recomienda que se realicen las instalaciones de puesta a tierra por lo que la corriente siempre buscara el camino más fácil por donde pasar, y al llegar a tierra se disipa, esto si tiene una resistividad muy baja en el terreno donde se realizo la instalación.

Un sistema de tierra efectivo incrementa la confiabilidad de operación de un sistema eléctrico, reduciendo las interrupciones de servicio causadas por fenómenos internos (fallas del sistema, errores humanos) y externas (descargas atmosféricas), por las razones de seguridad y de eficiencia del sistema eléctrico es de mucha importancia colocar un sistema de tierra en un sistema eléctrico.

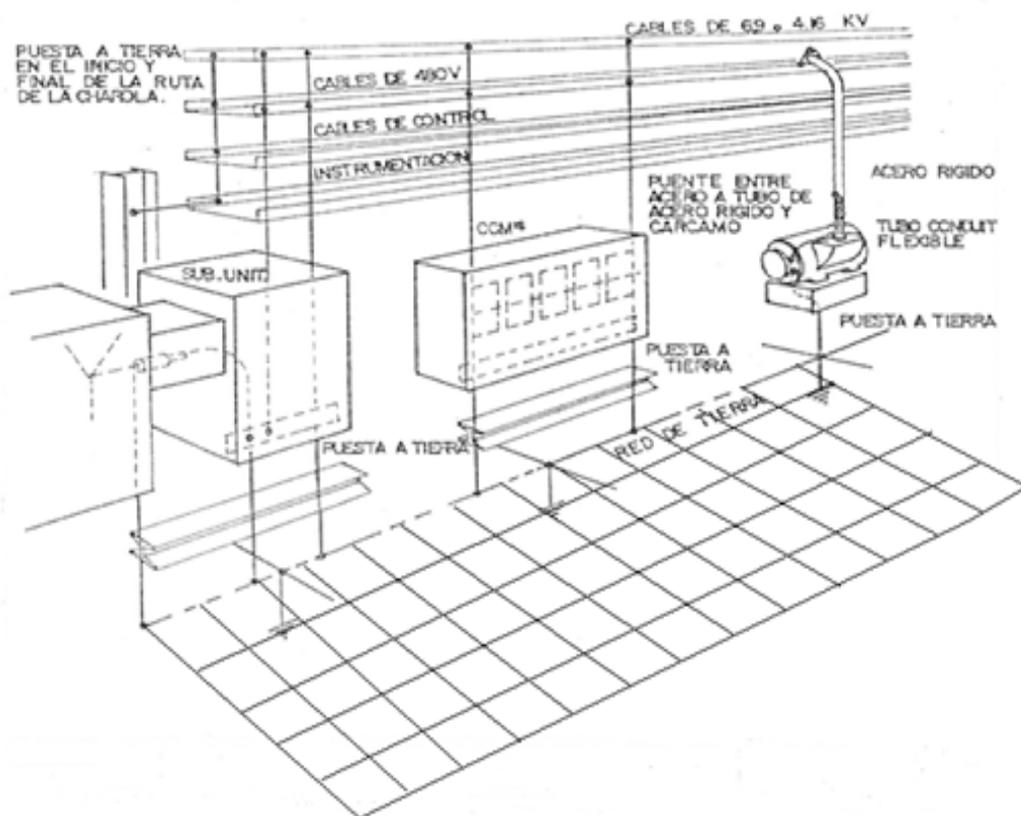


fig. 2.1 sistema de tierra

2.2 funciones principales de un sistema de tierra

- Proveer un medio de muy baja impedancia que permita disipar las corrientes Eléctricas a tierra, evitando exceder los límites de diseño de los equipos.
- Proporcionar una trayectoria a tierra del conector neutro que existe en los sistemas o equipos eléctricos, para limitarlo de la aparición de un potencial
- Contar con un medio seguro que aterrice los equipos eléctricos cuando estén en mantenimiento.
- Facilitar la operación de los relevadores que eliminan las fallas a tierra del sistema.

- e) Disipa la corriente asociada a las descargas atmosféricas, limitando las sobre tensiones generadas.
- f) Limitar la elevación de potencial de la red a valores aceptables, cuando ocurre una falla a tierra.
- g) Evitar que durante la circulación de estas corrientes de tierra, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación, que puedan ser peligrosas para el personal.
- h) Proporcionar mayor confiabilidad, continuidad y seguridad al sistema eléctrico.

Adicionalmente a las funciones descritas, una buena conexión a tierra, abate el costo del equipo utilizado, minimiza la radio interferencia y se reducen los niveles de aislamiento de los equipos (tensión de aguante al impulso) y la magnitud de la estabilidad transitoria.

2.3 componentes básicos de un sistema de tierra

La construcción del sistema de tierra, requiere diversas conexiones utilizando conductores y conectores de suficiente capacidad de corriente así como una alta resistencia a los esfuerzos electromecánicos esperados

El sistema de tierra de una estación generadora o una subestación se integra con los siguientes tres elementos:

- a) Conductores
- b) varillas o electrodos de tierra
- c) conectores juntas o accesorios

2.3.1 CONDUCTORES

Sirven para formar el sistema de tierra y para la conexión a tierra de los equipos. Los conductores empleados en los sistemas de tierra son generalmente cables concéntricos formados por varios hilos y los materiales empleados en su fabricación son el cobre, cobre estañado, coperweld (acero cubierto con cobre), acero, acero inoxidable, acero galvanizado o aluminio.

Los materiales mas usados como conductores eléctricos son el cobre y el aluminio, aunque el cobre es superior en características eléctricas y mecánicas (la conductividad del aluminio es aproximadamente el 60% de la del cobre y su esfuerzo de tensión a la ruptura, el 40%). Las características de bajo peso del aluminio han dado lugar a un amplio uso de ese metal en la fabricación de los cables aislados y desnudos.

El factor principal en la selección del material es la característica de corrosión que presenta al estar enterrado. El cobre es la selección más común para los conductores, ya que es económico y tiene buena conductividad, además de ser resistente a la corrosión, a la fusión y a las propiedades mecánicas que posee. El calibre de los conductores, como se vera mas adelante, se determinara por requerimientos de conducción de corriente.

Cada uno de los elementos del sistema de tierra incluyendo los conductores de la red, los cables de puesta a tierra de los equipos, estructuras y los electrodos, deben ser seleccionados de tal manera que presenten las siguientes características:

- a) Tengan la suficiente conductividad para que no contribuyan substancialmente a producir diferencias de potencial
- b) Resistencia a la fusión y deterioro en las condiciones más desfavorables de magnitud y tiempo de duración de corriente de falla que pueden quedar expuestas.
- c) Confiables y con una alta resistencia mecánica, especialmente en aquellos lugares en que puedan quedar expuestos a un daño o abuso físico.
- d) Sean capaces de mantener sus características aun cuando sean expuesto a la corrosión.

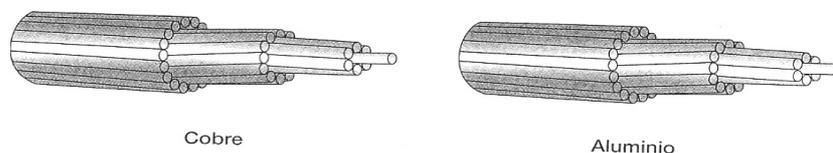


Fig. 2.2 material de conductores de la red de tierra

Para determinar la sección transversal del conductor de puesta a tierra y de la malla para tierra, la corriente de falla $3I_0$ debe ser la máxima corriente futura de falla esperada que puede ser conducida por cualquier conductor del sistema de tierra, y el tiempo (t) debe ser el tiempo máximo de liberación de la falla, incluyendo el tiempo de la protección de respaldo.

Para calcular la sección transversal del conductor se debe considerar la corriente de falla de fase a tierra o dos fases a tierra la que resulte más severa. Ya que la corriente de falla $3I_0$ debe ser la máxima corriente futura.

El conductor utilizado en los sistemas de tierra es cable de cobre con Sección transversal mínima de 107.20 mm^2 (No. 4/0); se ha seleccionado como mínimo esta Sección transversal por razones mecánicas, por su resistencia térmica y conductividad. Se utiliza el cobre por su mejor conductividad tanto eléctrica como térmica y sobre todo por ser resistente a la corrosión debido a que es catódico respecto a otros materiales que pudieran estar enterrados cerca de él.

Para calcular la Sección transversal del conductor para un sistema de tierra requerida, se debe tener el valor de la corriente máxima de falla a tierra que puede estar presente en el punto de la subestación. En función de la elevación de temperatura de corto tiempo, la magnitud y el tiempo de duración de la falla y cuando se conocen las constantes del material del conductor. La condición más crítica de corriente de corto circuito en la subestación es para una falla de fase a tierra o también llamada falla monofásica. Se utilizara cable de cobre desnudo con conductividad de 97%, ver tabla 2.1, 2.2, 2.3.

El tamaño o sección transversal o calibre de los conductores eléctricos debe indicarse en mm^2 (escala internacional IEC) y opcionalmente en AWG-kcmil (AWG = american wire gauge; kcmil = kilo circular mil)

El tamaño de un conductor eléctrico debe seleccionarse adecuadamente cumpliendo con los requerimientos de diseño del sistema de tierra.

$$A_{kcmil} = I \frac{197.4}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}}} \quad [2.1]$$

$$A_{mm^2} = \frac{1}{\sqrt{\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}}} \quad [2.2]$$

A = Sección transversal del conductor en mm^2 (o también en $Kcmil$)

I = Corriente rcm en KA (debe de considerarse el incremento de este valor a futuro)

T_m = Temperatura máxima permisible en $^{\circ}C$

T_a = Temperatura ambiente en $^{\circ}C$

T_r = Temperatura de referencia para las constantes de material en $^{\circ}C$

α_0 = Coeficiente térmico de resistividad a $0^{\circ}C$ en $1/^{\circ}C$

α_r = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia t_r en $1/^{\circ}C$

ρ_r = Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia en t_r en $\mu\Omega - cm$

t_c = Tiempo de duración de la corriente en segundos.

$TCAP =$ Factor de capacidad térmica por unidad de volumen en $J/(cm^3 / ^\circ C)$

descripción	Conductividad de material (%)	Factor α a 20 $^\circ C$	K_s al 0 $^\circ C$ (0 $^\circ C$)	Temperatura de fusión T_m $^\circ C$	ρ_r 20 $^\circ C$ $\mu\Omega - cm$	Factor de capacidad térmica
Cobre recocido suave-inmersión	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Cobre comercial inmersión-duro	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Cobre revestido alambre de acero	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Cable revestido alambre de acero	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Cable revestido barra de acero	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Acero 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Acero revestido barra de acero	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Zinc bañado barra de acero	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Acero inoxidable	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

Tabla 2.1 constantes de materiales

material	Conductividad (%)	T_m ($^\circ C$)	K_f
Cobre temple suave	100.0	1083	7.00
Cobre comercial temple duro	97.0	1084	7.06
Cobre comercial temple duro	97.0	250	11.78
Cobre revestido alambre de acero	40.0	1084	10.45
Cobre revestido alambre de acero	30.0	1084	12.06
Cobre revestido barra de acero	20.0	1084	14.64
Aluminio grado EC	61.0	657	12.12
Aluminio 5005 aleación	53.5	652	12.41
Aluminio 6201 aleación	52.5	654	12.47
Aluminio	20.3	657	17.20
Acero 1020	10.8	1510	15.95
Acero revestido barra de acero	9.8	1400	14.72
Zinc bañado Barra de acero	8.6	419	28.96
Acero inoxidable 304	2.4	1400	30.05

Tabla 2.2 constantes de materiales

Descripción	Designación	Área de la sección transversal Nominal	Número de hilos	Dimensiones mm d e f	Resistencia Eléctrica a la c.d. a 20°C nominal	Masa aproximada
Corta	AWG O KCM	Mm ²			ohm/kA	kg/kA
- Cable de cobre 14	14	2,082	7	1,85 0,76	8,45	58
- Cable de cobre 12	12	3,307	7	2,33 0,76	5,32	76
- Cable de cobre 10	10	5,260	7	2,93 0,76	3,34	102
- Cable de cobre 8	8	8,367	7	3,70 1,14	2,10	161
- Cable de cobre 6	6	13,30	7	4,67 1,14	1,32	223
- Cable de cobre 4	4	21,15	7	5,88 1,14	0,832	316
- Cable de cobre 2	2	33,62	7	7,42 1,14	0,523	457
- Cable de cobre 1/0	1/0	53,48	19	9,47 1,40	0,329	747
- Cable de cobre 2/0	2/0	67,43	19	10,63 1.14	0,261	902
- Cable de cobre 3/0	3/0	85,01	19	11,94 1.14	0,207	1093
- Cable de cobre 4/0	4/0	107,2	19	13,40 1.14	0,164	1329
- Cable de cobre 250	250	126,7	37	14,62 1.65	0,139	1665
- Cable de cobre 300	300	152,0	37	16,01 1.65	0,116	1938
- Cable de cobre 400	400	202,7	37	18,49 1.65	0,0868	2476
- Cable de cobre 500	500	253,4	37	20,67 1.65	0,0694	3004
- Cable de cobre 750	750	380,0	61	25,34 1.65	0,0463	4402

Tabla 2.3 características generales de los conductores

2.3.2 ELECTRODOS DE TIERRA

Son varillas que se clavan en terrenos y sirven para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica. Son esencialmente importantes en los sistemas de tierra ya que se usan en los suelos (tierra) que tienen una resistividad alta.

Estos elementos se clavan en el terreno y sirven para encontrar rocas más húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica en el subsuelo. Los materiales empleados en la fabricación de varillas o electrodos de tierra son generalmente el acero, acero galvanizado, acero inoxidable y copperweld. Como en los conductores la selección del material dependerá de las características de corrosión que presenten al estar enterrados. El copperweld es el material más empleado en las varillas de tierra ya que combina las ventajas del cobre con la alta resistencia mecánica del acero, tiene buena conductividad, resistencia a la corrosión y buena resistencia mecánica para ser clavada en el terreno.

El diseño de un electrodo de tierra, su tamaño, forma y disposición es muy importante, no solo para proporcionar una impedancia relativamente baja sino también para controlar la forma del campo eléctrico sobre la superficie del terreno.

El diámetro y longitud de las varillas o electrodos se determinara por la resistencia mecánica y por las características de resistencia eléctrica que presenten al estar enterrados.

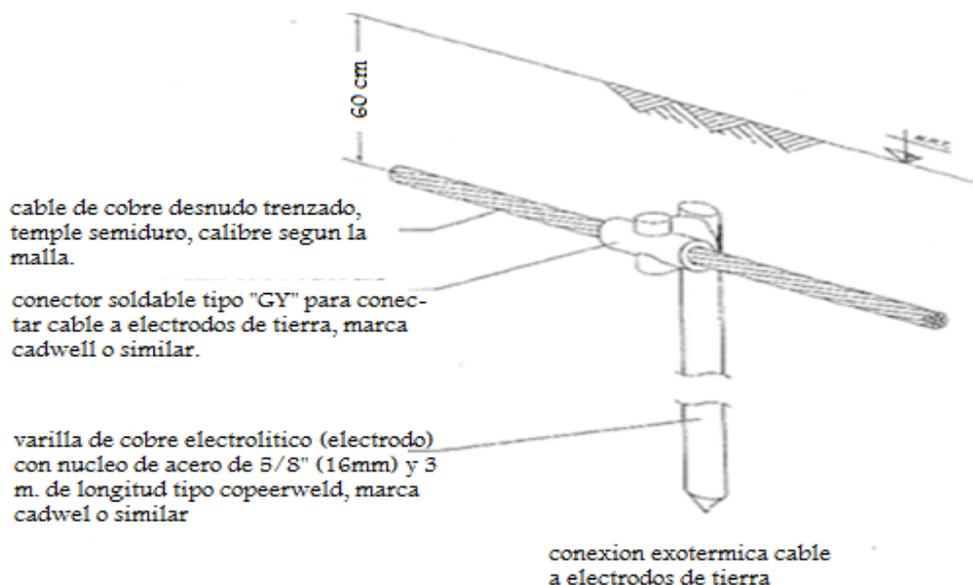


Fig. 2.3 conexión del electrodo con la red de tierra

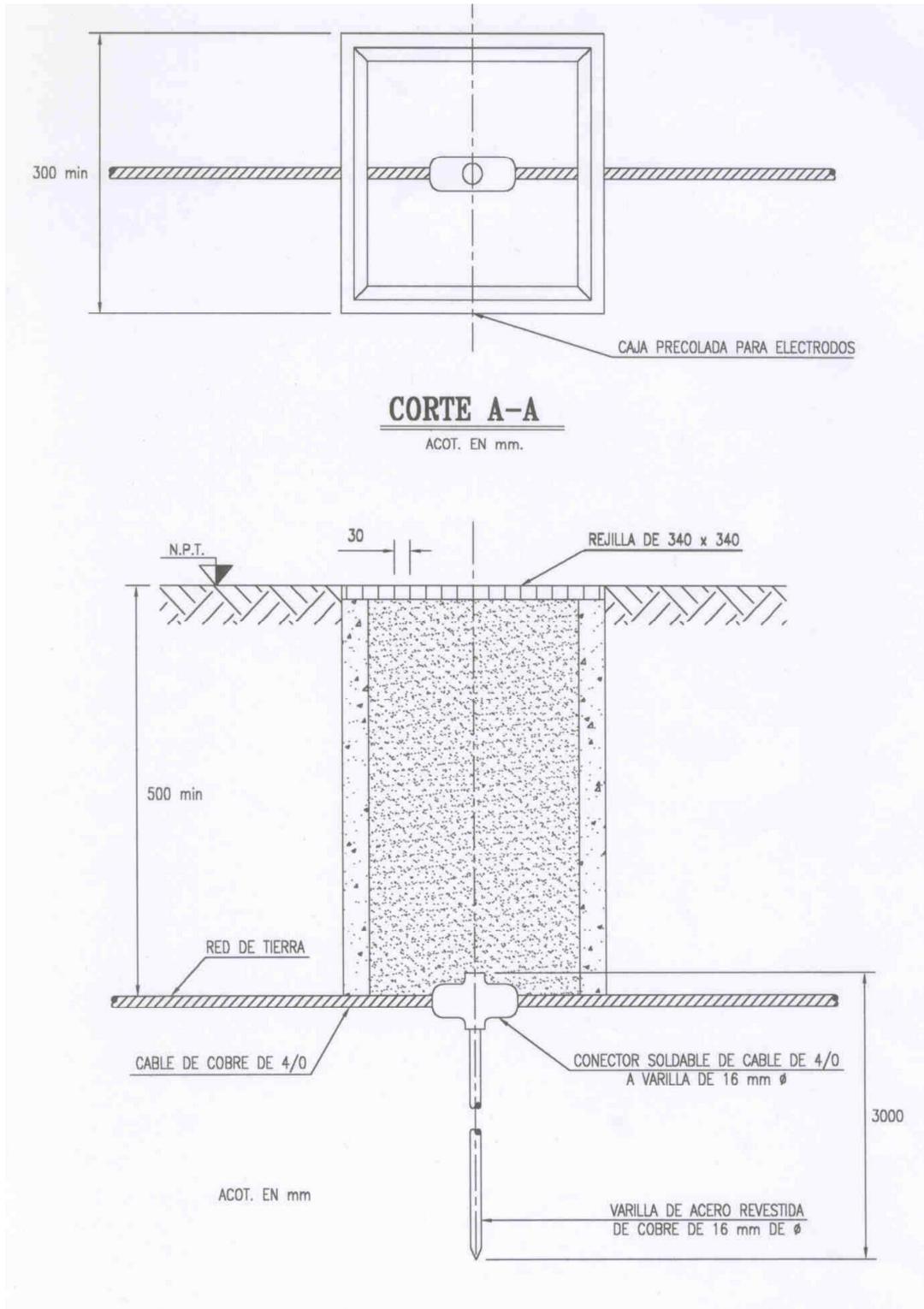


Fig. 2.4 conexión electrodo de tierra con registro

2.3.3 CONECTORES CON SUS ACCESORIOS

Los conectores son los elementos que permiten unir todo el sistema de tierra y deben tener la capacidad de soportar altas corrientes, esfuerzos electromecánicos y sobrecalentamientos. Las conexiones entre los conductores de la red aseguran el adecuado control de potenciales en la superficie, también contribuyen a formar trayectorias múltiples para disipar la corriente de falla, limitando las diferencias de tensión en la propia red y proporcionan cierta redundancia en el caso de que se desconecte algún conductor.

Todos los conectores empleados en los puntos de unión deben seleccionarse considerando que generalmente son de dos tipos: a presión y soldados.

- a) Los conectores del “tipo a presión”, incluyen aquellas conexiones que mediante presión mantienen el contacto del conductor del sistema de tierra con el conector. En este tipo están comprendidos los de tornillo ó mecánicos y los de compresión.
- b) Los conectores atornillables ó mecánicos se fabrican con bronce de alto contenido de cobre, formando dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material se fabrica de bronce al silicio para proporcionar alta resistencia mecánica y a la corrosión.

La utilización del bronce, que es un material no magnético, proporciona una conducción segura para drenar las corrientes provocadas por las descargas atmosféricas

Los conectores tipo soldables o exotérmicos, provocan la unión mediante una reacción química entre el conductor y el conector, a base de calor (cadweld en inglés).

Los conectores de compresión dan mayor garantía de buen contacto y son ampliamente utilizados para interconectar la red de tierra, así como para la puesta a tierra de las estructuras metálicas y en general de las partes metálicas expuestas de los equipos eléctricos de la subestación.

Se debe de tener cuidado en la elección de los conectores ya que cada uno cumple una función, se debe de utilizar el conector adecuado para evitar diseños peligrosos y caros.

En la fig. 2.5 se observa la malla y los diferentes tipos de conectores que se utilizaran para unir la malla y aterrizar los equipos, electrodos, partes metálicas, etc. y que la selección de los conectores depende del equipo que se va a aterrizar.

En la figura 2.6 aparecen los tipos de conectores usados en un sistema de tierra, incluyendo los conectores tipo a presión y soldados los cuales son los que mas se utilizan y para nuestro caso los mas importantes.

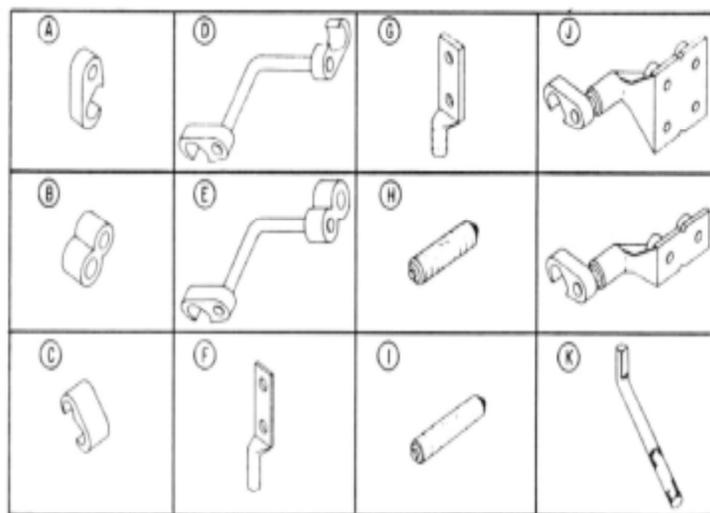
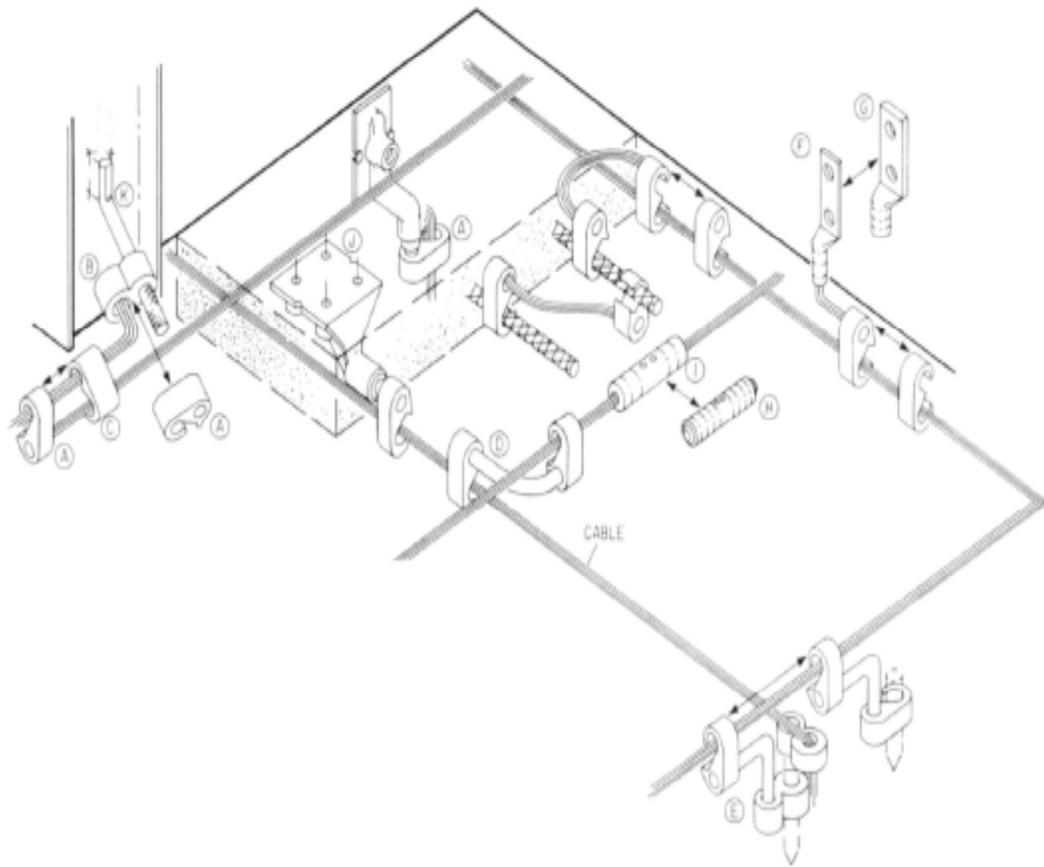


Fig. 2.5 interconexión de los elementos al sistema de tierra

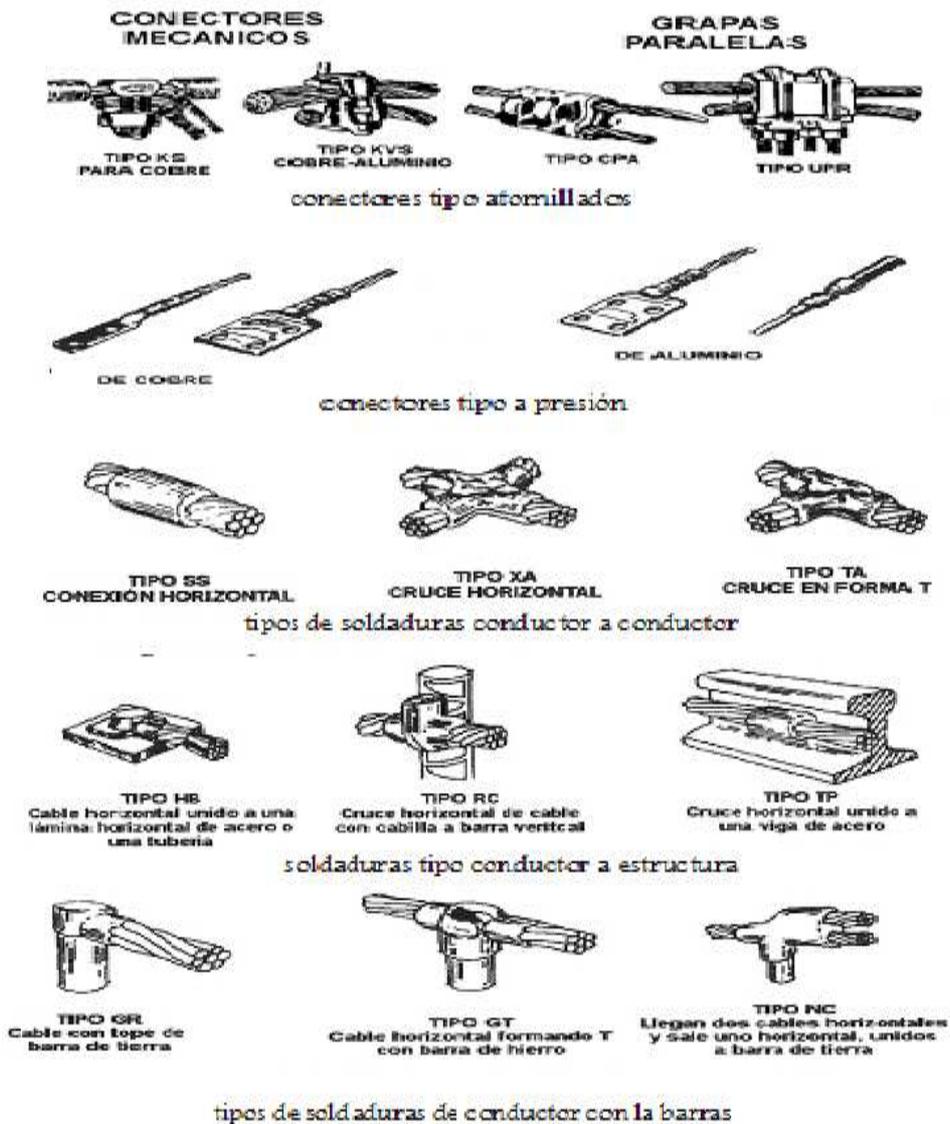


fig. 2.6 tipo de conectores y accesorios

2.4 Características de los elementos del sistema de tierra

Todos los conectores empleados en los puntos de unión deben seleccionarse considerando lo siguiente:

- Capacidad de conducción de corriente suficiente para soportar las severas condiciones de magnitud y duración de la corriente de falla.
- Resistencia a la corrosión que retarde su deterioro en el ambiente en el que se instale.

- c) Conductividad eléctrica que reduzca efectivamente las diferencias de tensión locales de la red de tierra.
- d) Resistencia mecánica: para soportar los esfuerzos electromecánicos que puedan provocar daños físicos a la red.
- e) Capacidad térmica que permita mantener una temperatura por debajo de conductor y así reducir el efecto del calentamiento.

2.5 Sistemas básicos de las redes de tierra

Se han considerado básicamente tres sistemas:

- a) Sistema radial. Este sistema consiste en uno o varios electrodos de tierra a los cuales se conecta la derivación de cada uno de los equipos, este sistema es el más barato y es el menos seguro, ya que al producirse una falla en el equipo, se producen elevados gradientes de potencial.
- b) Sistema de anillo. El sistema en anillo se obtiene colocando en forma de anillo un conductor de suficiente calibre alrededor de la superficie ocupada por los equipos de la subestación. Al anillo se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos usando un conductor de calibre más delgado. En los vértices del anillo se instalan varillas o electrodos de tierra. Este sistema es más eficiente que el sistema radial, ya que los potenciales disminuyen al dispersarse la corriente de falla por varias trayectorias en paralelo.
- c) Sistema de malla. El sistema de malla es el más usado actualmente en las subestaciones eléctricas. Consiste, como su nombre lo indica, en un arreglo de conductores perpendiculares formando una malla o retícula (aprox. 4/0 AWG en adelante) a la cual se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos. En el perímetro de la malla generalmente se colocan varillas o electrodos de tierra. Este sistema es el más eficiente ya que se limitan los potenciales originados por la circulación de la corriente de falla, este sistema es el más caro de los tres tipos.

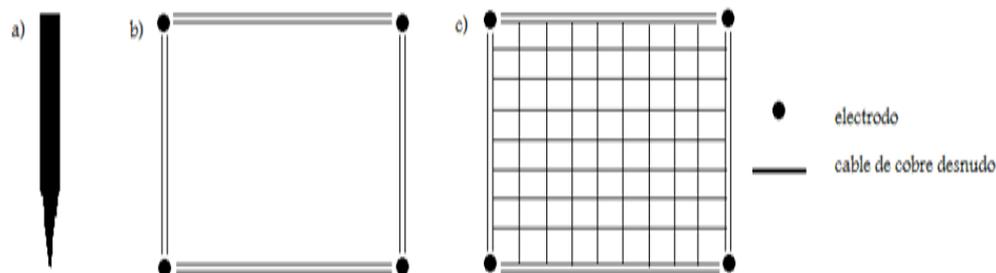


fig. 2.7 configuraciones básicas de las redes de tierra

CAPITULO 3 ANALISIS DE LAS POSIBLES FALLAS QUE SE PUEDEN PRESENTAR

La planificación, el diseño y la operación de los sistemas eléctricos de potencia, requieren de varios estudios para evaluar su comportamiento, confiabilidad y seguridad. Estudios típicos que se realizan son: flujos de potencia, estabilidad, coordinación de protecciones y para nuestro caso el estudio del cortocircuito. Un buen diseño debe estar basado en un cuidadoso estudio en que se incluye la selección de voltaje, adecuado tamaño del equipamiento y selección apropiada de las protecciones. La mayoría de estos estudios necesita de un complejo y detallado modelo que representa el sistema de potencia, generalmente establecido en la etapa de proyecto.

Cuando se produce una falla a tierra en una central o en una subestación (generalmente en las barras) el flujo de la corriente de tierra tanto en magnitud como en dirección, depende de la impedancia de las varias trayectorias posibles, el flujo se puede presentar entre porciones o partes de la red de tierra de la subestación, entre la red de tierra y la tierra circundante, a lo largo de los cables de tierra, o bien, una combinación de todas estas posibles trayectorias.

Desde el punto de vista del diseño de la red o malla de tierra de la subestación, el interés primario está en la máxima corriente de falla esperada hacia la malla de tierra de la subestación, especialmente aquella porción desde o hacia la tierra remota durante el tiempo de vida del diseño instalado

3.1 Naturaleza y causas de las fallas

Los sistemas eléctricos están expuestos a diferentes contingencias (condiciones anormales de operación) tales como sobretensiones debidas a descargas atmosféricas (fallas externas), fallas internas (propias del sistema), sobretensiones por maniobra (conexión o desconexión) de interruptores en las redes, pérdidas de carga etc. Y a otros tipo de fallas que pueden tener su origen en las anteriores como son los cortocircuitos en los distintos puntos de las instalaciones.

Con el objeto de proteger al personal y a los equipos mismos, se deben adoptar medidas de protección para evitar en lo posible los accidentes o pérdidas de suministro de energía, según sea el caso. Estas medidas de protección forman parte del diseño o proyecto de los sistemas e instalaciones eléctricas y cubren una gama muy amplia en posibilidades, por lo que es necesario establecer diferencias básicas y que se pueden agrupar como:

- 1.- protección contra sobretensiones de origen atmosférico (fallas externas)
- 2.- protección contra fallas internas en las instalaciones y que son básicamente cortocircuitos o condiciones anormales de operación del sistema; este tipo de protección consta de relevadores, sistemas de tierra entre otros.

Como se ha mencionado anteriormente los sistemas eléctricos están constituidos por distintos elementos que son: generadores, transformadores, líneas de transmisión, interruptores, redes de distribución etc.

Desde el punto de vista de la protección es importante disponer de datos estadísticos sobre la ocurrencia de fallas a fin de poder aplicar mejor los criterios de protección

Las fallas de línea a tierra son muy comunes y pueden ser causadas en distintas formas, no así la falla trifásica cuyo principal origen son los errores humanos.

El corto circuito (que es una falla) es una situación indeseable en un sistema eléctrico pero que lamentablemente se puede presentar eventualmente teniendo diversos orígenes como por ejemplo una sobretensión por descarga atmosférica, una falla de aislamiento por envejecimiento prematuro, alguna maniobra errónea, un error humano etc. Y en estas condiciones se debe estar en posibilidad de conocer en todos los puntos de una instalación las magnitudes de las corrientes de corto circuito.

3.2 Determinación de la corriente máxima de la red de tierra

Para determinar el valor correcto de la corriente máxima de malla I_G para el cálculo del sistema de tierra de la planta y subestación se considera lo siguiente:

1.- Evaluar el tipo de localización de aquellas fallas a tierra que producirán los mayores flujos de corriente entre la malla y el terreno circundante produciendo la mayor elevación de potencial con respecto a tierra y los mayores gradientes de potencial en el área considerada.

2.- Determinar el factor de la división de la corriente de falla S_f para cada uno de los tipos de falla seleccionados en el inciso anterior y establecer los valores correspondientes de corriente simétrica de malla I_g .

3.- Para cada uno de los tipos de falla y basado en su tiempo de duración t_p , se determina el valor del factor de decremento D_f para los efectos de asimetría de la onda de corriente de falla.

4.- Seleccionar el valor más grande del producto $D_f * I_g$ y por lo tanto la peor condición de falla y establecer el valor del factor de protección C_p para obtener los márgenes para el crecimiento futuro del sistema.

En caso de contar con el valor de la corriente de corto circuito, este se utilizara para determinar los demás parámetros del sistema de tierra.

Para determinar la corriente máxima de la red de tierra, es necesario hacer un análisis de la corriente simétrica de malla y del factor de la división de corriente.

La corriente simétrica es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye de la malla de tierra hacia el terreno que la rodea. Puede expresarse como:

$$I_g = S_f * I_f \quad [3.1]$$

I_g = Corriente simétrica de malla (A)

I_f = Corriente simétrica de falla a tierra (A)

S_f = Factor de la división de corriente que relaciona la magnitud de la corriente de falla con la parte de esta corriente que fluye de la malla hacia el terreno sin unidades y que $I_f = 3I_0$

Para el factor de la división de corriente de la ecuación anterior [3.1] despejamos S_f y sustituyendo $I_f = 3I_0$ tenemos:

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \quad [3.2]$$

I_g = Corriente simétrica de malla (A)

I_f = Corriente simétrica de falla a tierra (A)

I_0 = Corriente de secuencia cero en el punto de falla (A)

S_f = Factor de la división de corriente que relaciona la magnitud de la corriente de falla con la parte de esta corriente que fluye de la malla hacia el terreno sin unidades.

La máxima corriente de falla que pueda circular entre una red del sistema de tierra y el terreno que la rodea, queda determinada por la corriente de falla asimétrica eficaz calculada tomando en cuenta los cambios futuros del sistema de potencia, es decir:

$$I_G = D_f * I_g \quad [3.3]$$

I_G = Es la corriente máxima de malla (A)

I_g = Es la corriente simétrica de malla en (A)

D_f = Factor de decremento para el tiempo de duración de la falla (t_c), que está en función del valor de la relación de reactancia (X) y de resistencia (R) en el punto de falla. Si el tiempo de la duración de la corriente es mayor o igual a 1 segundo o la relación X/R en el punto de localización de la falla es menor que 5, el factor de decremento puede despreciarse, es decir $D_f = 1$

Una nota importante que se debe de tener en cuenta es que en algunos casos (rara vez), donde el factor de la división de corriente S_f es mayor que 1, en la formula [3.3] solo se le agrega el factor de la división de corriente S_f . $IG = D_f * S_f * I_g$

3.3 factor de decremento D_f y efecto de la asimetría

En los estudios de corto circuito los valores que se obtienen son las magnitudes de la corriente simétrica eficaz, pero en el diseño de un sistema de tierra se debe considerar la corriente asimétrica, por lo que se requiere tomar en cuenta un factor de decremento para incluir en el valor de la corriente de falla obtenido, el efecto de desplazamiento de la componente de corriente directa

Como un cortocircuito ocurre en forma aleatoria con respecto a la onda de tensión y como el contacto accidental puede existir en el instante en que se inicia la falla, para obtener la condición más severa, es necesario considerar, en el diseño del sistema de tierra, que la máxima magnitud de la componente de corriente directa está presente en el momento de ocurrir el contacto accidental y que la componente de corriente alterna no decrece con el tiempo permaneciendo en su valor inicial.

Como el umbral de fibrilación está basado en una corriente senoidal simétrica de amplitud constante, es necesario determinar un valor eficaz (rms) equivalente de la onda de corriente asimétrica de corto circuito, para el tiempo máximo de liberación de la falla.

Ya que el diseño de la red de tierra debe considerar la corriente asimétrica, debemos encontrar un factor llamado de decremento D_f el cual tomara en cuenta el efecto de desplazamiento de la componente de cd. (corriente directa)

La máxima corriente de malla I_G , como se describió anteriormente, es la máxima corriente asimétrica que fluye entre la malla de tierra y el terreno que lo rodea.

Esta corriente incluye la corriente simétrica I_g , así como una corrección para la componente de corriente directa. Esta corriente decae exponencialmente y se le conoce como desplazamiento de la corriente cd.

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}} \right)} \quad [3.4]$$

t_f = Duración de la falla (s)

T_a = Constante de tiempo subtransitoria (s)

D_f = Factor de decremento para el tiempo de duración de la falla (t_f), que está en función del valor de la relación de reactancia (X) y de resistencia (R) en el punto de falla. Si el tiempo de la duración de la corriente es mayor o igual a 1 segundo o la relación X/R en el punto de localización de la falla es menor que 5, el factor de decremento puede despreciarse, es decir $D_f = 1$

Se presenta en la tabla 3.1 de factor de decremento los diferentes valores de X/R del siguiente rango la selección de t_f deberá corresponder a un menor tiempo de liberación de la falla en subestaciones de transmisión y para subestaciones de distribución tiempos de liberación de falla mayores. Valores típicos de t_f se recomienda entre 0.25 a 1.0 s. Un valor usual es 0.5 s.

El factor de decremento es para un tiempo de duración de la falla y para una relación X/R específicos en donde:

$$X = X_1 + X_2 + X_0$$

$$R = R_1 + R_2 + R_0$$

La X_1 y la R_1 son las componentes de la impedancia subtransitoria equivalente en el punto de localización de la falla.

Duración de la falla t_f		Factor de decremento D_f			
Segundos	Ciclos a 60h	X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R=40
0.00833	0.5	1.576	1.628	1.675	1.688
0.05	3.0	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6.0	1.125	1.232	1,316	1.378
0.20	12.0	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18.0	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24.0	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30.0	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45.0	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60.0	1.013	1.026	1.039	1,052

Tabla 3.1 valores típicos de factores de decremento para diferentes tiempos de liberación de la falla y relaciones X/R

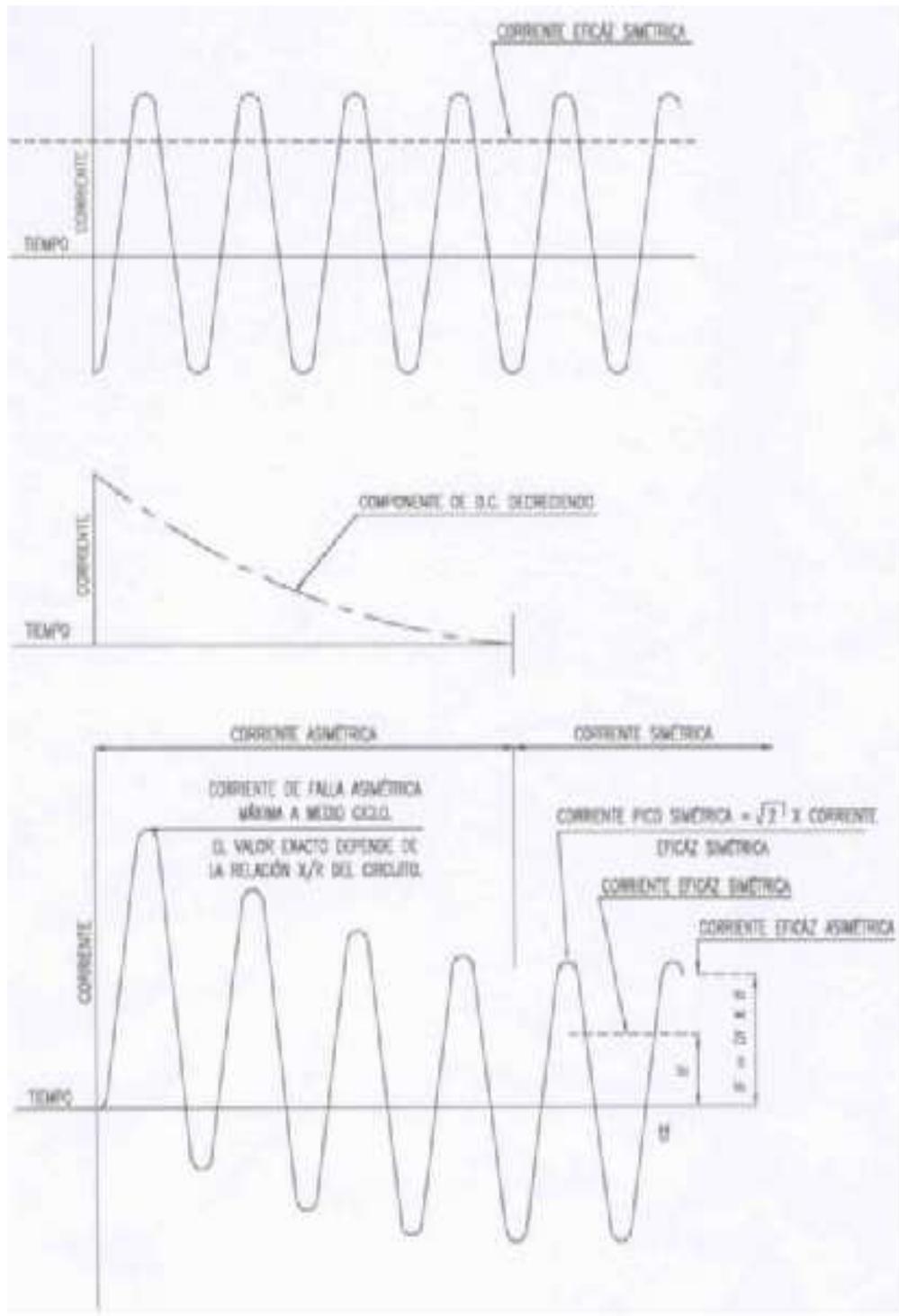


Fig. 3.1 Relación entre valores reales de corriente de falla I_f y valores D_f para un tiempo de duración de la falla.

3.4 Tipos de fallas

En un sistema eléctrico de potencia en la realidad existe la posibilidad de que se presenten diferentes tipos de fallas por corto circuito en general se pueden mencionar las siguientes:

- a) falla de línea a tierra (fase a tierra)
- b) falla de línea a línea (fase a fase)
- c) falla de dos líneas a tierra
- d) falla trifásica

La distribución de ocurrencia de las fallas de cortocircuito tiene aproximadamente la forma siguiente:

- a) falla de línea a tierra, con una probabilidad de ocurrencia del 85%
- b) falla de línea a línea, con una probabilidad de ocurrencia del orden del 8%
- c) falla de dos líneas a tierra, con una probabilidad de ocurrencia del 5%
- d) falla trifásica, con una probabilidad de ocurrencia del orden del 2% o menor

Las fallas de línea a tierra son muy comunes y pueden ser causadas en distintas formas, no así la falla trifásica cuyo principal origen son los errores humanos.

La falla por corto circuito que tiene la probabilidad de ocurrencia mayor es la denominada de línea a tierra (falla monofásica) y en orden descendente seguirá la de línea a línea quedando en último término la falla trifásica cuya ocurrencia se presenta principalmente por causas accidentales.

Con propósitos de determinación de las características del equipo de protección así como la protección misma y los estudios de esfuerzos electrodinámicos en una subestación eléctrica normalmente se efectúan estudios de corto circuito para fallas:

- a) de línea a tierra (monofásica)
- b) trifásica

La primera por ser la más probable de ocurrir como ya se mencionó y la segunda porque al pasar de ser la menos probable en ocurrencia es la que puede someter a los equipos, las máquinas y aparatos a los esfuerzos más severos y además desde el punto de vista analítico resulta la más fácil de estudiar y sus resultados son bastante satisfactorios para las distintas aplicaciones especialmente en instalaciones eléctricas de distribución o las denominadas instalaciones y subestaciones tipo industrial.

Por las razones anteriores solo se pondrá atención al estudio de corto circuito para fallas trifásicas y para fallas de línea a tierra (monofásicas) De estos dos tipos de falla la de mayor ocurrencia y mayor magnitud de corriente es la de una fase a tierra (falla monofásica), por lo que es el tipo de falla que normalmente se utiliza. sin que esto quiera decir que el análisis completo para un sistema no considere las otras fallas para analizar el comportamiento del sistema bajo estudio bajo diferentes condiciones por corto circuito.

3.4.1 SOBRECORRIENTES

En los circuitos eléctricos pueden presentarse sobrecorrientes, es decir, corrientes mayores a las que soportan los equipos y cables, las cuales dañan a dichos equipos y cables, por que producen un sobrecalentamiento debido al efecto joule que menciona que la corriente que circula por un conductor genera un calor que esta descrito por la siguiente formula:

$$Q = I^2 R \quad [3.5]$$

Q = Perdida de energía en forma de calor en el equipo o cable (W)

I = Corriente que pasa por el equipo o cable en (A)

R = Resistencia eléctrica del equipo o del cable (Ω)

Por lo que si la corriente adquiere valores excesivos, la cantidad de calor puede ser tal que puede fundir casi instantáneamente los conductores del circuito, siendo este fenómeno es más apreciable en un cortocircuito.

La temperatura de un conductor se incrementa rápidamente bajo las condiciones de falla. Esto se debe a que el conductor no tiene la capacidad para disipar el calor tan rápido como se está generando. Las sobrecorrientes son producidas por tres causas: sobrecargas, cortocircuitos y fallas a tierra.

3.4.2 FALLA A TIERRA

Son contactos que se producen entre un conductor en tensión eléctrica o vivo y una parte metálica de un equipo o de cualquier objeto, la cual no está diseñada para conducir corriente en condiciones normales. El contacto es provocado por una falla de aislamiento que existe entre la parte metálica y el conductor con tensión. Este tipo de fallas pueden ser muy peligrosas e incluso pueden provocar la muerte.

Para evitar que la corriente pase a través del cuerpo de una persona cuando se produce una falla a tierra, se aterrizan las partes metálicas o conductoras de electricidad de los equipos o de cualquier objeto que no estén diseñadas para conducir corriente en condiciones normales y que tienen riesgo de entrar en contacto con conductores vivos o de fase.

El aterrizaje o conexión a tierra también se lleva a cabo para evitar que se presenten tensiones peligrosas en las partes metálicas o conductoras de equipos o de cualquier objeto que no están diseñadas para conducir corriente en condiciones normales, ya que estas tensiones pueden presentarse no solo por el contacto de conductores vivos con las partes metálicas o conductoras, si no también por otras causas, como puede ser la inducción eléctrica.

Cuando se presenta una falla a tierra en un sistema aterrizado, la corriente debe retornar del punto de la falla a la fuente de corriente de falla a tierra. Para esta corriente de retorno, puede haber mas de una trayectoria y puede retornar a tierra a través de las trayectorias metálicas (conductoras) entre el punto de falla y la fuente o bien, una combinación de ambas.

Otra consideración es que cuando las barras de una subestación o una línea de transmisión fallan a tierra, el flujo de la corriente de tierra tanto en magnitud como en dirección, depende de la impedancia de varias trayectorias posibles, el flujo se puede presentar entre porciones o partes de la red de tierra de la subestación, entre la red de tierra y la tierra circundante, o a lo largo de los cables de tierra o bien, una combinación de todas estas posibles trayectorias.

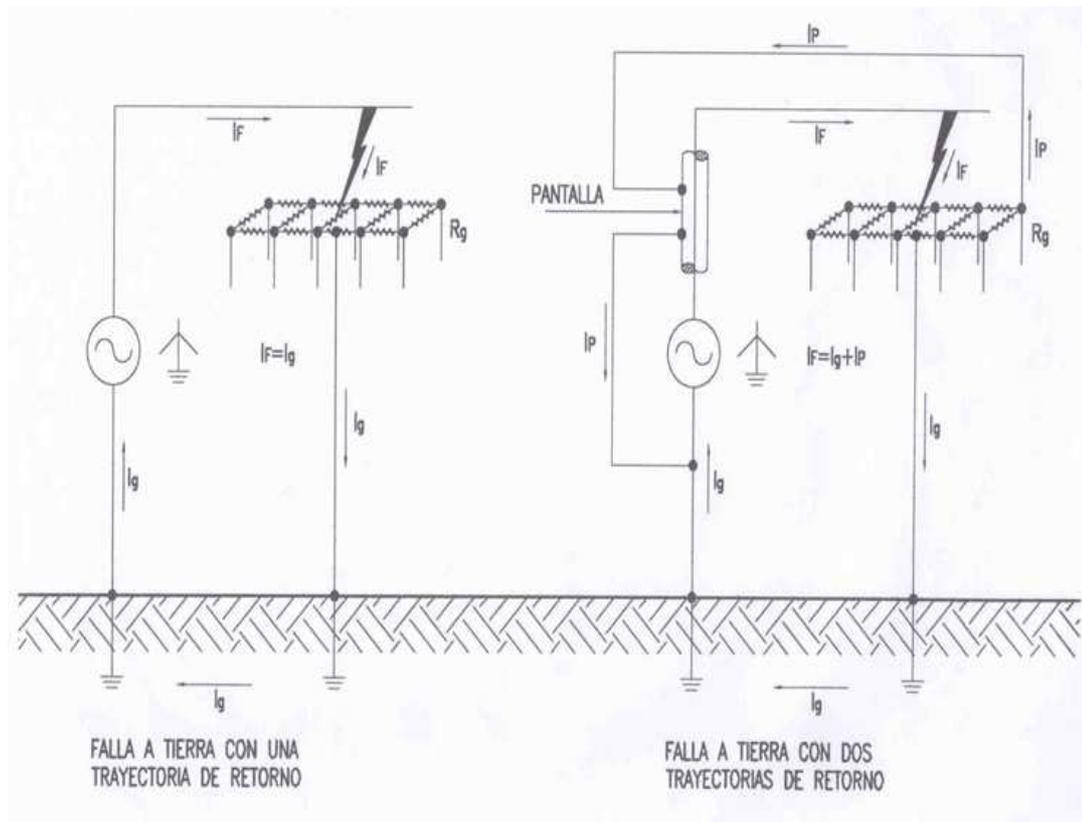


Fig. 3.2 falla a tierra

3.4.3 CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO

El corto circuito (que es una falla) es una situación indeseable en un sistema eléctrico pero que lamentablemente se puede presentar eventualmente teniendo diversos orígenes como por ejemplo una sobretensión por descarga atmosférica, una falla de aislamiento por envejecimiento prematuro, alguna maniobra errónea, un error humano etc. Y en estas condiciones se debe estar en posibilidad de conocer en todos los puntos de una instalación las magnitudes de las corrientes de corto circuito.

Los estudios de corto circuito son necesarios en los sistemas eléctricos en todas sus etapas, es decir desde la generación hasta la utilización de la energía eléctrica por lo que es conveniente establecer en primera instancia para que sirve este estudio y en que nivel lo debe tratar un proyectista.

Desde el punto de vista de diseño de subestaciones eléctricas es conveniente saber en que nivel se parte para la realización de estos estudios ya que en cualquier caso una subestación eléctrica es parte integrante de un sistema eléctrico y de acuerdo con la clasificación indicada existen desde los elevadores en las plantas generadoras para elevar la tensión hasta las reductoras secundarias en las redes de distribución, entonces es común que se efectúen estudios de corto circuito a un nivel sistema, por ejemplo considerando todas las plantas generadoras subestaciones y las líneas de transmisión hasta de 230 y 400 KV. Estudiando la red por computadora digital para determinar las corrientes y potencias de falla (por lo general para fallas trifásicas y de línea a tierra) en todos los buses del sistema con lo que a partir de estos niveles se pueden calcular las corrientes y potencias de fallas en los niveles inferiores de tensión de tal forma que por ejemplo un proyecto de una subestación de 400 KV. No requiere de hacer un estudio de corto circuito para todo el sistema, basta con que se le pregunte a la compañía suministradora de energía eléctrica (CFE) o a la oficina de estudio de redes eléctricas (si el proyecto es en la propia compañía) cuales son las corrientes y potencias de corto circuito (para las fallas deseadas) en el punto de la instalación y a partir de esta información se hace el estudio de corto circuito propio de la subestación.

En función de lo anterior se observa que es importante para cualquier instalación eléctrica hacer el estudio del corto circuito por lo que es necesario saber en principio que elementos intervienen y en que forma así como el nivel de detalle requerido en cada caso.

Con relación al nivel al cual se debe enfocar el estudio como ya se mencionó antes un estudio de corto circuito para todo el sistema considerando por ejemplo los niveles de 400, 230 y 115 KV. En la transmisión se debe hacer por computadora digital necesariamente por la magnitud de la red y la cantidad de elementos que interviene, estos estudios son motivos de otras publicaciones relacionadas con el análisis de los sistemas eléctricos de potencia, a menor nivel desde luego que los estudios de corto circuito también se pueden realizar por computadora digital sin ser esto un factor limitativo.

Un estudio de corto circuito se inicia siempre con un diagrama unifilar del sistema por estudiar en donde se indiquen todos los elementos que van a intervenir,

especialmente las fuentes y elementos pasivos dando los valores de potencias, tensiones e impedancias siempre que sea posible.

Para analizar el estudio de corto circuito se mencionan tres métodos:

- a) método de las componentes simétricas
- b) el método del bus finito
- c) el método de los mva.

Un cortocircuito es un contacto producido entre dos o más conductores de un circuito, provocado por una falla del aislamiento que existe entre ellos. Como su nombre lo indica, la corriente sigue el camino más corto, es decir, se crea un circuito de mucha menor resistencia, lo que produce que la corriente se eleve a valores muy altos (debido a la ley de ohm).

El objetivo de un estudio de corto circuito, es proporcionar información sobre corrientes y voltajes al ocurrir una falla en cualquier punto del sistema eléctrico. Esta información se requiere para determinar las características seleccionar el calibre de conductores y diseñar una red de tierra entre otros, los cuales deberán reconocer la existencia de una falla e iniciar la operación de los dispositivos de protección, asegurando así la mínima interrupción en el servicio y evitando daños a los equipos y personas.

Desde el punto de vista de sobretensiones, el estudio de corto circuito nos permite calcular los voltajes con respecto a tierra que se presentan en el sistema cuando ocurren cierto tipo de fallas.

En sistemas de distribución, para los efectos de evaluar las máximas corrientes de fallas, solo se calculan las corrientes de cortocircuito trifásico y monofásico. Las fallas monofásicas a tierra pueden generar corrientes de falla cuya magnitud puedan superar a la corriente de falla trifásica (condición muy común) sin embargo, esto es más frecuente en sistemas de transmisión y distribución en media y alta tensión, sobre todo cuando la falla se ubica cerca de la subestación.

La duración del cortocircuito es el tiempo en segundos o ciclos durante el cual, la corriente de cortocircuito circula por el sistema. El fuerte incremento de calor generado por la magnitud de corriente, puede destruir o envejecer los aislantes del sistema eléctrico, por lo tanto es de vital importancia reducir este tiempo al mínimo mediante el uso de las protecciones adecuadas.

La corriente de secuencia cero para una falla de fase a tierra está determinada por la siguiente ecuación:

$$I_0 = \frac{E}{3R_1 + R_1 + R_2 + R_0 + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad [3.6]$$

I_0 = Corriente de secuencia cero en el punto de falla (A)

E = Tensión de fase a neutro en el punto de falla (V)

R_f = Resistencia de falla estimada (Ω)

R_1 = Resistencia de secuencia positiva equivalente del sistema (Ω)

R_2 = Resistencia de secuencia negativa equivalente del sistema (Ω)

R_0 = Resistencia de secuencia cero equivalente del sistema en (Ω)

X_1 = Reactancia de secuencia positiva equivalente del sistema (Ω)

X_2 = Reactancia de secuencia negativa equivalente del sistema (Ω)

X_0 = Reactancia de secuencia cero equivalente del sistema (Ω)

En el cálculo de I_0 normalmente se considera la condición más desfavorable, por lo que:

$$R_f = 0$$

R_f = Resistencia de falla estimada (Ω)

La magnitud de la corriente simétrica eficaz para una falla de fase a tierra está definida por la siguiente expresión:

$$I_f = 3I_0$$

Para el diseño del sistema de tierra para subestaciones se utiliza la magnitud de corriente de cortocircuito para una falla de fase a tierra localizada en las barras colectoras de la subestación.

El Departamento de Planeación de la Gerencia de Programación realiza los estudios de cortocircuito en cada punto del sistema, en donde se encuentran instaladas las subestaciones y en los puntos en donde se instalarán las nuevas subestaciones. El valor máximo de la corriente de falla simétrica (rms) en el instante de inicio de la falla, se obtiene de cálculos de cortocircuito para la falla de fase a tierra, o bien, cuando se trata de sistemas más o menos complejos, haciendo uso de programas digitales. Esta corriente se modifica por un factor de corrección que tome en cuenta los decrementos de las componentes de corriente alterna y corriente directa.

En las figuras siguientes, se muestran algunos casos que gobiernan el flujo de corriente para las fallas a tierra. El caso más desfavorable para el flujo de corriente entre la malla de tierra de la subestación y la tierra circundante, en términos del efecto sobre la seguridad de la subestación, se debe determinar.

La fig. 3.3 muestra una falla local dentro de la subestación. La corriente de falla sigue el camino metálico (estructura) y se dirige hacia la red de tierra. La fig. 3.4 muestra una falla local dentro de la subestación con neutro aterrizado. La corriente total de tierra fluye hacia la red de tierra. La fig. 3.5 muestra una falla local en la subestación. El sistema esta conectado a tierra tanto en la subestación como en otros puntos. La corriente de falla regresa al neutro local a través de la red de tierras y a otros puntos remotos a través de la tierra

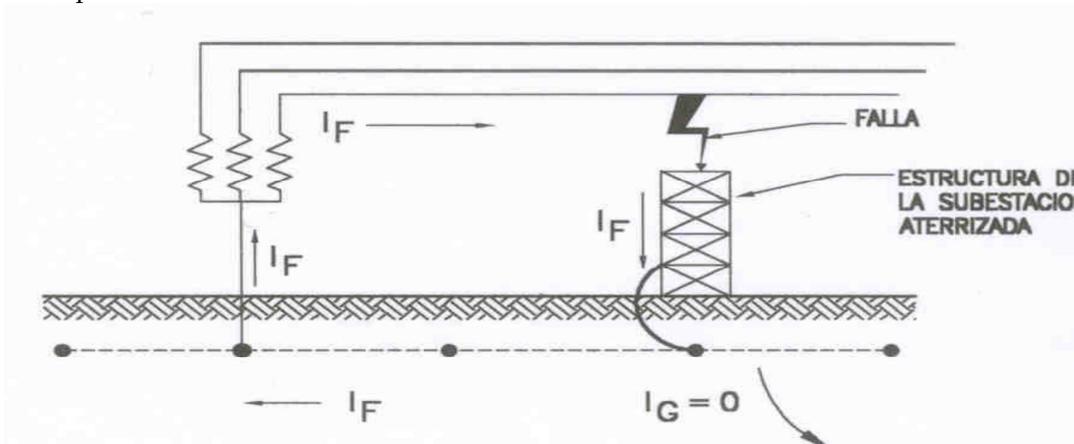


Fig. 3.3 falla local dentro de la subestación con neutro aterrizado localmente

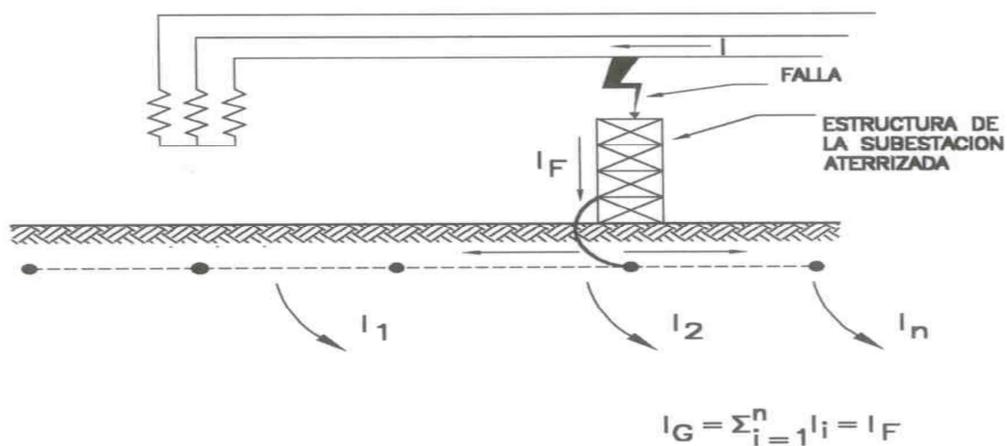


Fig. 3.4 falla local dentro de la subestación con neutro aterrizado remotamente

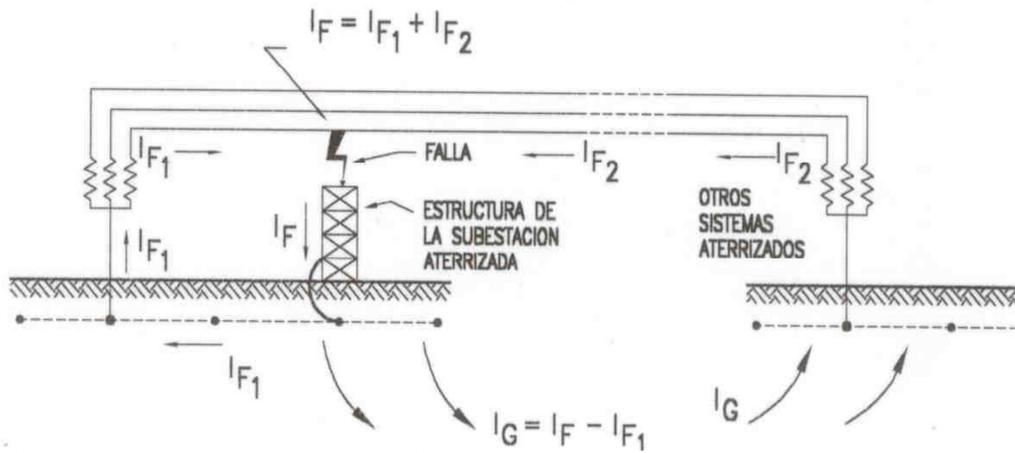


Fig. 3.5 falla local en la subestación, sistema aterrizado en la subestación y también en otros puntos

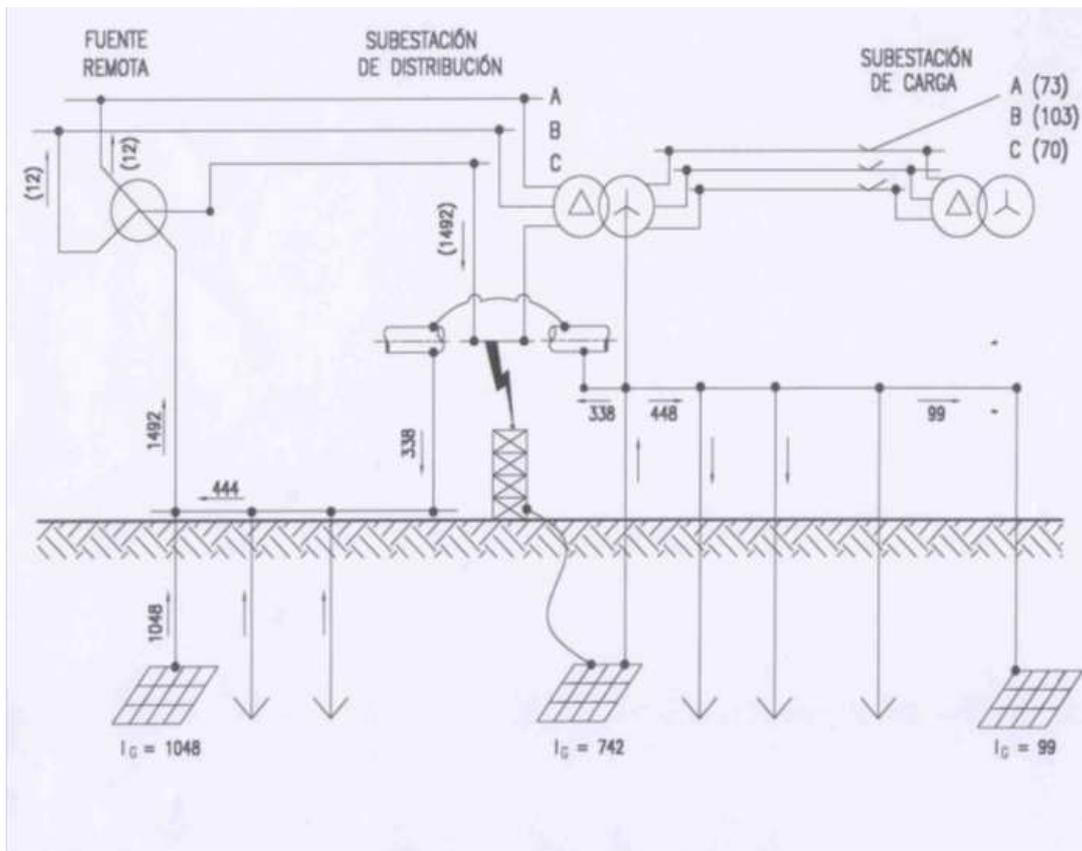


Fig. 3.6 división de corriente típica para una falla en el lado de alta tensión de una subestación de distribución

CAPITULO 4 CARACTERISTICAS Y SELECCIÓN DEL MODELO DEL SUELO

Los diversos componentes del suelo determinan el valor de la resistividad del terreno, por lo tanto cuando se tiene resistividad alta se considera un mal conductor y a su vez un buen aislante. La resistividad de un material puro es una característica del mismo que depende de su estado cristalino, temperatura y las variaciones de su estructura cristalina debido a tratamientos térmicos, deformaciones mecánicas o impurezas, pueden afectar considerablemente su resistividad. El suelo está formado por diferentes componentes como el óxido de aluminio, sílice, etc., con capas muy heterogéneas, huecos, mantos acuíferos, por lo cual su estado constantemente se afecta debido a las condiciones climatológicas como la lluvia, las heladas y las variaciones de temperatura.

La resistividad del terreno puede ser muy diferente de un lugar a otro y se afectará de acuerdo con la época del año en función de los siguientes parámetros: la composición propia del terreno, la estratigrafía, la granulometría, la concentración de las sales solubles, el estado higrométrico, la temperatura y la compactación.

Las estimaciones basadas en la clasificación del suelo dan únicamente una aproximación de la resistividad. Las pruebas de resistividad son obligadas. Estas deben realizarse en tantos lugares como sea necesario dentro del área por construir. En tal lugar y a una considerable profundidad el suelo raramente puede presentar resistividad uniforme.

Los suelos generalmente, tienen varias capas, cada una con diferentes resistividades. La variación de resistividad lateral es menor comparativamente con la variación de la resistividad horizontal. Las pruebas de la resistividad del suelo determinan alguna variación importante de la resistividad con respecto a la profundidad. El número de lecturas realizadas deberán ser tan grandes como grandes sean estas variaciones. Especialmente si algunas de las lecturas tomadas son tan grandes que seguramente pueden ocasionar problemas de seguridad.

Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, es deseable el incremento en el intervalo de los espaciamientos de prueba. La idea es que una estimación bastante exacta para grandes espaciamientos fijos puedan ser determinados por extrapolación. Esto es posible porque así como el espaciamiento de la prueba es incrementado, la fuente de corriente de la prueba penetra más y más a áreas distantes, en las direcciones horizontal y vertical, a pesar de la cantidad de trayectorias de corriente que se distorsionan debido a las variaciones de las condiciones del suelo.

La investigación en campo del lugar en que se va a ubicar el sistema de tierra, es esencial para determinar la composición general del suelo y obtener algunas ideas básicas acerca de su homogeneidad. Las muestras de campo para los estudios de mecánica de suelos son muy útiles, ya que proporcionan información sobre las diferentes capas del subsuelo y los materiales que las componen, dándonos una idea del intervalo de su resistividad. El valor de la resistividad del suelo que se debe

utilizar en el diseño de la red de tierra generalmente se determina con pruebas de campo.

Debido a que existen variaciones en el sentido horizontal y vertical en la composición del suelo, es conveniente realizar las pruebas de campo en varios lugares del terreno. La mayor cantidad de datos obtenidos en las pruebas, nos permitirá seleccionar con mayor precisión el modelo del suelo a utilizar en el diseño de nuestro sistema de tierra.

4.1 Características generales

Existe una diversidad de suelos y las características de estos son tan diferentes que algunos no conducen la electricidad, es decir son aislantes, sin embargo la gran mayoría de ellos son conductores y especialmente buenos en épocas húmedas. Por ejemplo, en la Ciudad de México, en general el suelo es muy heterogéneo, teniendo zonas localizadas como el sur con roca volcánica, tepetate y arena en el poniente, tierra húmeda en el oriente y roca o tepetate en el norte.

Cuando en el suelo se entierra un electrodo de tierra, la mayoría de los suelos se comportan como un conductor de una determinada resistencia, combinada en paralelo con un dieléctrico, excepto en suelos muy resistivos, cuando se presentan ondas de muy alta frecuencia, el suelo se comporta como una resistencia pura debido a que la corriente de carga es despreciable en comparación con la corriente de fuga. La resistividad del suelo, básicamente esta determinada por el tipo de terreno, el contenido de humedad, su composición química y la temperatura entre otros factores y se mide en ohms-m.

Los gradientes de tensión que pueden ser de varios kV/cm, no afectan su composición a menos que excedan los valores críticos que están determinados por el tipo de material del suelo. Una vez excedido el gradiente, se provoca un arco en la superficie del electrodo de tierra que se introduce en el suelo, hasta que los gradientes se reducen a valores que puede soportar el terreno. Para un diseño adecuado de la red de tierra se asume que los gradientes que se presentan no exceden las tensiones de toque y depaso críticas.

Las corrientes en condiciones de falla que fluyen por los electrodos hacia el terreno circundante, pueden afectar la resistividad del suelo en la vecindad de los electrodos de tierra, de tal manera que sus características térmicas y el contenido de humedad determinarán si la corriente de una magnitud y duración, causará que el terreno pierda humedad y se incremente su resistividad. Se considera como aceptable que no se exceda la densidad de corriente en $200 A/m^2$ en un segundo.

Por otra parte, el suelo conduce electrolíticamente y la resistividad de la gran mayoría de los terrenos, se eleva considerablemente cuando se reduce el contenido de humedad a menos del 15% del peso del suelo. La cantidad de humedad en el suelo depende del tamaño y variabilidad de las partículas y de su compactación.

Como se muestra en la curva 2 de la Fig. 4.1 al exceder aproximadamente el 22% de humedad, la resistividad del suelo tiene poca variación y considerando la curva 3 donde se grafica el comportamiento de un suelo arcilloso con 15.2% de humedad por peso, se aprecia que el efecto de la temperatura sobre la resistividad del suelo se puede despreciar cuando se encuentra arriba del punto de congelación (0° C), y por debajo de este la resistividad se incrementa rápidamente. Los compuestos químicos y en especial las sales solubles, ácidos o álcalis en el suelo, afectan considerablemente la resistividad. Para un suelo con 30% de humedad por peso al cual se le agregó sal, se aprecia en la curva 1 el efecto en la resistividad.

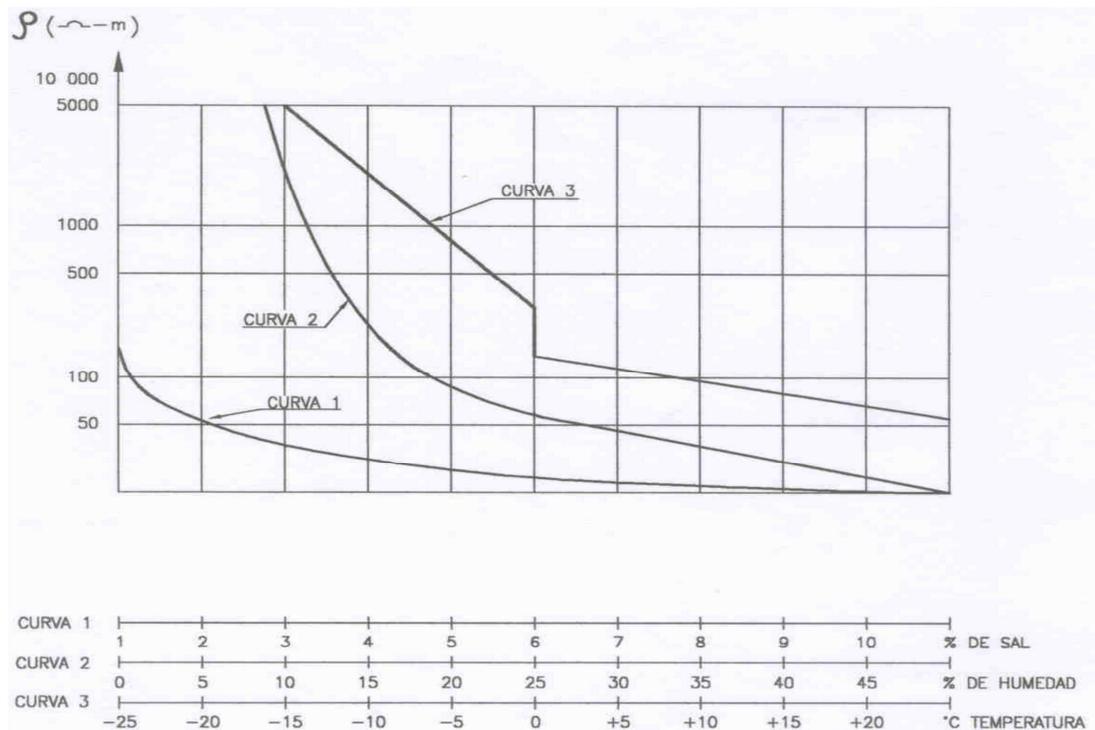


Fig. 4.1 efectos en la resistividad del terreno considerando el contenido de sal, humedad y temperatura

4.2 Recomendaciones para la medición de la resistividad

El aparato que se utiliza generalmente para realizar las mediciones de la resistividad del terreno, es el “Megger de Tierra” y el método más usual es el de Wenner. Las mediciones deben realizarse en el área donde se instalará la subestación, incluyendo los terrenos anexos que conforman las instalaciones auxiliares. Para las mediciones con el método Wenner, se debe considerar lo siguiente:

- a) Disponer las varillas en línea recta a una separación y profundidad uniforme, sin embargo para distancias grandes de separación entre varillas, se puede presentar inestabilidad en el instrumento, por lo cual es recomendable aplicar el método de Schlumberger.

- b) Cuando se tienen terrenos de alta resistividad (mayores de 3000 Ω -m), se pueden presentar inestabilidades en el instrumento.
- c) Se deben efectuar mediciones periódicamente, con objeto de verificar el estado del sistema de tierra, y preferentemente en época de estiaje a la temperatura más calurosa.
- d) Es necesario verificar periódicamente la calibración del instrumento.
- e) Trazar diagonales en cada sección que va a ser muestreada como se indica en la Fig. 4.2 seleccionar una diagonal para que sobre esta se realicen las mediciones
- f) Partiendo del centro de la diagonal y a lo largo de la misma colocar los cuatro electrodos de prueba (varillas) en el suelo a una profundidad mínima de 20cm. Formando una línea recta entre ellas, evitando la existencia de huecos alrededor de las varillas.
- g) Las terminales de corriente del instrumento C1 y C2 se conectan a los electrodos de prueba (varillas) en los extremos, y las de potencial P1 y P2 a los electrodos de prueba (varillas) intermedias
- h) Se energiza el instrumento (megger) y se toman las lecturas respectivas de resistencia en Ω
- i) Se calcula la resistividad empleando las ecuaciones de resistividad del suelo. Antes de utilizar el instrumento se debe de comprobar su ajuste con dos o tres resistencias de diferentes valores conocidos.
- j) Se traza una línea de prueba en diagonal al área bajo análisis, y comenzando al centro de la línea se procede a variar la separación de las puntas de prueba del megger a 0.5, 1,2 y 3 metros como mínimo.
- k) Las lecturas obtenidas se reportan en un formato para la medición de resistividad, indicando la separación de los electrodos
- l) El valor de la resistividad media del terreno será el promedio del valor promedio de resistividad obtenido en cada sección, otra forma es realizar un promedio con los valores más alto y más bajo de las resistividades promedio.
- m) Cuando bajo el terreno se encuentren mantos friáticos, no es recomendable instalar las varillas a mucha profundidad y se requiere conservar entre ellas distancias cortas.

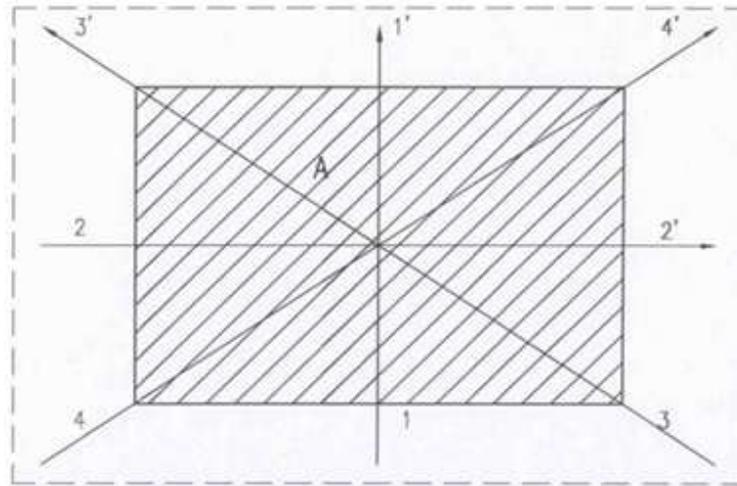


Fig. 4.2 direcciones y longitudes recomendadas para medir la resistividad del terreno

4.3 métodos para la Medición de la resistividad

Debido a la importancia de contar con una resistividad baja en el sitio de la subestación, es necesario determinar las características del suelo, que permitan definir que los componentes de este, serán adecuados para abatir la resistencia de la red de tierra de la subestación.

La resistividad del suelo basada en análisis estadísticos, permite solo una aproximación debido a que las características de una conexión a tierra, varía con las estaciones del año, por lo cual es necesario para el diseño adecuado de la red de tierra, recopilar datos de campo en el terreno de la subestación, realizando mediciones en diversos lugares del suelo, considerando las posibles capas del subsuelo para definir un modelo homogéneo o un modelo estratificado, ya que las variaciones horizontales y verticales provocan que se distorsione la trayectoria de la corriente de falla por drenar.

Las mediciones deben incluir datos sobre temperatura, contenido de humedad, tipo de terreno, profundidad y estación del año al realizar la medición, concentraciones de sales, así como la probable existencia de objetos conductores enterrados, por lo que es necesario en estos casos, realizar varias mediciones en espacios cortos de terreno.

Tipo de tierra	Resistividad promedio
Tierra orgánica mojada	10
Tierra arcillosa	100
Tierra arenosa húmeda	200
Tierra arenosa seca	1000
Roca	10000

Tabla 4.1 resistividades promedio de varios tipos de suelo

4.3.1 METODO DE LOS CUATRO PUNTOS (WENNER)

Para efectuar la medición de resistividad del suelo es necesario hacer circular una corriente por el mismo, el método más usual es el de frank-wenner denominado también método de los 4 electrodos, el equipo de medición utilizado es el medidor de rigidez dieléctrica (megger).

El método de los 4 puntos de wenner, es la técnica más utilizada comúnmente. Consiste básicamente en 4 electrodos enterrados dentro del suelo a lo largo de una línea recta, a igual distancia A de separación, enterrados a una profundidad B . La tensión entre los dos electrodos interiores de potencial es medido y dividido entre la corriente que fluye a través de los otros 2 electrodos externos para dar un valor de resistencia mutua R en Ω .

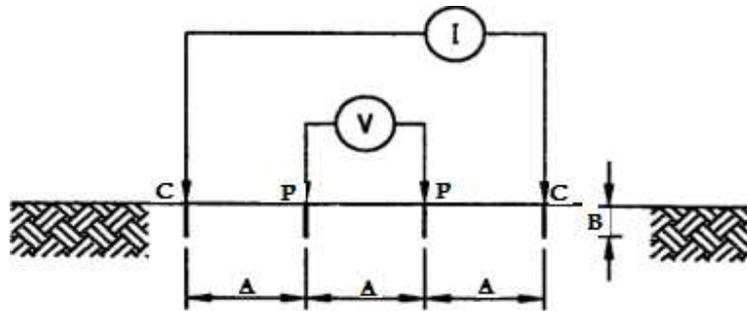


Fig. 4.3 medición de la resistividad del terreno por el método de wenner

A = Separación entre varillas adyacentes (m)

B = Profundidad de los electrodos (m)

C = Electrodo de corriente

P = Electrodo de potencial

Si la relación A/B es menor a 20 entonces se utilizara la siguiente fórmula para calcular la resistividad del terreno

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad [4.1]$$

ρ = Resistividad aparente del suelo en Ω -m

R = Resistencia medida del terreno en Ω

A = Distancia entre electrodos o varillas (m-cm)

B = Profundidad de los electrodos (m-cm)

Si “A y B” se miden en cm o en m. Y la resistencia R en Ω , la resistividad estará dada en $\Omega - cm$ o en $\Omega - m$ respectivamente.

Si la longitud “B” es mucho menor que la longitud “A”, es decir cuando la relación a/b sea mayor o igual a 20, puede suponerse $B=0$ y la fórmula se reduce a

$$\rho = 2\pi AR \quad [4.2]$$

ρ = Resistividad aparente del suelo en $\Omega - m$

A = Distancia entre electrodos o varillas (m-cm)

R = Resistencia medida del terreno en Ω

Con estas fórmulas se obtiene la resistividad promedio del terreno, también conocida como resistividad aparente.

4.3.2 METODO DE LOS CUATRO PUNTOS (SCHULMBERGER-PALMER)

Una desventaja del método de wenner es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los dos electrodos interiores cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes. Para medir la resistividad con espaciamientos muy grandes entre los electrodos de corriente, puede utilizarse el arreglo de la figura siguiente:

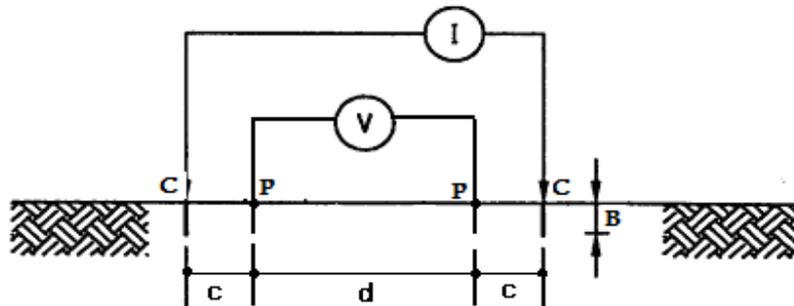


Fig. 4.4 medición de resistividad del terreno por el método de schlumberger-palme

C = Separación entre electrodos de corriente y potencial

B = Profundidad de los electrodos en m. o en cm.

d = Distancia entre electrodos de potencial

C = Electrodo de corriente

P = Electrodo de potencial

La corriente tiende a fluir cerca de la superficie para pequeños espaciamientos entre los electrodos, considerando que la mayor parte de la corriente que penetra depende del espaciamiento entre los electrodos. Así se asume que la resistividad medida para un espaciamiento entre electrodos “A” representa la resistividad aparente del suelo a una profundidad “B”. La información de las mediciones de resistividad pueden incluir datos de temperatura e información sobre las condiciones de humedad del suelo en el tiempo en que se realizó la medición. Todos los datos válidos sobre los conductores enterrados que ya se conocen o se suponen para el estudio del área, deberán anotarse en el plano de la red de tierra.

Los conductores desnudos enterrados que se encuentren en contacto con el suelo pueden invalidar lecturas realizadas por el método descrito si están bastante juntos de manera que se altere la trayectoria del flujo de corriente. Por esta razón, las mediciones de resistividad del suelo son de menor valor en un área en donde una red de conductores ya ha sido instalada, excepto, tal vez para mediciones poco profundas dentro o cerca del centro de una gran malla para tierra rectangular. En tales casos una lectura poco aproximada deberá ser tomada a corta distancia fuera de la red para tierra, con los electrodos de prueba en tal posición que minimicen el efecto de la red para tierra sobre las trayectorias de flujo.

Sin embargo, no es necesario hacer dichas consideraciones dentro de la red para tierra, tales anotaciones pueden ser utilizados por medio de una aproximación, especialmente si hay una razón para creer que el suelo en la totalidad del área es razonablemente homogéneo.

Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido.

La fórmula utilizada en este caso se puede determinar fácilmente. Si la profundidad de los electrodos es pequeña comparada con la separación “d” y “c” entonces la resistividad aparente puede calcularse como:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d} \quad [4.3]$$

ρ = Resistividad aparente del suelo (Ω -m)

c = Distancia entre electrodos de corriente y tensión (m)

d = Distancia entre electrodos de tensión (m)

R = Resistencia medida del terreno (Ω)

Además con valores grandes de d/l , las variaciones de los valores medidos debidas a irregularidades en la superficie se reducen dando mediciones más exactas.

4.3.3 METODO DE LOS TRES PUNTOS (CAIDA DE TENSION)

Este método consiste en hacer circular corriente entre dos electrodos fijos, uno auxiliar de corriente (C_2) y otro de prueba (C_1) y se mide la caída de tensión. Este método permite variar la profundidad del electrodo de prueba, considerando que este forma parte integral de la red de tierra de la subestación (Fig.4.5). Se tiene un tercer electrodo (varilla auxiliar de tensión P_2) el cual se ubica entre el de corriente y el de prueba y se desplaza para realizar diversas lecturas. Las varillas auxiliares o de referencia, se deben clavar a poca profundidad sobre una línea recta a partir del electrodo de prueba (perímetro del área de la red de tierra), en forma radial o perpendicular. Cuando la varilla auxiliar de tensión P_2 se encuentra en un área con variaciones de resistencia efectiva, los valores al desplazar esta varilla variarán notablemente debido a que se traslapan los diámetros de acoplamiento.

Considerando un suelo uniforme, para minimizar la interferencia entre electrodos, es conveniente localizar la varilla de tensión a 62% de la distancia entre las varillas de corriente y la de prueba. Este procedimiento es más preciso, pero está limitado debido a que solo se realiza una medición, y es útil para suelo uniforme. Este método debe de realizarse cuando esta finalizada la construcción del sistema de tierra, Si el valor medido es mayor al calculado, se debe instalar adecuadamente mas más conductor y más electrodos verticales hasta que la resistencia medida sea igual o menor a la calculada

$$\rho_c = \frac{2\pi L_E R}{\ln\left(\frac{4L_E}{r_E}\right) - 1} \quad [4.4]$$

L_E = Longitud del electrodo bajo prueba (m)

R = Resistencia medida del terreno (Ω -m)

r_E = Radio de la sección transversal del electrodo bajo prueba (m)

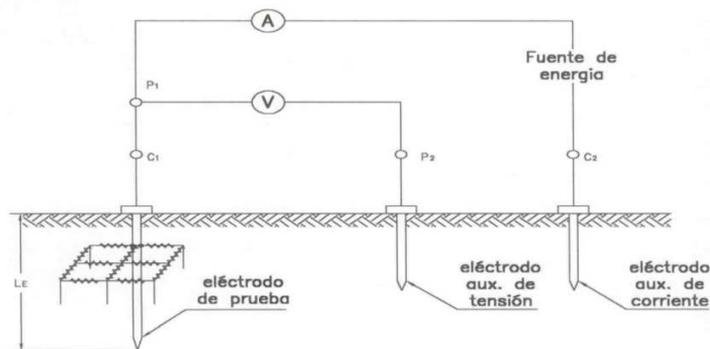


Fig. 4.5 método de caída de tensión para medir la resistividad del terreno

4.4 Modelo del suelo

Los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructurafísica del suelo además de las diferentes capas del que están compuestos en un lugar dado, están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas. Las variaciones del suelo en la naturaleza son graduales, excepto las derivadas de desastres. En los sistemas de tierra cuando nos referimos al modelo del suelo básicamente se contemplan 2 tipos de suelo (aunque en la realidad los suelos pueden tener más de dos capas) que son: modelo de suelo uniforme (una capa) y modelo de suelo de dos capas, este es el modelo más ampliamente usado y aceptado en la práctica.

Los cálculos preliminares para el diseño del sistema de tierra en una subestación, están determinados por el modelo del suelo seleccionado, el cual permite definir la resistividad aparente que identifica el comportamiento del terreno. La determinación de la resistividad del terreno debe obtenerse partiendo de las mediciones en el área de la subestación donde se instalara la red de tierra y así obtener la curva de resistividad resultante.

El suelo posee varias capas con diferentes composiciones y estructuras y su resistividad varía lateralmente y con la profundidad, dependiendo de su estratificación.

Existen tres modelos comúnmente usados para determinar la resistividad aparente, los cuales son una aproximación de las condiciones propias del terreno. Dos modelos de suelo uniforme y el modelo de dos capas que se desarrolla por métodos computacionales o gráficos

El modelo del suelo uniforme debe usarse cuando las variaciones entre capas son moderadas por lo cual la resistividad promedio del suelo puede calcularse con una primer aproximación con la expresión siguiente:

$$\rho_p = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \dots + \rho_n}{n} \quad [4.5]$$

ρ_p = Resistividad aparente promedio (Ω -m)

$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ = Resistividad aparente medida por el método de wenner empleando diversos espaciamentos y/o profundidades entre electrodos de prueba.

n = Número total de mediciones

También la resistividad promedio, para el modelo de suelo uniforme, puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$\rho_p = \frac{\rho_{\max} + \rho_{\min}}{2} \quad [4.6]$$

ρ_p = Resistividad aparente promedio (Ω -m)

ρ_{\max} = Resistividad aparente máxima medida (Ω -m)

ρ_{\min} = Resistividad aparente mínima medida (Ω -m)

Esta última expresión no se debe utilizar en sistemas de tierra que carecen de electrodos de puesta a tierra y además estos electrodos deben tener al menos laprofundidad para la cual se midió la resistividad que corresponde al valor ρ_p calculado por la ecuación anterior.

Por otra parte, la representación del suelo en dos capas, sobre todo cuando la resistividad varía significativamente, es una aproximación en diversos casos prácticos. El modelo de dos capas se desarrolla por métodos computacionales o gráficos

Diversos estudios han determinado que es posible obtener un modelo de la constitución del suelo mediante una representación de un terreno de dos capas con resistividades diferentes en la capa superior e inferior ρ_1 y ρ_2 respectivamente, es decir que la primer capa de suelo a cierta profundidad tiene un determinado valor uniforme y la segunda capa con una resistividad uniforme pero diferente, se considera con una profundidad infinita.

Los cambios abruptos en los límites de cada capa de suelo, están determinados por el factor de reflexión siguiente:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad [4.7]$$

K =Factor de reflexión

ρ_1 =Resistividad de la capa superficial (primer capa) (Ω -m)

ρ_2 =Resistividad de la capa inferior (segunda capa) (Ω -.m)

El factor de reflexión K tiene un valor positivo cuando la resistencia del suelo aumenta con la profundidad y un valor negativo cuando disminuye con la profundidad. El factor de reflexión (K) se usa principalmente en el análisis de un sistema de tierra cuando esta presente una capa de roca aislante, en este caso, la

resistividad de la capa de roca en la superficie es usada para el valor ρ_1 y la resistividad de la capa inferior es ρ_2 .

Existen varias técnicas para determinar la resistividad aparente utilizando el modelo equivalente de dos capas, obtenido con pruebas en sitio. Se puede determinar este modelo en forma aproximada, analizando la curva que resulta de graficar las mediciones de la resistividad aparente contra la profundidad del electrodo de prueba o también la resistividad aparente contra el espacio entre electrodos de prueba, empleando el método Wenner de medición, pero la tipificación del modelo de dos capas para un terreno en particular, requiere del uso de programas de computadora.

El definir la profundidad h_{cl} de la capa superficial de terreno, permite evaluar el grado de estratificación del terreno y así determinar la aplicación, en su caso, de las Ecuaciones. Para calcular la resistividad considerando un suelo uniforme. Como se mencionó, el factor de reflexión K para el modelo de dos capas, determina el compartimiento de la red de tierra, y asumiendo que la red de tierra se encuentra en la primer capa del terreno, cuando se tiene un factor K negativo ($\rho_1 > \rho_2$), es decir que la primer capa del suelo tiene mayor resistencia que la capa inferior, la densidad de corriente es más uniforme hacia el interior de los conductores que conforman la red de tierra, las tensiones de paso y de toque son más altas que para un suelo uniforme con resistividad ρ_1 y se abaten significativamente al agregar electrodos de tierra adicionales, por otra parte, la resistencia de la red de tierra será más alta que la correspondiente para suelo uniforme con una resistividad ρ_1 . Para valores medios de la profundidad h_{cl} de la capa superficial, prácticamente toda la corriente se descarga en esta primer capa de terreno. Cuando se tienen profundidades pequeñas de la red de tierra, para reducir los gradientes de tensión, es conveniente aumentar el mallado de la red y de esta manera se abate el efecto de la profundidad de la capa superficial y del factor K .

Cuando el factor de reflexión K es positivo ($\rho_1 < \rho_2$), las tensiones de paso y toque son generalmente más bajas que para un suelo uniforme con resistividad ρ_1 la densidad de corriente en los electrodos de tierra en la capa superior, es mayor que en las propias mallas de conductores y la resistencia de la red de tierra será más baja que la resistencia para un suelo uniforme con resistividad ρ_1 .

En general la resistencia del sistema de tierra, depende de la profundidad de la capa superficial y del coeficiente de reflexión (resistividad del terreno), pero se abate siempre que las capas del suelo tengan una mayor conductividad.

En la Tabla 4.2 se comparan los parámetros calculados empleando el modelo de suelo uniforme y el modelo de dos capas para dos tipos de suelo con factor K negativo y positivo.

Por otra parte, en la Tabla 4.3 se describen los resultados obtenidos, empleando el modelo de dos capas, variando la separación de los electrodos de prueba a , al medir la resistividad aparente del terreno por el método de Wenner. Se aprecia la notoria variación en el valor de la resistividad aparente, al incrementar la separación entre los electrodos de prueba; esto se atribuye fundamentalmente a la variación exponencial de la resistividad en función de la profundidad de la capa superficial, la cual determina el comportamiento de los electrodos de tierra para un suelo uniforme o para el modelo de dos capas. Cuando la profundidad de la capa superficial es apreciablemente mayor que la longitud de los propios electrodos de tierra, el comportamiento de estos, es muy similar al que tendrían cuando se entierran en un suelo uniforme con resistividad ρ_1

Tipo de suelo	Modelo de dos capas del suelo					Modelo del suelo uniforme			
	(Ω -m)	(m)	(Ω)	(v)	(v)	(Ω -m)	(Ω)	(v)	(v)
A (+) K	100,300	6.1	1.28	126	85	158	0.89	151	86
B (-) K	300,100	6.1	0.72	187	92	193	1.09	185	106

Tabla 4.2 parámetros calculados para los modelos de suelo uniforme y de 2 capas

Separación electrodos de prueba a		Tipo A de suelo (+) K		Tipo B de suelo (-) K	
(pies)	(m)	R (Ω)	ρ (Ω -m)	R (Ω)	ρ (Ω -m)
1	0.305	29.73	56.94	89.13	170.74
3	0.915	15.33	88.07	45.85	263.46
5	1.524	9.97	95.48	29.65	283.06
15	4.573	3.85	110.71	9.39	269.67
20	6.098	3.15	120.76	6.46	247.57
30	9.146	2.49	143.10	3.52	202.12
50	15.244	1.90	181.70	1.50	144.05

Tabla 4.3 Parámetros calculados con el modelo de dos capas para los tipos A y B de suelo de la Tabla 4.2, usando el método Wenner de medición

4.5 Resistencia total del sistema de tierra

Se puede evaluar la capacidad que un determinado sistema de tierra tiene en inyectar una corriente en el suelo, si se conoce su resistencia a tierra, que depende principalmente de la resistividad del sitio y de la forma de dimensionar los electrodos.

La resistencia de la red de tierra de la subestación es un factor muy importante para reducir los gradientes de tensión que se pueden presentar en condiciones de falla, debido a que la mayor densidad de corriente se presenta en la periferia de la red.

Por lo general, en subestaciones de transmisión y subtransmisión se pretende que el valor de la resistencia de la red de tierra sea menor que 1Ω . En subestaciones de distribución se considera aceptable entre 1 y 5Ω , pero desde luego se debe tratar de abatir lo más posible el valor de la resistencia.

Considerando una aceptable aproximación, el valor de la resistencia de la red de tierra, para suelo uniforme, se determina con la siguiente expresión:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad [4.8]$$

R_g = Resistencia de tierra (Ω)

ρ = Resistividad promedio del suelo ($\Omega\text{-m}$)

A = Área ocupada por la red para tierra (m^2)

Cuando se considera la longitud de los conductores de la malla (conductores horizontales) combinada con los electrodos de tierra, la resistencia es:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A} + \frac{\rho}{L_T}} \quad [4.9]$$

R_g = Resistencia de tierra (Ω)

ρ = Resistividad promedio del suelo ($\Omega\text{-m}$)

A = Área ocupada por la red para tierra (m^2)

L_T = Longitud total de los conductores enterrados (m)

La ecuación [4.9] permite calcular un valor de resistencia mayor que la medida en sitio, con lo cual se tiene un margen de seguridad.

Para una mayor exactitud, se adiciona la profundidad de la red de tierra, por lo tanto:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad [4.10]$$

R_g = Resistencia de tierra (Ω)

ρ = Resistividad promedio del suelo (Ω -m)

A = Área ocupada por la red para tierra (m^2)

L_T = Longitud total de los conductores enterrados (m)

h = Profundidad de la red de tierra (m)

En las Figs. 4.6 y 4.7 se aprecia el comportamiento de la R_g y E_{toque} en función de la profundidad de la red y de la primer capa de terreno para factores de reflexión positivos o negativos. Con objeto de evaluar la resistencia total de la red en un suelo uniforme, considerando el acoplamiento magnético que existe en un sistema de tierra conformado por mallas (conductores horizontales) y electrodos de tierra (conductores verticales)

En general, la resistencia de la tierra de cualquier electrodo principal depende de la resistividad del suelo y el tamaño así como del tipo de arreglo de todos los conductores individuales que comprende el electrodo de tierra. En los arreglos más complicados se involucran entrecruzadas un gran número de varillas en la misma área, la resistencia mutua entre los elementos individuales juegan un papel importante. En caso de la resistencia de tierra, se considera la resistividad uniforme de la tierra (suelo) a través de un cierto volumen, aun cuando en la práctica no ocurra así necesariamente.

Una consideración importante que se debe tener en cuenta es que la resistividad del suelo está directamente relacionada con el contenido de humedad y la temperatura, es razonable suponer que “la resistencia de cualquier sistema de tierra varia con las distintas estaciones del año”. Por otra parte, en terrenos con alta resistividad, se pueden utilizar electrodos de tierra ahogados en concreto para reducir la resistencia de la red, considerando que el concreto es altamente higroscópico y conserva la humedad. Cuando las varillas de refuerzo en el concreto armado no se conectan a las estructuras metálicas, se pueden presentar gradientes peligrosas de tensión de toque metal- metal, por lo cual es conveniente interconectarlas al sistema de tierra de la subestación.

Para una estimación mas exacta de la resistencia de la red de tierras, especialmente cuando se usan varillas de tierra (electrodos) para alcanzar la mayor conductividad del subsuelo e incluir el efecto de las 2 resistividades diferentes del suelo (suelo no

uniforme o suelo de 2 capas) Schwarz desarrollo las siguientes ecuaciones para determinar la resistencia total del sistema de tierra en un suelo homogéneo que consiste en una red horizontal y varillas (electrodos).

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad [4.11]$$

R_g = Resistencia del sistema de tierra (Ω)

R_1 = Resistencia a tierra de los conductores de la malla (Ω)

R_2 = Resistencia a tierra de los electrodos de tierra (Ω)

R_{12} = Resistencia mutua a tierra entre el grupo de conductores R_1 Y el grupo de electrodos verticales (varillas para tierra) R_2

Donde:

$$R_1 = (\rho_1 / \pi l_1) [\ln(2l_1 / h) + k_1 l_1 / (A)^{1/2} - k_2] \quad [4.12]$$

$$R_2 = (\rho_a / 2n\pi l_2) [\ln(8l_2 / d_2) - 1 + 2k_1 l_2 / (A)^{1/2} ((n)^{1/2} - 1)^2] \quad [4.13]$$

$$R_{12} = (\rho_a / \pi l_1) [\ln(2l_1 / l_2) + k_1 l_1 / (A)^{1/2} - k_2 + 1] \quad [4.14]$$

ρ_1 = Resistividad del terreno con los conductores a una profundidad h, hacia abajo en (ohm-m)

ρ_a = Resistividad aparente del terreno vista por el electrodo vertical en (ohm-m)

H= Espesor de la primera capa del terreno en (m)

ρ_2 = Resistividad del terreno desde la profundidad H, hacia abajo en (ohm-m)

l_1 = Longitud total de los conductores de la malla para tierra en (m)

l_2 = Longitud promedio del electrodo vertical en (m)

h = Profundidad de la malla para tierra en (m)

h = Coeficiente de la profundidad de la malla para tierra $h = (d_1 h)^{1/2}$ para conductores enterrados a la profundidad h en (m)

$h = 0.5d_1$ para conductores enterrados en $h=0$ (en la superficie) en (m)

A = Área cubierta por la malla para tierra con dimensiones “a*b” en (m)

n = Número de electrodos verticales localizadas en el área

k_1 Y k_2 = Coeficientes relacionados con la geometría de la red, ecuaciones [4.15] y [4.16] respectivamente

d_1 = Diámetro del conductor de la malla para tierra en (m)

d_2 = Diámetro de los electrodos verticales en (m)

a = Ancho de la malla para tierra en (m)

b = Largo de la malla para tierra en (m)

Al combinar los componentes R_1 y R_2 se abate la resistencia de la red de tierra y en la medida en que se instalan un mayor número de electrodos, la resistencia mutua a tierra. R_m Es un parámetro importante que se debe considerar para determinar la R_g .

Las ecuaciones anteriores son validas para suelos de 2 capas, una superior de espesor H con un cierto valor de resistividad y por donde penetran los electrodos verticales y una inferior de mas baja resistividad con la cual los electrodos verticales quedan en contacto.

En el caso de ρ_1 / ρ_2 la malla para tierra se localiza en la capa de resistividad ρ_1 , pero los electrodos verticales están en contacto tanto con la capa de resistividad ρ_1 , como la capa de resistividad ρ_2 , por lo que R_2 Y R_{12} se calculan con una resistividad aparente ρ_a vistas por los electrodos verticales.

$$\rho_a = l_2 \rho_1 \rho_2 / [\rho_2 (H - h) + \rho_1 (l_2 + h - H)]$$

ρ_a = Resistividad aparente del terreno vista por el electrodo vertical en (ohm-m)

l_2 = Longitud promedio del electrodo vertical en (m)

ρ_1 = Resistividad del terreno de la primera capa en (ohm-m)

ρ_2 = Resistividad del terreno de la segunda capa en (ohm-m)

H= Espesor de la primera capa del terreno en (m)

Para suelos con resistividad uniforme

$$\rho_1 = \rho_2$$

ρ_1 = Resistividad del terreno de la primera capa en (ohm-m)

ρ_2 = Resistividad del terreno de la segunda capa en (ohm-m)

Si la diferencia entre ρ_1 y ρ_2 no es muy grande, de preferencia ρ_2 no menor que $0.2\rho_1$, y el espesor de la capa superior H es al menos $0.1b$, las ecuaciones anteriores son bastante exactas para la mayoría de los cálculos y además fáciles de aplicar.

Los coeficientes K_1 y K_2 se pueden determinar gráficamente como se muestra en la Fig. 4.8 y debido a su naturaleza lineal (de la forma $Y = ax + b$), al pie de las gráficas se indica una ecuación que permite para tres casos (A, B y C) evaluar los coeficientes tomando como referencia la profundidad h de la red de tierra. Por otra parte se desarrollaron las expresiones matemáticas siguientes, para determinar los coeficientes, considerando el ancho a y largo l de la red de tierra.

$$K_1 = \frac{\sqrt{al}}{2} (1.84) \left[\frac{1}{a} \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 + l^2}}{l} \right) + \frac{1}{l} \ln \left(\frac{l + \sqrt{a^2 + l^2}}{a} \right) + \frac{a}{3l^2} + \frac{l}{3a^2} - \frac{(a^2 + l^2)}{3a^2 l^2} \sqrt{a^2 + l^2} \right] \quad [4.15]$$

$$K_2 = \ln \left(\frac{4(a+l)}{l} \right) + 2K_1 \frac{(a+l)}{\sqrt{al}} - \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 + (0.51)^2}}{0.51} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{0.51 + \sqrt{a^2 + (0.51)^2}}{-0.51 + \sqrt{a^2 + (0.51)^2}} \right) \quad [4.16]$$

k_1 Y k_2 = Coeficientes relacionados con la geometría de la red

a = Ancho de la malla para tierra en (m)

l = Longitud de la red (m)

La resistencia de la red de tierra, es inversamente proporcional a su longitud y en la medida que sea mayormente mallada y se agreguen electrodos de tierra, la resistencia mutua tendrá mayor influencia en el valor total de la resistencia de la red. Para realizar un mejor análisis de los coeficientes K_1 y K_2 (suelo de 2 capas) se recomienda que se utilice un programa de computadora. Para nuestro caso utilizamos el modelo del suelo uniforme.

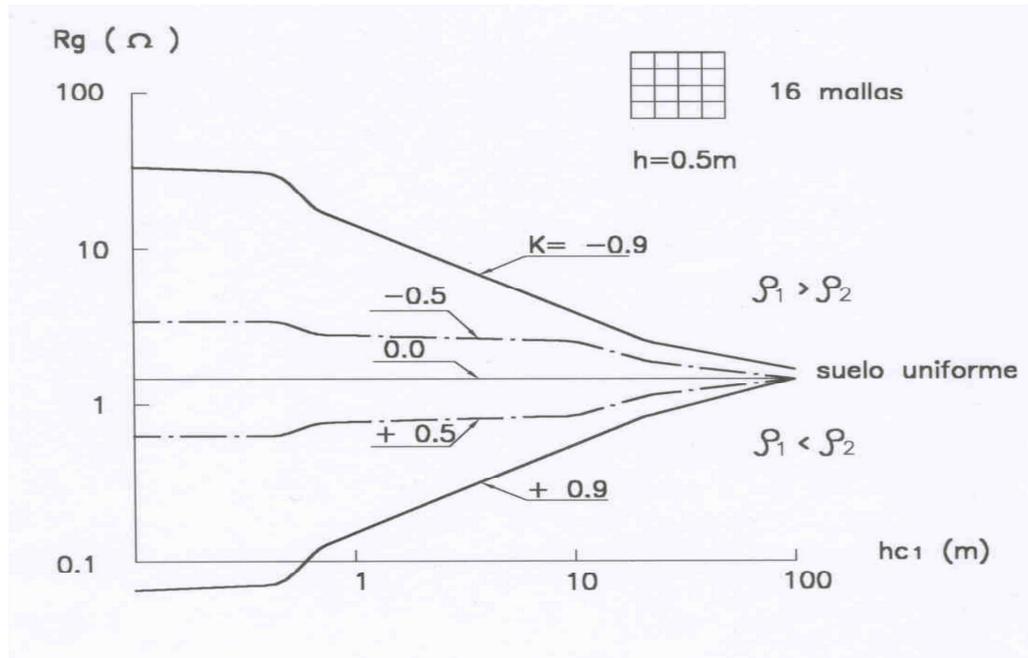


Fig. 4.6 profundidad de la capa superior del terreno para valores del factor K contra la resistencia de la red

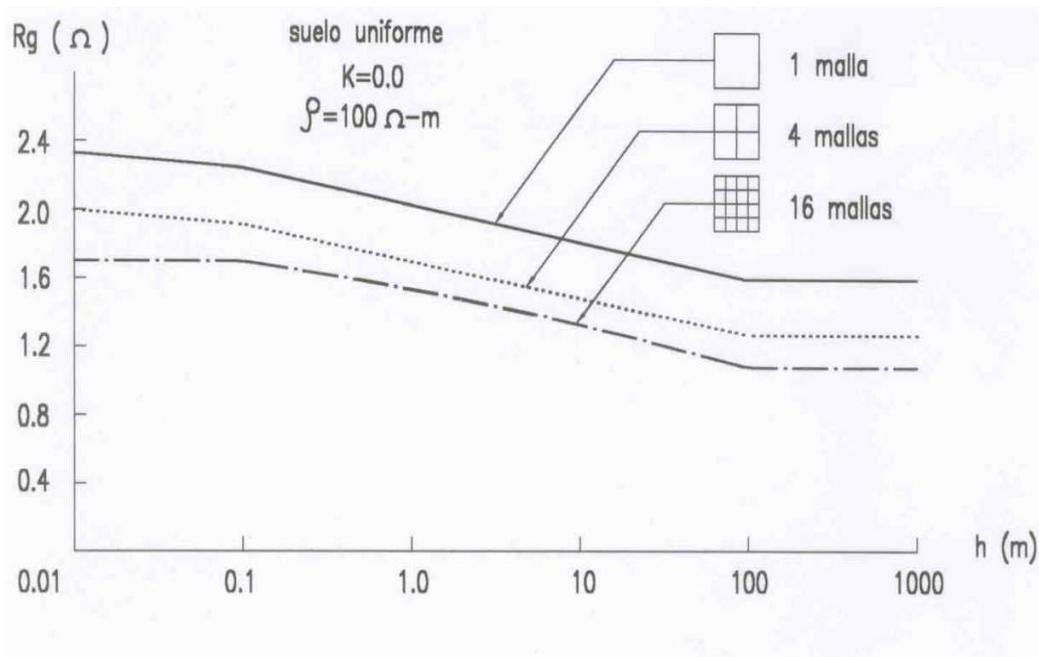


Fig. 4.7 profundidad de la red contra la resistencia de la red

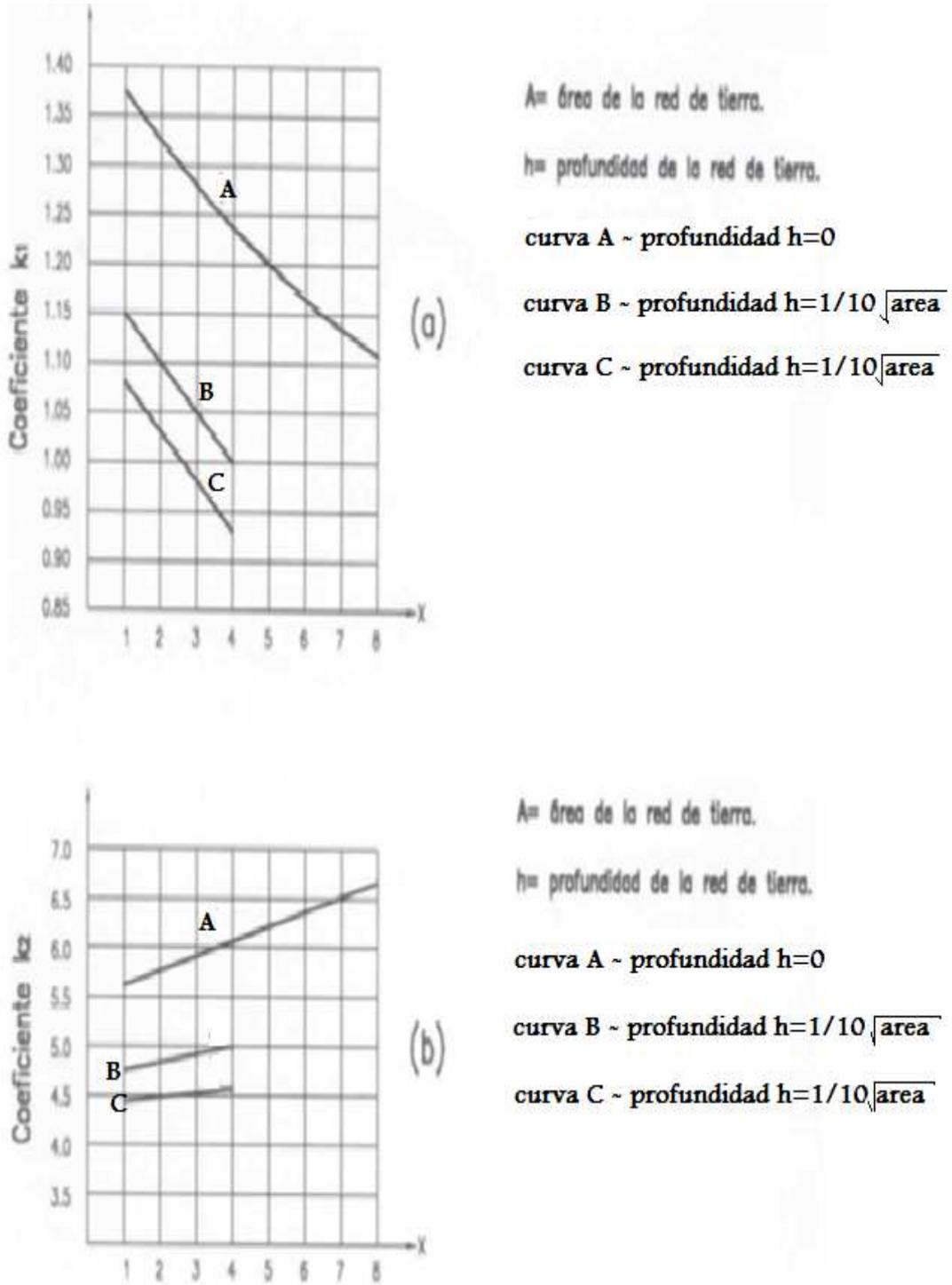


Fig. 4.8 coeficientes K1 y K2 para las formulas de Schwartz a) coeficiente K1, b) coeficiente K2

4.6 tratamiento del suelo para bajar la resistividad

La resistividad del suelo, determina en gran medida el valor de la resistencia del sistema de tierra de la subestación. A menudo es imposible (poco probable) conseguir la reducción deseada de la resistencia en la tierra, aunque se aumente el número de conductores (electrodos). Una solución alternativa es incrementar el diámetro del electrodo o modificando el suelo circundante (alrededor) del electrodo.

Existen ciertos aditivos químicos que pueden reducir la resistividad del suelo, con una consecuente reducción en la resistencia de tierra. Normalmente estos aditivos son aplicados en suelos de alta resistividad y se colocan junto a los electrodos de tierra. Se debe considerar también, que cualquier producto tiene tendencias a perder su función original por la acción de tiempo, (lluvias, etc.) y se deberá volver a aplicar después de un cierto tiempo determinado. Cuando no es posible reducir el valor de la resistencia de la red, se puede utilizar en las mallas o en los electrodos una combinación de materiales diversos como bentonita (arcilla), gel (solución salina), resinas sintéticas, mezclas químicas especiales formadas a base de sulfato de sodio, sulfato de cobre, sulfato de magnesio, cloruro de calcio, silicatos, carbón mineral tipo coke, grafito, yeso, que se colocan alrededor de los conductores enterrados o electrodos utilizados.

Considerando, de hecho, que una reducción en la resistencia de tierra se puede hacer, por ejemplo, con un aumento en el número de electrodos instalados, entonces, el uso de productos químicos debe quedar limitado solo a casos extremos.

El cálculo teórico considerando la aplicación de estos productos es relativamente simple, por ejemplo, en el caso de uso de la bentonita, el cálculo de la red de tierra, ya sea por métodos manuales o por programas de computadora, se hace suponiendo que los electrodos son de mayor diámetro, tomando en cuenta el volumen de bentonita alrededor del electrodo.

Para otros productos, por ejemplo, en el uso de gel no se dispone de métodos de cálculo precisos, y entonces se sugiere seguir las recomendaciones de los fabricantes

- a) El uso de cloruro de sodio (sal), magnesio y sulfatos de cobre o cloruro de calcio para incrementar la conductividad del suelo alrededor del electrodo. (este método es casi despreciable porque se puede dirigir a los alrededores y porque el tratamiento de la sal debe ser renovado periódicamente.
- b) Uso de benzonato, una arcilla natural que contiene un mineral que se forma por la acción volcánica hace muchos años. No es corrosivo, es estable y tiene una resistividad de 2.5 ohm-m en 300% de humedad.

La baja resistividad resulta en la mayoría de los casos un proceso electrolítico entre el agua, Na (sodio), K (potasio), Ca (calcio), Mg (magnesio), y otras sales minerales que se ionizan formando un fuerte

electrolito con ph de valores de 8-10 Suministrado con una cantidad suficiente de agua, expande (incha) su volumen hasta 13 veces más que cuando esta seco y se adhiere a casi cualquier superficie que toque.

El benzonato necesita que el agua mantenga sus características beneficiosas. Su contenido de humedad inicial es obtenido en la instalación cuando la arcilla (barro) es preparado. Una vez instalado el benzonato depende de la presencia de humedad de la tierra para mantener sus características. La mayoría de los suelos tiene suficiente humedad de tierra, con el propósito de que el secado no los afecte.

- c) Los electrodos de tipo químicos consisten en un tubo de cobre relleno con una sal. Los orificios en los extremos del tubo permiten que entre la humedad, disuelva las sales y permita la solución (mezclar) de sal con tierra.

Por otra parte, se debe tener precaución al instalar en los electrodos o en la red, rellenos para aparentemente favorecer la disminución de la resistencia de tierra, debido a que las propias características químicas y físicas pueden corroer o sulfatar a los elementos que conforman la red o electrodos enterrados, e incrementar, con el tiempo, el valor de la resistencia de tierra, por lo cual se recomienda lo siguiente:

- a) No utilizar carbón mineral sin molerse
- b) No emplear sal debido a que afecta a los electrodos y emigra hacia capas inferiores.
- c) No utilizar rebabas o recortes metálicos, ya que aceleran la oxidación y la degradación de los electrodos
- d) No es recomendable utilizar sólo el yeso o únicamente la bentonita como relleno químico, debido a que cuando pierden humedad dejan huecos y disminuyen la continuidad en la superficie de dispersión de corriente.

Los materiales descritos, usualmente retardan la evaporación de la humedad del suelo sobre todo en épocas prolongadas de estiaje, permitiendo abatir y conservar la resistencia.

El uso de magnesio, cloruro de calcio y sulfatos de cobre, incrementan la conductividad del suelo en derredor de los electrodos. La bentonita no es corrosiva y tiene una resistividad de 2.5 Ω -m a 300% de humedad y debido a su naturaleza higroscópica, permite conservar la humedad del ambiente que existe en el entorno, por lo cual, la bentonita requiere agua para obtener y mantener sus adecuadas características. También se puede utilizar el concreto para alojar electrodos de tal manera que se puede reducir la resistencia de la red.

CAPITULO 5 CORRIENTES Y TENCIONES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO

Los efectos de la corriente eléctrica que puede circular a través de las partes vitales de un cuerpo humano dependen de la frecuencia, magnitud y duración de la corriente. La secuela más peligrosa por dicha exposición es una condición que presenta el corazón conocida como fibrilación ventricular.

5.1 Efecto de la corriente

Los humanos somos muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica con la frecuencia de los sistemas de potencia (50 o 60 Hz), magnitudes de 0.1 A pueden ser mortales. El cuerpo humano puede soportar una magnitud de corriente ligeramente mayor con una frecuencia de 25 Hz y una magnitud de cinco veces mayor con corriente directa. Entre las frecuencias de 3,000-10,000 Hz, corrientes aún mayores pueden ser toleradas. En algunos casos el cuerpo humano es capaz de tolerar muy altas corrientes debidas a descargas atmosféricas.

Los efectos fisiológicos más comunes debidos a la magnitud de la corriente cuando circula por el cuerpo humano son:

- a) Percepción: la magnitud de 1.0 mA es la corriente con la cual una persona empieza a sentir una sensación de cosquilleo en las manos o en la punta de los dedos.
- b) Dolor: las corrientes entre 1.0 a 6.0 mA a pesar de que son dolorosas no atrofian la habilidad de la persona que sostiene al objeto energizado para controlar sus músculos y soltarlo. Para mujeres la corriente de soltar promedio es de 10.5 mA y para hombres de 16 mA y como valores umbrales de 6 mA y 9 mA respectivamente.
- c) Contracción muscular: en el rango de magnitud de 9.0 a 25.0 mA, las corrientes pueden ser intolerables y pueden hacer difícil o imposible soltar el objeto sujetado con la mano. Para corrientes ligeramente mayores la contracciones musculares puede dificultar la respiración. Estos efectos no son permanentes y desaparecen cuando la corriente es interrumpida, aunque la contracción sea muy severa y se tenga un paro respiratorio por minutos, a menudo las personas responden a la resucitación.
- d) Fibrilación ventricular: es hasta magnitudes de corriente dentro del rango de 60 a 100 mA donde se presenta la acción no coordinada de los ventriculos del corazón resultando el paro de la circulación de la sangre y del corazón o también la inhibición de la respiración puede ocurrir causando daños o la muerte.

5.2 Límite y rango de corriente tolerable por el cuerpo humano

La magnitud de corriente que puede circular por el cuerpo de una persona se debe mantener por debajo del umbral de fibrilación en el diseño del sistema de tierra de una subestación, para evitar el daño o muerte de la persona.

La magnitud de corriente de no fibrilación con un rango de duración de 0.03 a 3.0 segundos, está relacionada con la energía absorbida por el cuerpo y está determinada por la siguiente ecuación:

$$S_B = I_B^2 t_f \quad [5.1]$$

I_B = Magnitud eficaz (rms) de la corriente que circula por el cuerpo (A)

t_f = Duración de exposición de la corriente (s)

S_B = Constante obtenida empíricamente, relacionada con la energía de choque eléctrico soportada por un porcentaje determinado de personas.

El tiempo de duración de la corriente a frecuencia de 60 Hz, que la mayoría de la gente puede soportar sin fibrilación ventricular, está relacionado con la magnitud de la corriente de acuerdo a la Ec. 5.1, obteniéndose:

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t_f}} \quad [5.2]$$

I_B = Magnitud eficaz (rms) de la corriente que circula por el cuerpo (A)

t_f = Duración de exposición de la corriente (s)

$$K = \sqrt{S_B} \quad [5.3]$$

S_B = Constante obtenida empíricamente, relacionada con la energía de choque eléctrico soportada por un porcentaje determinado de personas.

La constante S_B que está relacionada con la energía de choque que pueden soportar las personas con un peso aproximado de 50 kg, tiene un valor de:

$$S_B = 0.0135$$

Con lo que la corriente tolerable por una persona de 50 kg es:

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_f}} \quad [5.4]$$

I_B = Magnitud eficaz (rms) de la corriente que circula por el cuerpo (A)

t_f = Duración de exposición de la corriente (s)

Para una persona con un peso de 70 kg se tiene una constante de:

$$S_B = 0.0246$$

S_B = La constante que está relacionada con la energía de choque que pueden soportar las personas.

La corriente tolerable es:

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \quad [5.5]$$

I_B = Magnitud eficaz (rms) de la corriente que circula por el cuerpo (A)

t_f = Duración de exposición de la corriente (s)

5.3 importancia de las componentes de protección

Debido a que la corriente tolerable es inversamente proporcional al tiempo de exposición el tiempo de liberación de una falla de fase a tierra es de gran importancia por las siguientes razones:

- a) la probabilidad de riesgo del choque eléctrico es mucho menor para tiempos rápidos de liberación de la falla que para situaciones en que la corriente de falla persiste por varios minutos.
- b) la posibilidad de severos daños o hasta la muerte es en gran manera reducida si la duración de la circulación de la corriente a través del cuerpo es muy breve.

Se recomienda en la ecuación [5.1], aplicar el tiempo de liberación de la falla para la protección de respaldo y así tener mayor margen de seguridad.

En los sistemas de operación modernos se cuenta con el recierre automático que es aplicado normalmente después de una falla a tierra. En tales circunstancias, al ocurrir una falla, una persona puede ser sujeta a un primer choque eléctrico sin

daños considerables antes de que opere el recierre. Después de que opera el primer recierre, con un tiempo aproximado de 0.3 segundos, la persona está sujeta a un segundo choque. El segundo choque ocurre después de un corto intervalo de tiempo antes de que la persona se recupere del primer choque, pudiéndole causar graves daños o la muerte. Esto es debido a que el tiempo de duración total de los dos choques, para este caso, es como si fuera el de un solo choque.

Por lo tanto es muy importante analizar la rapidez de operación del dispositivo de operación (relevador) ya que de este depende el tiempo a la cual el cuerpo humano está en contacto con la corriente eléctrica, Se requiere que los relevadores empleados para la protección operen rápidamente, en términos generales por lo siguiente:

- a) Los tiempos críticos de la liberación de fallas no se deben exceder debido a que esto podría producir problemas en los equipos e instalaciones como esfuerzos electrodinámicos excesivos, elevaciones de temperatura (efecto joule) y valores superiores a los específicos para interrupción.
- b) Los aparatos eléctricos de las instalaciones se pueden dañar por conducir corrientes de falla por tiempos mayores de los especificados.
- c) Una falla que se libera en un tiempo muy largo, es decir, del tipo persistente, produce problemas de caídas de tención excesivas que perjudican a los usuarios, particularmente a los del tipo industrial
- d) La seguridad humana que está ligada al tiempo que está en contacto el cuerpo humano con la corriente y que depende de la rapidez con que opere el dispositivo de operación (relevador)

5.4 resistencia del cuerpo humano

Las instalaciones eléctricas con las cuales las personas pueden tener contacto se definen por su tención nominal, para pasar de los valores de corriente no peligrosas a los valores de las tenciones no peligrosas, es necesario tomar en consideración la resistencia del cuerpo humano y la resistencia de contacto entre la entrada y la salida de la corriente del cuerpo humano.

Para la corriente directa y para la corriente alterna a frecuencia nominal, el cuerpo humano puede representarse por una resistencia. Esta resistencia está medida entre extremidades, esto es, entre una mano y ambos pies o entre un pie y el otro. En cualquiera de los dos casos el valor de esta resistencia es difícil de establecer. Un valor de resistencia para el cuerpo humano es aproximadamente de 300 ohms, aunque se ha determinado por estudios un rango entre 500 ohms a 3000 ohms. Para altos voltajes y corrientes (arriba de 1 KV y 5 A), la resistencia disminuye por daño o perforación de la piel en el punto de contacto.

Las normas internacionales suponen una resistencia de 2000 ohms entre mano y pie (para la tención de contacto y entre pie y pie para la tensión de paso)

Para fines de cálculo se han hecho las siguientes consideraciones:

- a) La resistencia de contacto para las manos y los zapatos es igual a cero.
- b) Se ha seleccionado el valor de 1000 ohms para representar el valor de resistencia del cuerpo humano, de una mano a ambos pies, entre mano y mano o entre un pie y el otro.

$$R_b = 1000\Omega$$

5.5 materiales aislantes en la superficie de la subestación

Con objeto de mejorar la resistividad superficial del terreno de la subestación, se agregan materiales aislantes que permiten elevar la resistencia a tierra del personal que transita por las áreas de la subestación (Tabla 5.1), con las siguientes ventajas adicionales:

- a) Es una capa de resistividad alta
- b) Limita el crecimiento de pasto y maleza
- c) Mantiene la humedad en el terreno

Cuando se tiene una capa de 0.08 a 0.15 metros de material de alta resistividad, como grava esparcida sobre la superficie del terreno, encima de la red del sistema de tierra, se incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de la persona dentro del área de la subestación.

Cuando no se tiene capa superficial en el área del sistema de tierra de la subestación se considera que: $\rho_s = \rho$ y $C_s = 1.0$

La siguiente formula es para determinar el factor de reducción C_s debido a la corrección realizada por la adición de la capa superficial con resistividad ρ_s

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad [5.6]$$

ρ = Resistividad del suelo (Ω -m)

ρ_s = Resistividad del material de capa superficial (Ω -m)

C_s = Factor que relaciona el valor de la resistividad de la capa superficial ρ_s con el valor de la resistividad del terreno ρ

h_s = Espesor del material de la capa superficial (m)

material	Resistividad a 20 °C (Ω -m)
Ambar	5×10^{14}
Azufre	1×10^{14}
Baquelita	2×10^5 a 2×10^{14}
Cuarzo (fundido)	75×10^{16}
Ebonita	1×10^{13} a 2×10^{16}
Madera	1×10^8 a 2×10^{11}
Mica	1×10^{11} a 2×10^{15}
Vidrio	1×10^{10} a 2×10^{14}
Graba de galeana (metal negro)	3×10^3
Piedra caliza	5×10^3
Grava	3×10^3

Tabla 5.1 Valores de resistividad de materiales aislantes

5.6 Tensiones tolerables por el cuerpo humano

En la fig. 5.1 se indican las diferentes formas de contactos circunstanciales que una persona puede cometer entre dos puntos dentro de una subestación, presentándose para cada caso un tipo de tencion de contacto, las cuales son: tencion de toque o de contacto, tencion de transferencia (GPR) y tencion de paso.

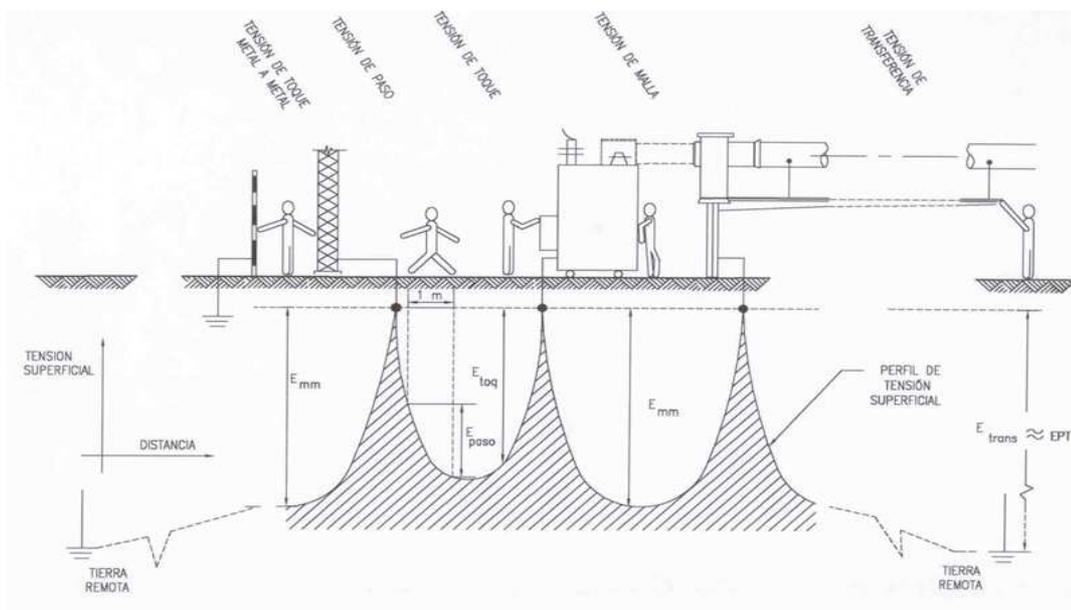


Fig. 5.1 situaciones básicas de choque eléctrico

5.6.1 TENCION DE TOQUE

Podemos definir a la tensión de toque como la máxima diferencia de tensión entre el punto de contacto de los pies de una persona que se encuentra parada en el área de la subestación y el punto de contacto de una o de sus dos manos al tocar una estructura metálica cuando ocurre una falla de fase a tierra.

La Fig. 5.2 muestra como la corriente de falla I_f es descargada en derivación por un lado directamente al sistema de tierra a través de la estructura metálica, con su componente I_g y por otro lado a través de la persona con su componente I_b que será igual a la corriente tolerable por el cuerpo I_B .

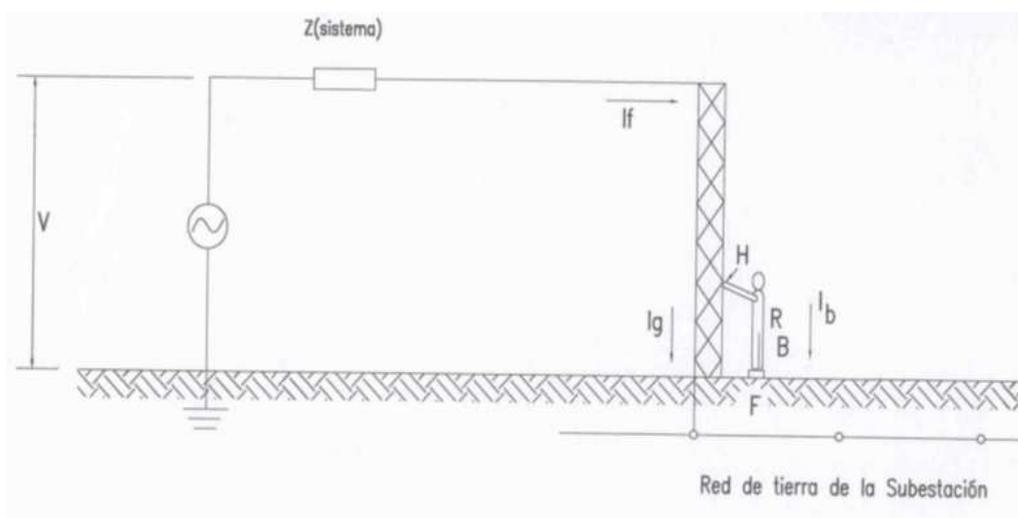


Fig. 5.2 riesgo para la tensión de toque

La tensión de toque tolerable por una persona que tiene un peso promedio de 50 kg

$$E_{\text{toque}} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_f}} \quad (\text{V}) \quad [5.7]$$

ρ_s = Resistividad del material de capa superficial (Ω -m)

C_s = Factor que relaciona el valor de la resistividad de la capa superficial ρ_s con el valor de la resistividad del terreno ρ

t_f = Duración de exposición de la corriente (s)

Para una persona con un peso promedio de 70 kg es:

$$E_{\text{toque}} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \quad [5.8]$$

ρ_s = Resistividad del material de capa superficial (Ω -m)

C_s = Factor que relaciona el valor de la resistividad de la capa superficial ρ_s con el valor de la resistividad del terreno ρ

t_f = Duración de exposición de la corriente (s)

5.6.2 TENCION DE PASO

Podemos definir objetivamente a la tensión de paso como la máxima diferencia de potencial entre los puntos que está haciendo contacto los dos pies de una persona, con una separación de un metro, que se encuentra caminando en el área de la subestación al ocurrir una falla de fase a tierra.

La Fig. 5.3 muestra la corriente de falla que es descargada a tierra. La corriente I_b fluye desde el punto F_1 en el que pisa uno de los pies de la persona que se encuentra caminando en la subestación y circulando a través de su cuerpo llega hasta otro punto F_2 en el que se encuentra pisando su otro pie.

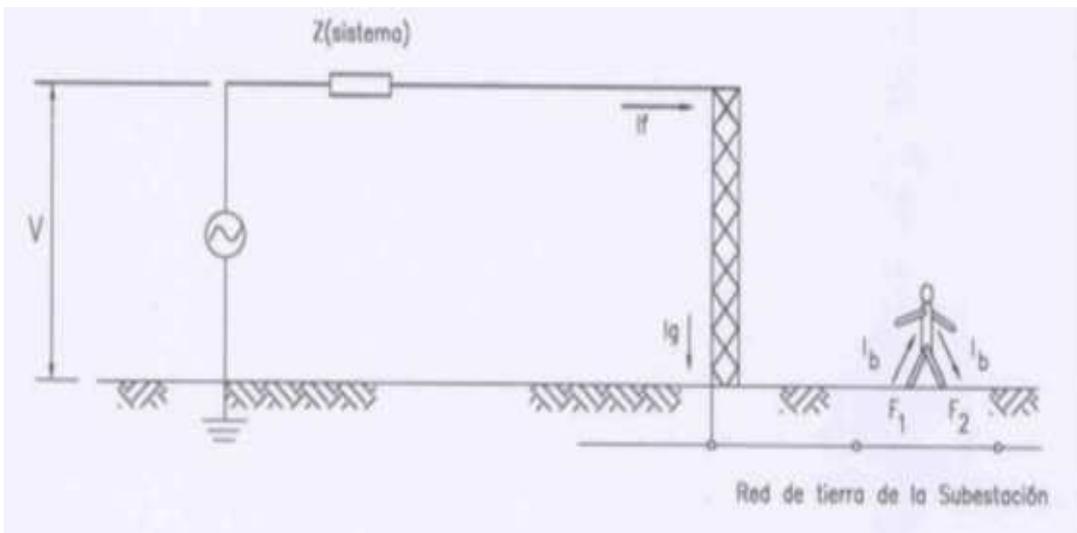


Fig. 5.3 riesgo para la tensión de paso

La tensión de paso tolerable por una persona que tiene un peso promedio de 50 kg

$$E_{paso} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_f}} \quad (\text{V}) \quad [5.9]$$

ρ_s = Resistividad del material de capa superficial (Ω -m)

C_s = Factor que relaciona el valor de la resistividad de la capa superficial ρ_s con el valor de la resistividad del terreno ρ

t_f = Duración de exposición de la corriente (s)

Para una persona con un peso promedio de 70 kg es:

$$E_{paso} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \quad (V) \quad [5.10]$$

ρ_s = Resistividad del material de capa superficial (Ω -m)

C_s = Factor que relaciona el valor de la resistividad de la capa superficial ρ_s con el valor de la resistividad del terreno ρ

t_f = Duración de exposición de la corriente (s)

5.6.3 TENSION DE TRANSFERENCIA Y GPR

La tensión de transferencia es un caso especial de la tensión de toque donde la tensión es transferida dentro o fuera de la subestación desde o hacia un punto remoto externo al área de la subestación.

La tensión de transferencia ocurre cuando una persona que esta parada dentro del área de la subestación toca un conductor aterrizado en un punto remoto, o una persona que esta parada en un punto remoto toca un conductor conectado en la red de tierra de la subestación. En la fig. 5.4 Se muestra un caso típico de la tensión de transferencia.

Puede existir el riesgo de producirse una tensión de transferencia en los conductores de los circuitos de subestación, en los hilos neutros de los circuitos de baja tensión, en los conduits, tuberías, cercas metálicas, rieles, etc.

Durante las condiciones de falla, la tensión de transferencia resultante puede ser igual o exceder la máxima elevación de tensión de la red (GPR). La máxima elevación de tensión de la red es el máximo potencial eléctrico que se puede tener entre un punto de la red del sistema de tierra de una subestación y un punto que esta al mismo potencial de un sistema de tierra de una subestación remota.

Lo que se debe tomar en cuenta es la elevación de potencial de tierra (GPR) que es el máximo potencial eléctrico que una malla para tierra en una subestación puede

alcanzar con relación a un punto de tierra distante asumiendo que este al potencial de la tierra remota. Este potencial GPR es igual a la corriente máxima de malla multiplicada por la resistencia de red.

$$GPR = I_G * R_g \quad [5.11]$$

GPR = Máximo potencial eléctrico (V)

I_G = Corriente máxima de malla (A)

R_g = Resistencia de la red (Ω)

La tensión de transferencia puede exceder la suma de las máximas elevaciones de tensión de la red de ambas subestaciones. Por lo que es impráctico y de hecho imposible, reducir los potenciales de transferencia a la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano en el diseño del sistema de tierra. Para evitar los riesgos de las tenciones de transferencia se utilizan dispositivos de aislamiento y neutralización y también se deben tener ciertas precauciones en la puesta a tierra de algunos elementos de la subestación.

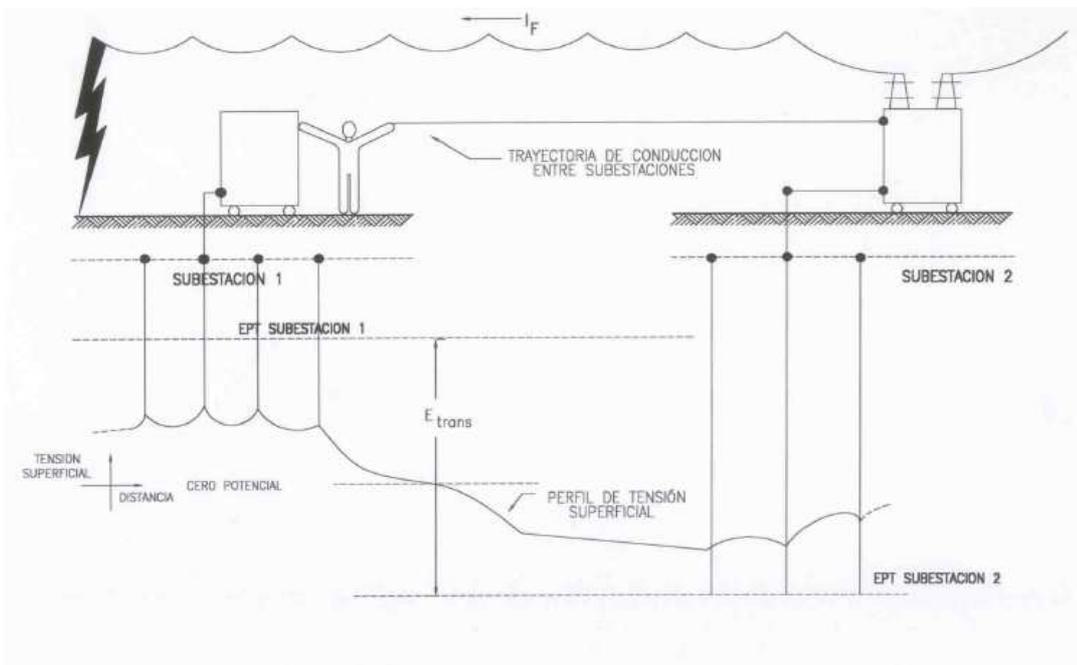


Fig. 5.4 situación típica de riesgo de la tensión de transferencia

5.7 Calculo de los potenciales de malla y de paso

5.7.1 TENCION DE MALLA MAXIMA

La tensión de malla máxima, es la tensión de toque en el centro de una cuadrícula de la red, esta tensión es mayor conforme la malla está más alejada del centro de la red, por lo que la tensión de malla máxima se tendrá en las mallas de las esquinas de la red del sistema de tierra. Este incremento depende del tamaño de la red, número y localización de varillas de tierra, separación entre conductores paralelos, diámetro y profundidad de los conductores y perfil de la resistividad del terreno.

Debido a que la máxima tensión de malla se tiene en las mallas de las esquinas de la red, en el diseño de un sistema de tierra solo se considera esta tensión de malla en el estudio y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M} \quad (v) \quad [5.12]$$

E_m = Tensión de malla (V)

K_i = Factor de ajuste de la geometría de la red

K_m = Factor de espaciamiento para la tensión de malla

L_M = Longitud efectiva de los conductores de la red (m)

I_G = Corriente de falla que circula en la red del sistema de tierra (A)

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right\} \quad [5.13]$$

D = Espaciamiento entre conductores paralelos (m)

d = Diámetro del conductor de la red (m)

K_{ii} = Factor de ajuste de peso y efectos internos en la red

K_h = Factor de ajuste de peso y profundidad de la red

h = Profundidad de los conductores en la malla para tierra en (m)

n =Factor de geometría o número efectivo de conductores paralelos

Con electrodos de tierra a lo largo del perímetro de la red y/o en las esquinas con electrodos de tierra de la red o con ambas condiciones en el área de la red:

$$K_{ii} = 1$$

Sin electrodos de tierra o con pocos electrodos esparcidas en la red, pero ninguna en las esquinas o en el perímetro de la red del sistema de tierra:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad [5.14]$$

K_{ii} =Factor de ajuste de peso y efectos internos en la red

n =Factor de geometría o número efectivo de conductores paralelos

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad [5.15]$$

K_h =Factor de ajuste de peso y profundidad de la red

h_0 =Profundidad de referencia de la red y es igual a 1 m.

h =Profundidad a la cual esta enterrada la rejilla para tierra (m)

El número efectivo de conductores paralelos n en una red dada rectangular o irregular se representa por el número de conductores paralelos de una red rectangular equivalente:

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d \quad [5.16]$$

n =Factor de geometría o número efectivo de conductores paralelos

$$n_a = \frac{2l_c}{L_p} \quad [5.17]$$

n_b = 1 Para redes cuadradas

n_c = 1 Para redes cuadradas y rectangulares

$n_d = 1$ Para redes cuadradas, rectangulares y en forma de L

De lo contrario:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad [5.18]$$

$$n_c = \left[\frac{L_x L_y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_x L_y}} \quad [5.19]$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad [5.20]$$

L_c = Longitud total de conductores horizontales de la red (m)

L_p = Longitud perimetral de la red (m)

A = Area cubierta por la red (m²)

L_x = Longitud máxima de la red sobre el eje x (m)

L_y = Longitud máxima de la red sobre el eje y (m)

D_m = Distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la red (m)

Para la forma de la red de tierra en CFE

$$n = n_a * n_b \quad [5.21]$$

n = Factor de geometría o número efectivo de conductores paralelos

El factor de ajuste de la geometría o de irregularidad de la red k_i en función de n está definido como:

$$K_i = 0.644 + 0.148 * n \quad [5.22]$$

K_i = Factor de ajuste de la geometría de la red

n =Factor de geometría o número efectivo de conductores paralelos

Para redes sin electrodos de tierra o redes con pocos electrodos esparcidos en la red, pero ninguno localizado en las esquinas o a lo largo del perímetro de la red, la longitud efectiva L_M de los conductores enterrados de la red es:

$$L_M = L_C + L_R \quad [5.23]$$

L_M =Longitud efectiva de los conductores de la red (m)

L_R =Longitud total de todas las varillas de tierra (m)

L_c =Longitud total de conductores horizontales de la red (m)

Para redes con varillas de tierra en las esquinas, como también a lo largo del perímetro y distribuidos en el área de la red, la longitud efectiva L_M de los conductores enterrados incluyendo las varillas, está determinada por:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad [5.24]$$

L_M =Longitud efectiva de los conductores de la red (m)

L_c =Longitud total de conductores horizontales de la red (m)

L_r =Longitud de cada varilla de tierra (m)

L_R =Longitud total de todas las varillas de tierra (m)

5.7.2 TENCION DE PASO MAXIMA

La tensión de paso máxima, es la tensión de paso entre un punto sobre el exterior de una de las esquinas de la red y un punto diagonalmente a un metro fuera de la red. Las tensiones de paso son inherentemente menos peligrosas que las tensiones de malla. Pero cuando la seguridad del sistema de tierra solo se consigue colocando sobre la superficie una capa de material de alta resistividad (como roca triturada) y dicha capa no se prolonga al exterior de la red, los potenciales de paso fuera de la red pueden resultar peligrosos. Por lo que se recomienda que la tensión de paso obtenida se compare con la tensión de paso tolerable, una vez que en el estudio se haya obtenido una tensión de malla menor que la de toque tolerable. En caso de que se obtenga en este punto un potencial de paso mayor que el tolerable, se puede evitar extendiendo la capa de material de alta resistividad hacia fuera de la cerca o

eliminando esquinas o proyecciones agudas en la red apropiadamente. La tensión de paso se determina con la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_s} \quad [5.25]$$

E_s = Tensión de paso (V)

I_G = Corriente máxima de malla (A)

K_s = Factor de espaciamento para la tensión de paso

K_i = Factor de ajuste de la geometría de la red

L_s = Longitud efectiva de los conductores de la red (m), para la tensión de paso

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R \quad [5.26]$$

L_s = Longitud efectiva de los conductores de la red (m), para la tensión de paso

L_c = Longitud total de conductores horizontales de la red (m)

L_R = Longitud total de todas las varillas de tierra (m)

Considerando al potencial de paso a un metro fuera de la esquina más alejada de la red y al conductor enterrado a una profundidad de $0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$, K_s se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad [5.27]$$

K_s = Factor de espaciamento para la tensión de paso

h = Profundidad a la cual esta enterrada la red para tierra (m)

D = Espaciamento entre conductores paralelos (m)

CAPITULO 6 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO Y CÁLCULO DE UN SISTEMA DE TIERRA DE ACUERDO A LA NORMA NRF-011-CFE

6.1 norma de referencia NRF-011-CFE

Como regla general, las normas de diseño proporcionan los límites de diseño que deben satisfacerse y explican como pueden diseñarse los sistemas de tierra para ajustarse a ellos. Las normas generalmente incluyen formulaciones para realizar los cálculos necesarios o una guía detallada sobre los aspectos prácticos.

La primera guía para el diseño de sistemas de puesta a tierra de subestaciones eléctricas, basada principalmente en la experiencia y en modelos analíticos simples, apareció en 1961 como el estándar 80 de la IEEE. Este documento, junto con sus tres revisiones principales en 1976, 1986, y 2000 ha sido la herramienta principal para el análisis y el diseño de los sistemas de conexión a tierra para subestaciones eléctricas y a sido estudiada para su aplicación en México derivándose de esta la norma NRF-011-CFE.

La norma NRF-011-CFE es actualmente la norma de referencia que a sido elaborada de acuerdo a las normas de operación del Comité de Normalización de la Comisión federal de Electricidad (CONORCFE), se aplica actualmente para el diseño de redes de tierra en centrales y subestaciones de CFE y es la norma que aplicaremos para nuestro diseño y que toma como referencia a la guía IEEE-std-80-2000 (guide for safety in AC Substation Groundinng); la cual es uno de los métodos mas aceptados a nivel internacional para hacer el diseño de un sistema.

Estos cálculos cubren principalmente subestaciones tipo exterior, con aislamientos convencionales o en gas, incluyendo subestaciones de distribución, transmisión y plantas generadoras. Con la debida precaución, estas normas pueden emplearse en el cálculo de los sistemas de tierra e algunas partes interiores de tales subestaciones y a subestaciones totalmente interiores. Los propósitos específicos de esta guía son:

- 1.- establecer como bases de diseño, los límites seguros de diferencias de potencial que puede existir en una subestación bajo condiciones de falla entre puntos que pueden ser contactados por el cuerpo humano.
- 2.- proporcionar un procedimiento para el diseño de sistemas de tierra prácticos, basados en criterios de seguridad.

El procedimiento que se sigue en este trabajo de tesis para el diseño y calculo de un sistema de tierra es tomado de la norma NRF-011-CFE (IEEE-.STD-80-2000) también llamada método de los 12 pasos porque esta formada de los 12 pasos siguientes

Paso 1 plano de arreglo general, datos de campo, área ocupada por la maya de tierra y resistividad del terreno.

El área que ocupara la malla podrá determinarse a partir del plano general de la subestación, en este plano estarán indicados los límites y la ubicación de los equipos. La resistividad del terreno podrá determinarse con algunos de los métodos estudiados anteriormente o de datos promedio proporcionados por tablas, las pruebas de resistividad determinaran el perfil de resistividad y el modelo del suelo a utilizar (uniforme o de dos capas)

Paso 2 dimensionamiento del conductor

Para determinar la sección transversal del conductor de la red de tierra se debe hacer un análisis en el Cálculo de la corriente de falla, esta corriente de falla debe ser la máxima corriente futura de falla esperada que puede ser conducida por cualquier conductor del sistema de tierra. Tiempo de duración de la falla y diámetro del conductor de la malla. La corriente de falla podrá calcularse con las formulas descritas anteriormente y será la máxima que los conductores puedan conducir en la malla de tierra. El tiempo de duración de la falla reflejara el tiempo máximo posible para la liberación de la falla, incluido el de operación de una protección de respaldo.

Paso 3 cálculos de los potenciales de paso y de contacto tolerables

Los potenciales de paso y contacto tolerables, se calcularan con las ecuaciones descritas anteriormente. La selección del tiempo estará basado en el criterio del ingeniero de diseño de acuerdo con lo establecido en el estudio de coordinación de protecciones, el tiempo de exposición de la falla debe ser el máximo tiempo hasta que la falla se libere, normalmente el valor se encuentra en el intervalo de 0.1 a 1.0seg.

Paso 4 diseño inicial de la malla

El diseño preliminar de la malla deberá incluir un conductor rodeando el área completa de la subestación. Se localizaran conductores cruzados en dos direcciones formando una red o malla para permitir la conexión a tierra de los diferentes equipos. El espaciamiento entre estos conductores y la localización de varillas de tierra, deberá basarse en la corriente IG y en el área a proteger por la malla. En la práctica las rejillas para tierra en las subestaciones de CFE se construyen cuadradas o rectangulares

Paso 5 resistencia a tierra de la malla

Puede determinarse un valor preliminar de resistencia de la malla, con las ecuaciones indicadas. Para el diseño final, pueden encontrarse estimaciones mas precisas de la resistencia, especialmente cuando en los cálculos se emplea la resistencia de las varillas. Para esta aplicación se utilizaran las ecuaciones que incluyen el efecto que produce el tener dos diferentes resistividades en el terreno. Se debe de tener en cuenta el valor de la resistencia de malla debe ser menor a 1 ohm

Paso 6 corriente máxima de malla

La corriente IG se determina por las ecuaciones estudiadas anteriormente. Para evitar un sobredimensionamiento de la malla, se usará en el diseño únicamente aquella parte de la corriente total de falla $3I_o$ que fluye de la malla hacia el terreno y que contribuye a los potenciales de paso y de malla y a la elevación de potencial de la malla. La corriente IG deberá reflejar la peor condición de falla (tipo y localización) el factor de decremento y cualquier expansión futura del sistema eléctrico.

Paso 7 comparación de potenciales

Si la máxima elevación de potencial de la malla del diseño preliminar está por debajo del valor del potencial de contacto tolerable, ya no es necesario análisis alguno, únicamente se requieren conductores adicionales para la puesta a tierra de los equipos.

Paso 8 cálculo de las tensiones de paso y de malla para el sistema de tierra

Las tensiones de paso y de contacto en la malla, se calcularán con las ecuaciones descritas en los párrafos correspondientes.

Paso 9 comparación del potencial de contacto en la malla con el potencial de contacto tolerable

En este paso se comparará el potencial de contacto en la malla llamado también potencial de malla, con el potencial de contacto tolerable calculado en el paso 3. Si el potencial de malla es menor que el potencial de contacto tolerable, el diseño puede darse por concluido y si no, tendrá que ser revisado (ver paso 11)

Paso 10

Si ambas, la tensión de paso y de malla calculadas con el diseño preliminar son menores que las tensiones de paso y contacto tolerables por el cuerpo humano, el diseño necesita únicamente proporcionar la puesta a tierra de los equipos.

Paso 11

Si se exceden los límites de las tensiones de paso o de contacto, se requerirá de una revisión en el diseño de la malla. Esta revisión incluirá espaciamientos más pequeños entre conductores, varillas a tierra adicionales, incrementar el área para el sistema de tierra etc.

Paso 12

Después de satisfacer los requerimientos de las tensiones de paso y de malla, se pueden requerir conductores adicionales de puesta a tierra para los equipos y algunos electrodos verticales, los conductores adicionales a la malla para tierra se agregan cuando el diseño de la malla no incluye conductores cercanos al equipo que será puesto a tierra.

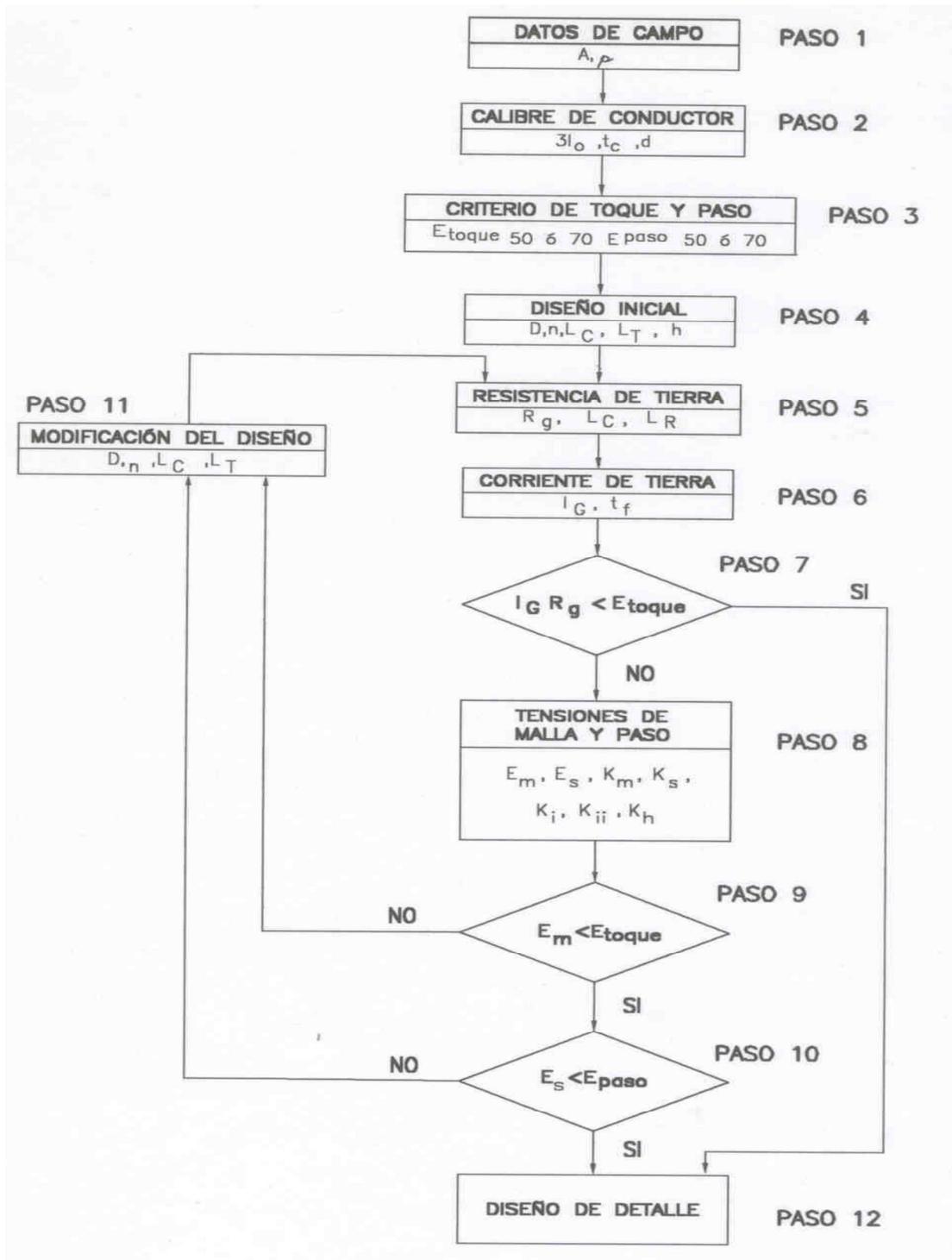


Fig. 6.1 diagrama de flujo de la secuencia de pasos que se deben realizar para el diseño del sistema de tierra

Los parámetros indicados en el diagrama de flujo se describen a continuación.

Paso 1

A = Área ocupada por la malla de tierra

ρ = Resistividad del terreno

Paso 2

$3I_0$ = Corriente de falla simétrica en la subestación

t_c = Tiempo de duración de la falla

d = Diámetro del conductor de la red

Paso 3

E_{toque} = Tensión de toque

E_{paso} = Tensión de paso

Paso 4

D = Separación entre conductores de la red

n = Factor geométrico compuesto por los factores n_a y n_b

L_c = Longitud del conductor horizontal de la red

L_T = Longitud total del conductor horizontal de la red y los electrodos verticales

h = Profundidad a la cual se encuentra la red del sistema de tierra

Paso 5

R_g = Resistencia de la red del sistema de tierra

L_c = Longitud del conductor horizontal de la red

L_R = Longitud total de los electrodos de tierra

Paso 6

I_G = Corriente máxima de tierra

t_f = Tiempo de duración de la falla considerando el factor de decremento

Paso 7

I_G = Corriente máxima de tierra

R_g = Resistencia de la red del sistema de tierra

E_{toque} = Tensión de toque

Paso 8

E_m = Tensión de malla

E_{paso} = Tensión de paso

K_m = Factor de espaciamiento para la tensión de malla

K_s = Factor de espaciamiento para la tensión de paso

K_i = Factor de ajuste de la geometría o de irregularidad de la red

K_{ii} = Factor de ajuste de peso y efectos internos de la red

K_n = Factor que enfatiza los efectos de la profundidad de la red

Paso 9

E_m = Tensión de malla

E_{toque} = Tensión de toque

Paso 10

E_{paso} = Tensión de paso

E_m = Tensión de malla

Paso 11

D = Separación entre conductores de la red

n = Factor geométrico compuesto por los factores n_a y n_b

L_c = Longitud del conductor horizontal de la red

6.2 plano de la subestación y datos de campo (paso 1)

Se debe de tener un plano de arreglo general de la subestación para determinar el área donde se debe instalar el sistema de tierra. Obtener el valor de la resistividad del suelo (se debe de realizar un estudio de la resistividad del suelo), para determinar el perfil de la resistividad del suelo y el modelo del suelo necesario (suelo homogéneo o de dos capas) además de la aportación máxima de la corriente de corto circuito monofásica suministrada por el sistema (para nuestro caso este dato lo obtenemos de CFE)

Para el diseño de la red de tierra se considera lo siguiente:

La red estará formada por cables de cobre desnudo 4/0 AWG como mínimo, considerando cable 2/0 AWG para la conexión a tierra de las bases de los equipos, incluyendo también varillas copperweld (electrodos), soldaduras exotérmicas para conexiones fijas, y mecánicas para equipos móviles, enterrado a poca profundidad del nivel del suelo, el mínimo 60 cm.

Además se consideran los siguientes factores:

- a) El estudio que se realizó de la resistividad del terreno nos da un valor de $\rho : 52.5 \Omega - m$
- b) Aportación máxima de corriente de cortocircuito monofásica suministrada por el sistema 29.8 Ka. Este dato lo obtenemos del estudio que realizó de CFE
- c) El valor de la medición de la resistencia a tierra de la red instalada debe ser igual o menor a 1Ω .
- d) Temperatura ambiente promedio del lugar donde estará ubicada la subestación $27.8 \text{ }^\circ\text{C}$
- e) Tiempo de duración de la falla $t=0.5\text{seg}$.
- f) Espesor de la capa superficial del terreno $h : 0.20\text{m}$
- g) Profundidad de colocación de la red $h_s : 1\text{m}$
- h) Resistividad de la capa superficial $3000 \Omega\text{-m}$ (grava)

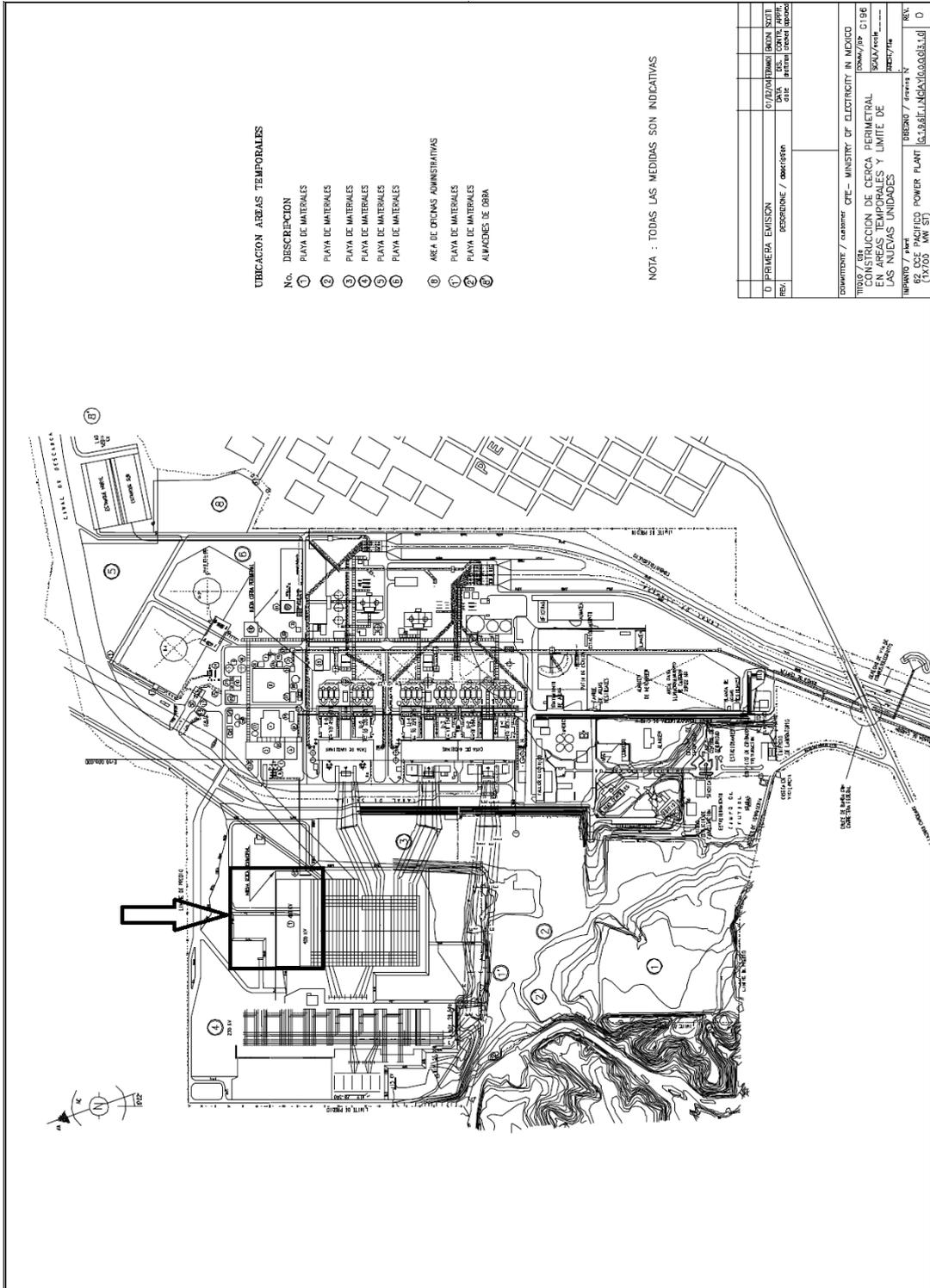


fig. 6.2 ubicación de la nueva subestación de 400kv.

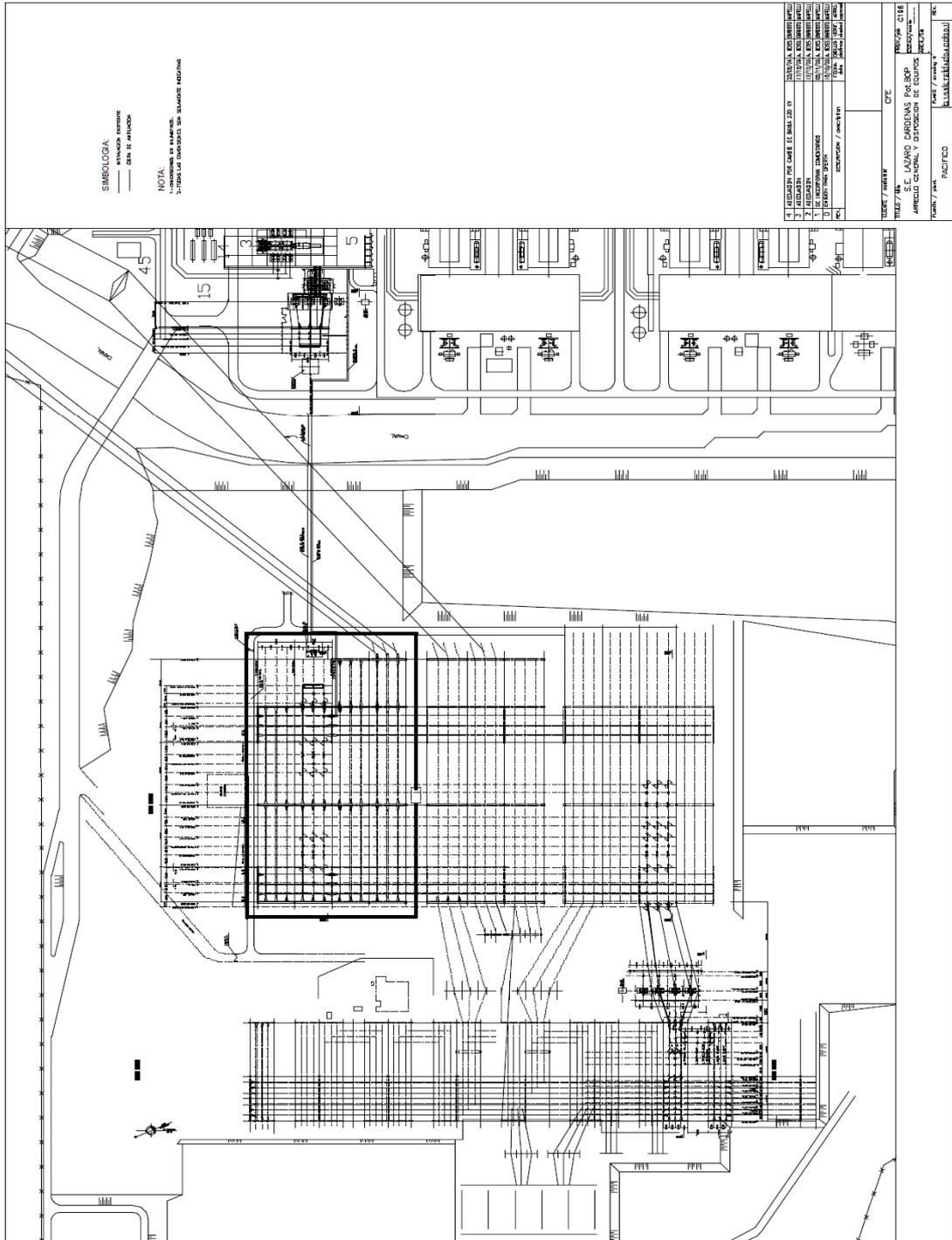


fig. 6.3 área de la red de tierra de la nueva subestación

6.3 cálculo de la sección transversal del conductor (paso 2)

Para determinar la sección transversal del conductor de puesta a tierra y de la red de tierra, la corriente de falla $3I_0$ debe ser la máxima corriente futura de falla esperada que puede ser conducida por cualquier conductor del sistema de tierra, y el tiempo (t) debe ser el tiempo máximo de liberación de la falla incluyendo el tiempo de la protección de respaldo.

Para calcular la sección transversal del conductor se debe de considerar la corriente de falla de fase a tierra (falla monofásica) por ser la corriente resultante mas severa, en nuestro caso no se requirió de hacer dicho estudio (este estudio de corto circuito se elaboro anteriormente por CFE) ya que este dato nos lo proporciono la compañía suministradora de energía eléctrica (CFE) que fue de $I_{CC} = 29.8$ kA. Como lo muestra en las bases de licitación además de algunos otros documentos del proyecto, aunque se puede comprobar la corriente de corto circuito con los datos obtenidos que son los parámetros del sistema de 400 KV.

Los parámetros del sistema de potencia eléctrico local, al cual se conectarán las instalaciones, están dados para el año 2007 y son los siguientes:

Corrientes de corto circuito

Bus de 400 KV

Falla Trifásica (kA) : 26,3
Falla Monofásica (kA) : 29,8

Dichos valores corresponden a la máxima generación del sistema en el bus de 400 kV de la Subestación Lázaro Cárdenas Potencia y consideran la aportación de la Central Pacifico.

Por lo anterior la capacidad interruptiva mínima de los interruptores de 230 kV y 400 kV deben ser de 50 kA y 63 kA respectivamente.

Relación X/R y redes de secuencia del sistema en p.u. (considerando una potencia base de 100 MVA)

BUS	Ro	Xo	R1	X1	Xo/Ro	X1/R1
LCP- 400	0,00014	0,0036	0,00019	0,00556	25,71	29,26

Sustituyendo estos valores en la formula [3.6] tenemos que:

$$I_0 = \frac{3(400,000/\sqrt{3})}{3(0.00019) + (0.00019 + 0.00019 + 0.00014) + j(0.00556 + 0.00556 + 0.0036)} = 29.8 \text{ KV.}$$

Para calcular la sección transversal del conductor se debe tener el valor de la corriente máxima de falla a tierra. Conocido el cociente de resistividad y las características (constantes) de cada material se aplican en la formula. La condición mas critica de corriente de corto circuito en la subestación es para una falla de fase a tierra (falla monofásica) Por lo tanto sustituyendo en [2.1] y observando los valores de constante de materiales en tabla 2.1 tenemos:

$$A_{kcmil} = 29.8 \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{3.42}{0.5 * 0.00381 * 1.78}\right) \ln\left(\frac{242 + 250}{242 + 27.8}\right)}} = 238.97$$

$$238.97kcmil \approx 250kcmil$$

Sustituyendo en [2.2] tenemos:

$$A_{mm^2} = 29.8 \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3.42 * 10^{-4}}{0.5 * 0.00381 * 1.78}\right) \ln\left(\frac{242 + 250}{242 + 27.8}\right)}} = 121.05$$

$$121.05_{mm^2} \approx 126.7_{mm^2}$$

Con la sección transversal calculada se utilizara un conductor de cobre desnudo con conductividad de 97% de calibre 250 AWG. = 126.7_{mm²}

Determinación de la corriente máxima de malla I_G

Sustituyendo en [3.2] Para el calculo de la división de corriente S_f

$$sf = \frac{29.8KA}{29.8KA} = 1$$

Para el cálculo de I_G (ver tabla 3.1) de valores típicos del factor de decremento para $t = 0.5$ y $D_f = 1.026$

La corriente que puede circular en una malla para tierra en casos de falla, se conoce como “corriente máxima de malla” la cual se determina con la ecuación [3.3]

$$I_G = 1.026 * 29800 = 30575A.$$

Se omite el factor de la división de corriente por ser $S_f = 1$

6.4 cálculo de las tenciones de paso y de contacto (paso 3)

El tiempo de exposición de la falla debe ser el máximo tiempo hasta que la falla se libere, normalmente el valor se encuentra en el intervalo de 0.1 a 1.0 s.

Tomando en cuenta que en la subestación no se tendrá acceso al público en general se considera un peso promedio del cuerpo humano de 70 Kg. Además de considerar el valor de la capa superficial = $3000 \Omega - m$ y $\rho = 52.5$ y $t_s = 0.5_{seg}$

Ver tabla 5.1 valores de resistividad de materiales aislantes

Calculando el factor C_s sustituyendo en formula [5.6]

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{52.5}{3000} \right)}{2 * 0.2 + 0.09} = 0.82$$

Sustituyendo en [5.8] y [5.10] tenemos:

$$Ec_{70} = (1000 + 1.5 * 0.82 * 3000) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 1041.32v$$

$$Ep_{70} = (1000 + 6 * 0.82 * 3000) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 3499.21v$$

Para calcular las tenciones correspondientes a personas con un peso aproximado a 50 kg. Se utilizan las mismas formulas con la condición de cambiar el valor de la constante 0.157 por 0.116.

6.5 diseño preliminar de la malla (paso 4)

El diseño preliminar debe incluir una malla para tierra la cual está formada por conductores que permitan el acceso a los conductores de puesta a tierra de los equipos y estructuras. La separación inicial estimada de los conductores de la red para tierra, así como la ubicación de los electrodos verticales (varillas para tierra) deben tener como base la corriente I_G y el área de la subestación que será puesta a tierra.

En la práctica las mallas para tierra en las subestaciones de Comisión Federal de Electricidad se construyen cuadradas o rectangulares, para nuestro caso en cuanto a la red principal de tierras, se ampliara la red existente manteniendo la configuración geométrica original, (la sección existente de la red de tierra consta de conductores horizontales cruzados formando una malla y la separación de la cuadrícula es aproximadamente de 15 metros por 15 metros) así como también la sección del conductor empleado, cobre desnudo de 250 kcm. El área de la

subestación es de 125 metros de ancho por 225 metros de largo de forma rectangular.

Los valores de las tensiones de paso y de contacto resultantes en la instalación, son inversamente proporcionales a la longitud del cobre enterrado. En nuestro caso tratándose de una ampliación de la malla existente y debido al incremento de conductor enterrado se verán mejoradas las condiciones de seguridad del sistema original.

Se sugiere que la separación inicial de acuerdo a los niveles de tensión del sistema (en caso de no contar con programas de cálculo de red de tierra) sea la siguiente: para subestaciones convencionales nuevas con tensión de 115kv en el lado de alta tensión:

-la cuadrícula de la malla para tierra será de 8*8 m. En toda el área del terreno y de acuerdo al criterio adoptado para el aterrizamiento de la cerca.

Para subestaciones convencionales nuevas con tensiones de 230 y 400 kv en el lado de alta tensión:

-la cuadrícula de la malla para tierra será de 10*10 m o hasta de 15*15m. En toda el área del terreno y de acuerdo al criterio adoptado para la puesta a tierra de la cerca.

En un sistema de tierra de una subestación, el espaciamiento típico entre conductores de la malla para tierra puede estar entre 3 y 7 m.

Siendo estas consideraciones un factor no limitativo debido a que cada subestación tiene sus propias características que se deben adecuar a las soluciones del sistema.

Como se va a ampliar la central termoeléctrica, la red de tierra que se construirá conservará las características de la red de tierra existente, esto es: el espaciamiento entre conductores será de aproximadamente 15*15 m. de forma rectangular

En cuanto al número de electrodos se considera lo siguiente

La cantidad de electrodos verticales (varillas de tierra) se verifican en función de los resultados de los cálculos de la resistencia eléctrica máxima y de las tensiones seguras de paso y de contacto, aunque no existe una ecuación para determinar el número óptimo de electrodos verticales que tengan una disipación efectiva de corriente, estos pueden instalarse en los extremos de la malla, en la periferia de la red y en algunos puntos de la unión del perímetro, y de las regiones donde se requiera, además de que se deben de colocar en equipos como transformadores de potencia con una separación mínima de 2 veces su longitud y 5 veces su longitud aproximadamente.

Disposición física de la red

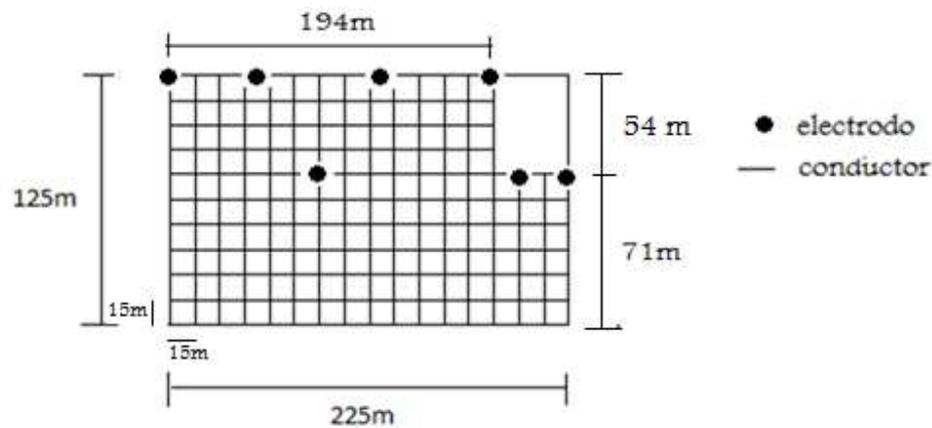


fig. 6.4 malla rectangular con 7 electrodos de 3m. c/u

$$\text{Area} = 125m * 225m = 28125m.$$

$$\text{perimetro} = 2(125 + 225) = 700$$

$$\text{conductores eje } x = 11 \therefore 4 * 194m + 7 * 225m = 2351m$$

$$\text{conductores eje } y = 17 \therefore 14 * 125m + 3 * 71m = 1963m$$

$$\text{longitud total del conductor} = 2351m + 1963m = 4314m$$

$$\text{longitud de electrodos} = 3m \therefore 3m * 7 \text{ electrodos} = 21m$$

Calculando el diámetro del conductor:

$$d = \sqrt{\frac{4 * 121.05}{3.1416}} = 12.41m = 0.012mm.$$

Calculando la distancia entre conductores:

$$D = \frac{2 * 125 * 225}{4314 - 125 - 225} = 14.19$$

6.6 Cálculo de la resistencia de tierra (paso 5)

La estimación de la resistencia de tierra preliminar en el sistema de tierra, debe efectuarse tomando en consideración los valores siguientes:

- Para subestaciones de potencia en alta tensión a nivel de transmisión y de subtransmisión, el valor de la resistencia de la malla de tierra debe ser aproximado a 1 Ω .
- Para subestaciones de potencia así como de distribución de media tensión, el valor de la resistencia de tierra debe ser aproximadamente 5 Ω .

De acuerdo al documento que muestra el estudio de la resistencia del suelo que realizo el instituto de ingeniería de la UNAM llamado manifestación de impacto ambiental modalidad particular del proyecto de CFE llamado proyecto 62 CCE pacifico central carboelectrica, El tipo de suelo donde se encuentra la subestación esta compuesto por arcilla, arena y grava de consistencia firme a muy firme como se muestra en la figura 6.5, Conocer el tipo de suelo nos da un valor aproximado de su resistividad, (aunque es muy importante y es obligatorio realizar el estudio de la resistencia del suelo) como la composición del suelo para nuestro diseño es arena y arcilla la resistividad aproximada esta en el rango de 50 a 200 Ω -m siendo la mas común 100 Ω -m. como se muestra en la tabla 4.1 de resistividades promedio de varios tipos de suelo. Se realizo el estudio de las mediciones de resistividad del terreno de la subestación usando el método de wenner el cual consistió en cuatro puntos de medición espaciados homogéneamente tomando un espaciamiento entre electrodos de 1m, 5m, 10m, 15m, y 25m. Se elabora una tabla de registro de mediciones anotando datos de numero de prueba, espaciamiento entre electrodos, resistencia del suelo y se calcula la resistividad con los datos obtenidos aplicando la formula [4.2] en nuestro caso porque utilizamos el método de wenner, La resistividad del terreno promedio calculada es de: 52.5 Ω -m.

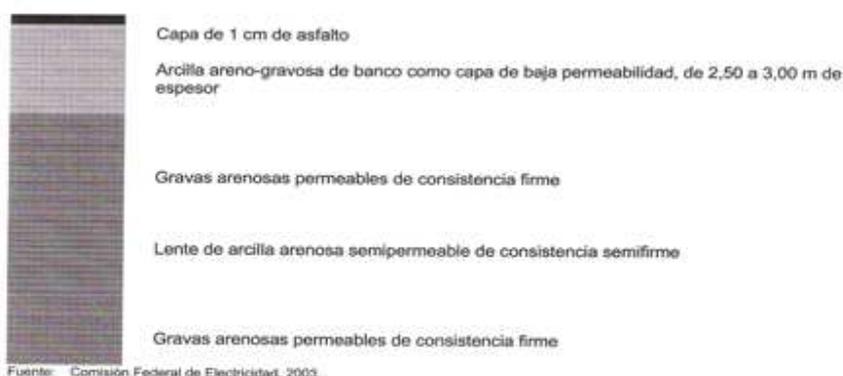


Fig. 6.5 composición del terreno de la nueva subestación de 400

Aplicando formula [4.10] debido a que nuestra red esta a la profundidad de 1m.

$$R_g = 52.5 \left[\frac{1}{4314} + \frac{1}{\sqrt{20(28125)}} \left(1 + \frac{1}{1 + \sqrt{20/28125}} \right) \right] = 0.15 \Omega - m$$

6.7 Calculo de la corriente máxima de malla IG (paso 6)

A fin de evitar un sobredimensionamiento del sistema de tierra, para el diseño de la malla para tierra se utiliza únicamente la porción de la corriente de falla $3I_0$ que fluye a través de la malla para tierra hacia tierra remota. Sin embargo la corriente

máxima de malla para tierra I_G debe considerar la peor localización y tipo de falla, el factor de decremento y cualquier expansión futura del sistema

El cálculo de la corriente de la malla para tierra I_G se indica en el paso 2.

6.8 calculo del potencial de la red de tierra (GPR) (paso 7)

Sustituyendo en [5.11]

$$GPR = 30575 * 0.15 = 4856.25v$$

Si el valor de la máxima elevación del potencial de tierra en el diseño preliminar se encuentra debajo de la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, ya no es necesario análisis alguno. Únicamente se requieren conductores adicionales para la puesta a tierra de los equipos.

Siendo el valor del $GPR = 4856.25v$. Superior a la tensión de contacto tolerable $Ec_{70} = 1041.32v$. Es necesario verificar la tensión máxima de malla y de paso

6.9 Calculo de las tenciones de malla y de paso (paso 8)

Calculo de K_{ii}

$K_{ii} = 1$ Para mallas para tierra con electrodos verticales a lo largo de su perímetro y/o en las esquinas, así como para las mallas con electrodos verticales a lo largo del perímetro y dentro del área de la malla para tierra.

Para nuestro caso como los electrodos de nuestra malla no cubren todo el perímetro de la red se utiliza la formula [5.14]

$$k_{ii} = \frac{1}{(2 * 12.81)^{2/12.81}} = 0.61$$

Sustituyendo en [5.15] obtenemos K_n

$$k_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Sustituyendo en [5.17]

$$n_a = \frac{2 * 4314}{700} = 12.32$$

Sustituyendo en [5.18]

$$nb = \frac{700}{4\sqrt{28125}} = 1.04$$

$$nc = 1$$

$$nd = 1$$

Sustituyendo en [5.16]

$$n = 12.32 * 1.04 * 1 * 1 = 12.81$$

Sustituyendo en [5.22]

$$Ki = 0.644 + 0.148 * 12.81 = 2.53$$

Para la malla de tierra con electrodos verticales en las esquinas, así como a lo largo del perímetro y distribuidas en la malla de tierra, la longitud efectiva del conductor L_m es:

Sustituyendo en [5.13]

$$km = \frac{1}{2 * 3.1416} \left[\ln \left[\frac{1419^2}{16 * 1 * 0.012} + \frac{(1419 + 2 * 1)^2}{8 * 1419 * 0.012} - \frac{1}{4 * 0.012} \right] + \frac{0.61}{1.41} \ln \left[\frac{8}{3.14(2 * 1281 - 1)} \right] \right] = 0.91$$

Para mallas de tierra con electrodos verticales en las esquinas así como a lo largo del perímetro y distribuidas en la rejilla para tierra, la longitud efectiva del conductor se obtiene Sustituyendo en [5.24]

$$lm = 4314 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{3}{\sqrt{225^2 + 125^2}} \right) \right] 21 = 4346.84$$

Por lo tanto la tensión de malla se obtiene Sustituyendo en [5.12]

$$Em = \frac{52.5 * 0.91 * 2.53 * 30575}{4346.84} = 850.18$$

Para mallas con o sin electrodos de tierra, la longitud efectiva L_s de conductores enterrados es:

Sustituyendo en [5.26]

$$I_s = 0.75 * 4314 + 0.85 * 21 = 3253.35$$

De [5.27] Fórmula para calcular K_s

Para profundidades usuales de malla para tierra entre $0.25 < h < 2.5\text{m}$, la constante K_s se obtiene como:

$$k_s = \frac{1}{3.1416} \left[\frac{1}{2 * 1} + \frac{1}{14.19 + 1} + \frac{1}{14.19} (1 - 0.5^{(12.81-2)}) \right] = 0.19$$

Por lo tanto la tensión de paso es:

La ecuación para calcular la tensión de paso [5.25]

$$E_p = \frac{52.5 * 30575 * 0.19 * 2.53}{3253.35} = 237.17$$

6.10 Comparación de las tensiones de contacto y de malla (paso 9)

Si la tensión de malla calculada es menor que la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, el diseño puede darse por concluido. De no ser así el diseño tiene que ser revisado. (véase paso 11)

Comparando la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano con la tensión de malla tenemos que:

$$E_{malla} < E_{toque}$$

$$E_{toque} = 812.81 < 1041.32$$

6.11 requerimientos (paso 10)

Si ambas, la tensión de paso y de malla calculadas con el diseño preliminar son menores que las tensiones de paso y contacto tolerables por el cuerpo humano, el diseño necesita únicamente proporcionar la puesta a tierra de los equipos.

Comparando la tensión de paso con la tensión de malla tenemos que:

$$E_{paso} = 187.98 < 3499.21$$

Como se puede observar en los resultados anteriores, se concluye que se realizo un buen diseño de la red de tierra y cumple con el objetivo, así como con los valores requeridos por las normas internacionales y lo principal proporcionar protección a los equipos y ante todo la seguridad humana.

Por lo tanto: nuestro sistema de tierra puede darse por concluido

6.12 modificación del diseño (paso 11)

Si se exceden los límites de las tenciones de paso o de contacto, se requiere que el diseño del sistema de tierra se revise. Estas revisiones pueden incluir el incrementar el área para el sistema de tierra, espacios de adicionales mas pequeños entre conductores y varillas para tierra, edemas de un compuesto químico.

Cuando no se cumplen las condiciones descritas se requiere que el diseño del sistema de tierra se revise. Estas revisiones pueden incluir incrementar el área para el sistema de tierra y que por lo tanto se incrementara la longitud del conductor, espaciamientos adicionales más pequeños entre conductores y varillas para tierra, además de una capa superficial de algún material aislante.

6.13 detalles finales (paso 12)

Después de satisfacer los requerimientos de las tenciones de paso y de malla, se pueden requerir conductores adicionales de puesta a tierra para los equipos y algunos electrodos verticales. Los conductores adicionales a la malla para tierra se agregan cuando el diseño de la malla para tierra no incluye conductores cercanos al equipo que será puesto a tierra. Los electrodos verticales adicionales pueden aequipos principales. El diseño final debe revisarse con el propósito de eliminar riesgos debido a potenciales transferidos y otros riesgos asociados.

Como un paso adicional se puede calcular el precio total del sistema de tierra de la subestación, que consta del cable de cobre desnudo de 250 kcm, además de conectores y accesorios, electrodos y si se llego a utilizar algún compuesto químico.

Se utilizo conductor de cobre desnudo temple duro, el precio por metro aproximado de cable desnudo de cobre es de 282 pesos, y la longitud total de la red de tierra es de 4314 m. por lo tanto:

$$282 \times 4314 = 1,216, 548 \$$$

Solamente contemplamos la red de tierra de la subestación y no la red de tierra de todo el proyecto, así que, Para obtener el precio total de la red de la subestación, estamos contemplando los conectores, los electrodos, los compuestos químicos, la mano de obra, tanto civil como eléctrica, renta de maquinaria, etc. Contemplando todo esto el precio aproximado de la red de la subestación es de 0.5MDD y esta dentro del rango aceptable del precio ya que no sobrepasa el 5% del costo total del proyecto que fue de 611 MDD. Aproximadamente el costo total de la red de tierra de todo el proyecto es de 6 MDD.

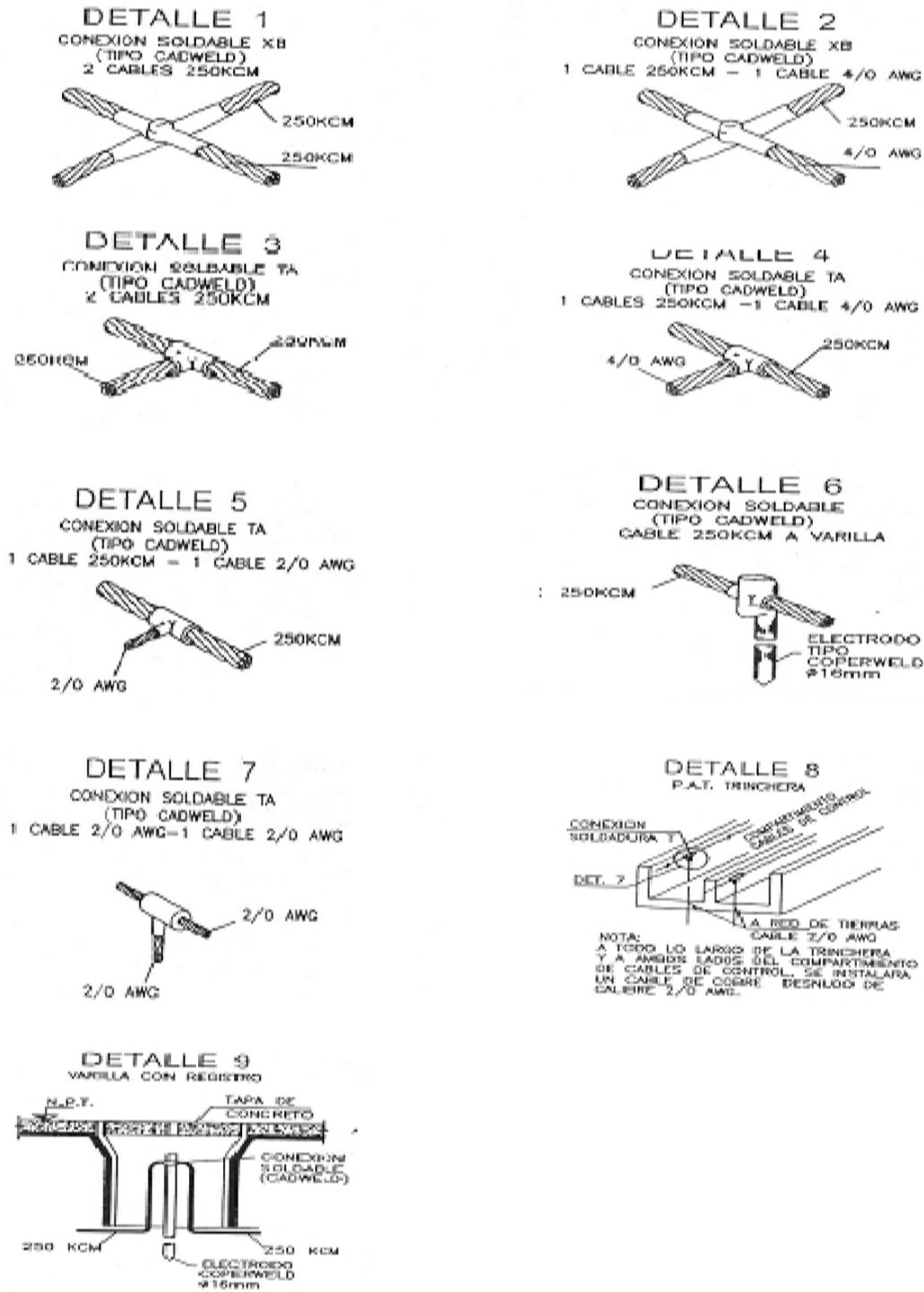


fig. 6.6 Detalles de la red de tierra

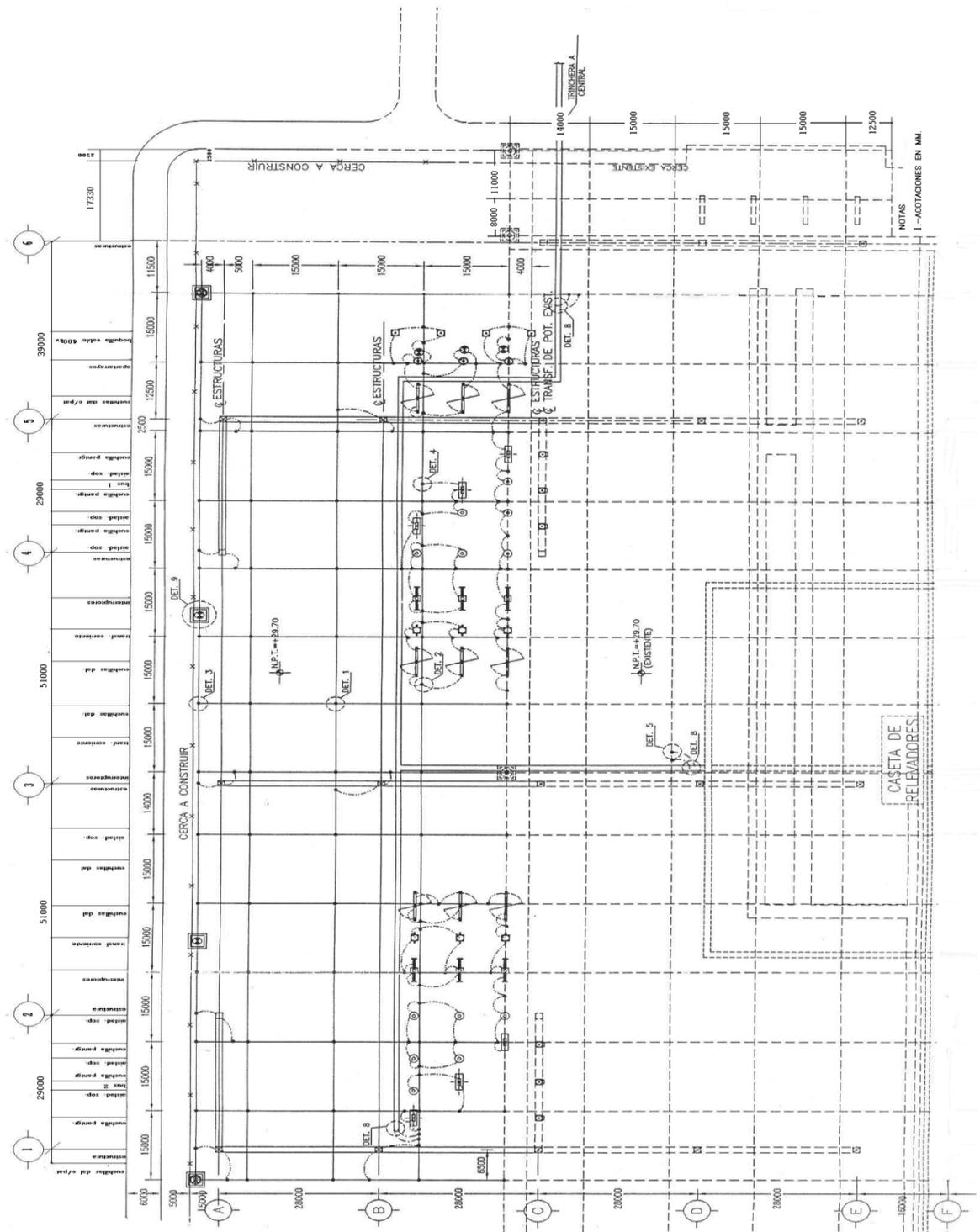


Fig. 6.7 diseño final de la red de tierra

CONCLUSIONES

Como se observo en esta tesis existen normas que rigen el sistema de puesta a tierra y que dichas normas tienen el objetivo de entregar parámetros a los usuarios para asegurar un buen diseño del sistema de tierra cuya finalidad esta relacionada en primer lugar con la seguridad de las personas y en segundo lugar con la protección de los equipos además de la continuidad y eficiencia del servicio eléctrico, y además de que se cumple con los objetivos que se tenían planteados en base a la seguridad y de acuerdo a las normas internacionales y a las normas de diseño de CFE. De esta forma nuestro diseño del sistema de tierra es seguro debido que la tensión de malla=850 y es inferior que la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano=1041 v.

Nuestro diseño fue realizado para prevenir el peligro de cualquier contacto accidental con las partes metálicas de la subestación además de que los equipos eléctricos circundantes estén protegidos en caso de una falla, los cuales serán aterrizados (conectados a la malla de tierra) y estarán provistos de los apoyos y aisladores adecuados. Aun con estas medidas de seguridad permanece el peligro de que estas partes normalmente aisladas puedan tener contacto con las partes que no están a tensión y que se tenga un potencial con respecto al suelo (tierra) apareciendo un potencial anormal, esto puede ocurrir por alguna causa accidental o defecto de aislamientos.

Este peligro se redujo y eventualmente se elimino, porque nuestro diseño de la red de tierra es seguro, por lo tanto, se estableció una conexión a tierra conveniente que se caracteriza por un valor suficientemente pequeño como para evitar potenciales que resulten peligrosos.

Tanto por razones de seguridad del personal como del buen desempeño del sistema eléctrico, el diseño, correcta instalación, mantenimiento y monitoreo del sistema de puesta a tierra de una instalación eléctrica es vital para cumplir con dichas razones.

Para la elaboración de mi trabajo de tesis se necesitaron dos trabajos de investigación hechos previamente que van ligados a esta tesis, los cuales son: la resistividad del suelo y la corriente de corto circuito.

La aportación de mi trabajo de tesis es mostrarle a los alumnos de la carrera de ingeniería eléctrica-electrónica, lo sencillo que resulta la aplicación de la norma NRF-011-CFE que propone la Comisión Federal de Electricidad para calcular una red de tierra además de que se espera crear conciencia en el lector, para que se den cuenta de los efectos que puede tener la corriente eléctrica en los seres humanos y en los equipos. Y de esta forma comprendan la importancia de un sistema de protección como lo es un sistema de tierra.

Mis observaciones acerca la norma NFR-011-CFE es que solo analiza redes de tierra cuadradas o rectangulares y no hace énfasis en las redes en forma de L o cualquier otra forma de la red, además de que para la resistividad del terreno utiliza el método de wenner o de schlumberger y no hace referencia al método de los 3 puntos o caída de tensión que es un método muy importante y que debe de

realizarse cuando la red ya esta construida para verificar el valor de la resistencia del suelo, y aplicando este método de medición (método de 3 puntos) determinar si se cumple con la normatividad que menciona que la resistividad debe ser menor o igual a 1 ohm, además de que no menciona como se calcula en numero de electrodos, ni la distancia que deberá estar uno respecto a otro, otro punto importante y que no menciona, es la resistividad de los zapatos que usan las personas, además de que se maneja una resistividad del cuerpo humano de 1000 Ω cuando esto depende de las características del cuerpo humano como son : peso, altura, humedad, edad, sexo, etc.y tampoco hace mención de métodos de computadora que pueden utilizarse, la norma se refiere al tipo de suelo de dos capas y para este análisis se requiere de un programa de computadora.

Los valores que obtuvimos son conservadores ya que desprecian la resistividad de los zapatos, además de que se le agrega una capa de material aislante (roca) a la superficie de la subestación y con esto incrementar la seguridad al evitar tener un accidente debida a la tensión de paso.

Como complemento se puede investigar la correcta conexión de los equipos y partes metálicas hacia la malla de tierra, que tipo de calibre de cable debe emplearse, el mantenimiento constante del sistema de tierra, además de la inspección periódica, y mediciones que deben realizarse por lo menos cada 6 meses.

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE Std 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Grounding"
- [2] Sistema de tierra para plantas y subestaciones eléctricas "NRF-011-CFE-2004"
- [3] R. Velásquez S., H. Sarmiento V., Manual de Diseño de Redes de Tierra para Subestaciones Eléctricas de Potencia, IIE, División Sistemas de Potencia. Diciembre 1980.
- [4] Normas de Construcción de Subestaciones, "Sistema de Tierra". Gerencia de Construcción, LFC, 1981.
- [5] A. Juárez T., Sistemas de Puesta a Tierra, Editado y distribuido por el autor, México, 2001.
- [6] NOM-001-SEDE-1999: "Instalaciones Eléctricas (Utilización)".
- [7] G. Enríquez H., A. Esquivel R., H. Ramírez N., "Consideraciones a Tomar en el Diseño de Sistemas de Tierra en Subestaciones" CFE, LFC, 1985
- [8] Diseño de Redes de Tierra, Ingeniería Eléctrica, Gerencia de Planeación e Ingeniería Edit. Relaciones Industriales, Compañía de Luz y Fuerza del Centro, 1975
- [9] G. Enríquez H., Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas, Limusa 1980.
- [10] CYMGRD for Windows, "User's Guide and Reference Manual", March 1998.
- [11] G. Enríquez H., Análisis Moderno de Sistemas Eléctricos de Potencia Limusa 1981
- [12] Manual Técnico de Instalaciones Eléctricas. CONDUMEX. 2009
- [13] Criterios de Diseño Eléctrico CFE-62-cce-pacifico 2006
- [14] Ing. Rodolfo Lorenzo B., Manual de Diseño de Subestaciones Eléctricas. Junio 2005.
- [15] Manual de Conexión a Tierra. Ing. A. Corona agosto 2000
- [16] Manual de notas, símbolos y detalles de conexión a tierra CFE 1997
- [17] Especificaciones de Diseño de Subestaciones de Distribución, Subdirección de Distribución CFE junio 1999
- [18] Recomendaciones Para el Cálculo Preliminar de Redes de Tierra en Plantas y Subestaciones Eléctricas CFE-00J00-01

- [19] Diseño de Subestaciones CFE Subdirección de Construcción Coordinación de proyectos termoeléctricos abril 2004
- [20] G. Enríquez Harper Elementos de Centrales Eléctricas México Limusa 1983
- [21] Ruiz Vasallo F. Manual de Puesta a Tierra de Equipos Eléctricos Barcelona CEAC 1987
- [22] José Ramírez Vásquez Estaciones de Transformación y Distribución. Protección de Sistemas Eléctricos Enciclopedia Ceac de Electricidad Ediciones Ceac.
- [23] Guía de Diseño de Subestaciones (CFE-IIE) Instituto de Investigaciones Eléctricas
- [24] J. RAUL M. Diseño de Subestaciones Eléctricas Mc Graw Hill México 1987
- [25] Servicios Especializados de Ingeniería de Protecciones Eléctricas “Curso de Protecciones Eléctricas Dirigido a los Ingenieros del Departamento Eléctrico CFE”
- [26] Manifestación del Impacto Ambiental, Modalidad Particular, del Proyecto 62 CCE Pacifico (Central Carboelectrica) Instituto de Ingeniería UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México
- [27] G. Enríquez Harper Pruebas y Mantenimiento a Equipos Eléctricos México limusa
- [28] G. Enríquez Harper Diseño de Sistemas Eléctricos Limusa
- [29] G. Enríquez Harper Fundamentos de Instalaciones Eléctricas Limusa

DIRECCIONES DE INTERNET

<http://es.wikipedia.org/wiki/Cortocircuito>

<http://www.monografias.com/trabajos21/mallas-de-tierra/mallas-de-tierra.shtml>

http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_electronica/calculocorriente_cortocircuito

http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Short_circuit

<http://www.monografias.com/trabajos13/sisttierr/sisttierr.shtml>

<http://www.youtube.com/watch?v=gj89xPoX8nY>

<http://www.youtube.com/watch?v=vo6q4z4lqAg>