

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SISTEMA DE RED DE TIERRAS EN SUBESTACIONES  
ELECTRICAS DE POTENCIA

POR:

ING. GUILLERMO RODRIGUEZ JAUREGUI

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO  
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA  
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L., MEXICO, JUNIO DEL 2002

2002

TM

Z5853

.M2

FIME

2002

.R6

SISTEMA DE RED DE TIERRAS EN SUBESTACIONES

SISTEMAS DE TIERRAS EN SUBESTACIONES

GG

RR

J

ELECTRICAS DE POTENCIA



1020148255

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SISTEMA DE RED DE TIERRAS EN SUBESTACIONES  
ELECTRICAS DE POTENCIA

POR:

ING. GUILLERMO RODRIGUEZ JAUREGUI

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO  
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA  
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L., MEXICO, JUNIO DEL 2002

970898

TM

Z5853

.M2

FIME

2002

.R6

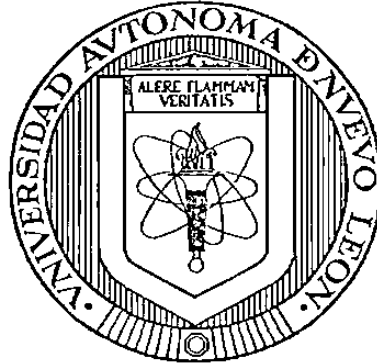


FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**SISTEMA DE RED DE TIERRAS EN SUBESTACIONES  
ELECTRICAS DE POTENCIA**

**POR**

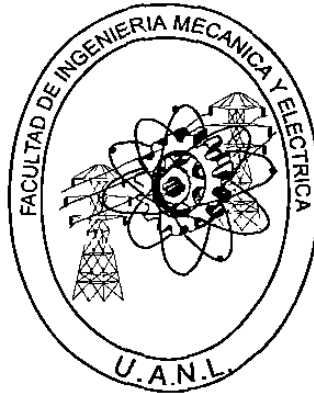
**ING. GUILLERMO RODRIGUEZ JAUREGUI**

**TESIS**

**OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L., MÉXICO, JUNIO DEL 2002**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**SISTEMA DE RED DE TIERRAS EN SUBESTACIONES  
ELECTRICAS DE POTENCIA**

**POR**

**ING. GUILLERMO RODRIGUEZ JAUREGUI**

**TESIS**

**OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L., MÉXICO, JUNIO DEL 2002**

**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Sistema de red de tierras en subestaciones eléctricas de potencia", realizada por el alumno Ingeniero Guillermo Rodríguez Jauregui matrícula 0574874, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El Comité de Tesis



Asesor

M.C. Felix González Estrada



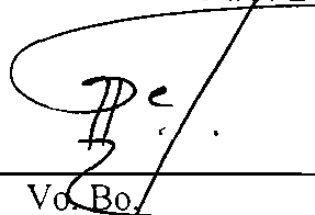
Coasesor

M.C. Roberto Villarreal Garza.



Coasesor

M.C. Evelio P. González Flores



Vo. Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. a 3 de Junio del 2002



# DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico en primer instancia a mi esposa Marisol, por la paciencia, sacrificio y comprensión que me tuvo.

A mis dos hijas Ana Sofía y Ángela Marisol, por las cuales trato de superarme día a día y ser más competente en mi profesión.

A mis padres Melchor y Rosa Maria, a los cuales les debo la educación que me brindaron, gracias por darme las facilidades para estudiar una carrera profesional.

A mis hermanos, amigos y demás familiares por todo el apoyo que a lo largo de mi vida me han brindado.

A mis asesores y maestros de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica; al igual que a mis compañeros y amigos de la Comisión Federal de Electricidad por sus consejos y enseñanzas que nunca olvidare.

# PROLOGO

En la actualidad las mallas de tierra de muchas subestaciones en el área metropolitana de Monterrey se encuentran en estado crítico de confiabilidad en el sentido de seguridad del personal.

Lo anterior se explica fácilmente, las mallas de tierra por lo general se diseñan y construyen tomando en cuenta el valor de corriente de falla que se tenía en ese momento y al cual se le aplica o debía aplicar un factor de crecimiento de acuerdo al pronóstico de generación esperada.

Por lo general al sistema de tierras solo se le da mantenimiento cuando se detecta una falla, por reporte de inspección o medición; en la práctica general no nos preocupamos por asignar un presupuesto para renovar, sustituir o modificar dicho sistema, en las subestaciones de mayor antigüedad; actualmente en la Comisión Federal de Electricidad se encuentran en operación subestaciones eléctricas que tienen fechas de puesta en servicio de hace ya más de veinte años, las cuales fueron diseñadas sin imaginar los altos niveles de corto circuito que actualmente se tienen.

El aplicar correctamente los factores de crecimiento cuando se planea construir una subestación es parte primordial en la confiabilidad de la misma a través de los años. Este trabajo está orientado especialmente a todas aquellas personas que se involucran en el diseño de un sistema de puesta a tierra.

# INDICE

Capitulo	Página
SÍNTESIS.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Objetivo de la tesis.....	2
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Justificación del trabajo de tesis.....	3
1.5 Metodología a seguir.....	4
1.6 Limites del estudio.....	4
1.7 Revisión bibliográfica.....	4
2 INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA.....	5
2.1 Presentación.....	5
2.2 Problema básico.....	5
2.3 Condiciones de peligro.....	7
2.4 ¿Qué es una instalación de puesta a tierra?.....	7
2.5 Funciones y objetivos básicos de una instalación de puesta a tierra.....	7
2.6 Definición de la puesta a tierra.....	9
2.7 Antecedentes históricos.....	9
2.8 Naturaleza de las corrientes a tierra.....	10
2.9 Orígenes de las corrientes a tierra.....	10
2.10 Importancia y trascendencia de las corrientes a tierra.....	11
2.11 Clasificación de los sistemas de puesta a tierra.....	12
2.12 Elementos.....	13
2.13 Sistema de electrodos.....	13
2.14 Efectos fisiológicos de las corrientes a tierra.....	14
2.15 Problemas básicos de la red de tierras.....	14
2.16 Ventajas de un sistema eficazmente aterrizado.....	15
2.17 Problemas típicos que se encuentran en el diseño de red de tierras.....	15
2.18 Aspectos sociales y los sistemas de seguridad en la técnica de la energía eléctrica.....	15
3 RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	19
3.1 Condiciones de los terrenos.....	19
3.2 Dependencia de las características eléctricas del terreno.....	20
3.3 Factores que influyen en la resistividad del terreno.....	21

3.3.1	Composición del terreno.....	21
3.3.2	Sales solubles y su composición.....	22
3.3.3	Estado Hidrométrico del terreno.....	22
3.3.4	Temperatura.....	22
3.3.5	Granulometría.....	23
3.3.6	Compacidad.....	23
3.3.7	Estratigrafía.....	23
3.3.8	Otros factores.....	24
3.4	Medición de la resistividad de la grava de una subestación.....	24
3.4.1	Método.....	25
3.4.2	Observaciones y resultados.....	26
3.5	Medida de la resistividad del terreno.....	27
3.5.1	Métodos de medida.....	27
3.5.2	Consideraciones sobre la medida de la resistividad.....	28
3.5.3	Elementos necesarios para efectuar las mediciones.....	29
4	FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS Y FACTORES ESSENCIALES EN EL ANÁLISIS DE INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA.....	30
4.1	Generalidades.....	30
4.1.1	Acerca del transporte de electricidad a través de la tierra.....	30
4.1.2	Acerca de la naturaleza eléctrica de la corriente a tierra.....	31
4.1.3	Influencia de la naturaleza eléctrica de la corriente en el grado de dificultad del análisis riguroso.....	33
4.1.4	Acerca de los factores integrantes técnico y social.....	33
4.2	Aspectos geológicos y geotécnicos.....	35
4.2.1	Generalidades.....	35
4.2.2	Aspectos geológicos generales.....	35
4.2.3	La corteza terrestre.....	36
4.3	Aspectos geofísicos.....	37
4.3.1	Propiedades magnéticas y eléctricas de rocas y minerales.....	37
4.3.2	Los potenciales eléctricos.....	37
4.3.3	Conductibilidad eléctrica.....	38
4.3.4	Constante dieléctrica.....	38
4.3.5	Permeabilidad magnética.....	39
4.4	Aspectos geoelectrónicos.....	39
4.4.1	Generalidades.....	39
4.4.2	Conceptos esenciales del sistema electrodo-Tierra.....	40
5	DIFERENTES TENSIONES A TIERRA.....	41
5.1	Efectos de la corriente sobre el cuerpo humano.....	41

5.2	Limites de corrientes tolerables por el cuerpo humano.....	42
5.3	Cono de tensión.....	44
5.4	Tensión de paso.....	44
5.5	Tensión de contacto.....	45
5.6	Investigación de los potenciales de transferencia.....	46
5.6.1	Rieles.....	47
5.6.2	Neutros de los alimentadores o corto circuitos secundarios de baja tensión.....	47
5.6.3	Tubería de agua.....	48
5.6.4	Edificios.....	48
5.6.5	Cercas metálicas.....	48
5.7	Tensión de seguridad.....	48
5.8	Magnitudes eléctricas que caracterizan una puesta a tierra.....	49
5.9	Tensiones de paso y de contacto aplicadas	
6	EFFECTOS FISIOLÓGICOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA.....	50
6.1	Percepción del cuerpo humano al paso de la corriente.....	50
6.1.1	Inicio de la contracción.....	50
6.1.2	La repartición de la corriente por el cuerpo.....	52
6.1.3	El inicio del paro respiratorio.....	52
6.2	Umbral de sensibilidad.....	52
6.3	Umbral de no soltar.....	53
6.4	Muerte aparente.....	53
6.5	Fibrilación ventricular y su umbral.....	53
6.5.1	Parámetros de que depende.....	54
6.6	Concordancia de sucesos para originar riesgo de accidentes.....	55
6.7	Resistencia eléctrica del cuerpo humano..	56
6.8	Corrientes tolerables.....	58
6.9	Tensiones de seguridad.....	59
6.10	Condiciones de peligro.....	59
7	INTENSIDAD DE CORRIENTES DE FALLA.....	61
7.1	Panorama general ..	61
7.2	Corrientes máximas de corto circuito a tierra.....	62
7.2.1	Tipos de fallas a tierra.....	62
7.2.2	Componente simétrica de la corriente a tierra de la falla en el instante de la falla.....	62
7.2.3	Factores de corrección considerados en el cálculo de las corrientes de corto circuito..	63
7.2.4	Factores de decremento "D".....	63
7.2.5	Factores de seguridad por crecimiento de la subestación.....	65
7.3	Efecto de la resistencia de la red de tierras.....	65

7.4 Efecto de los hilos de guarda.....	66
7.5 Tiempos máximos de eliminación de una falla.....	67
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
8.1 Conclusiones.....	68
8.2 Recomendaciones.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	70
LISTADO DE FIGURAS.....	71
APÉNDICE (CALCULO DE RED DE TIERRAS).....	72
GLOSARIO.....	85
RESUMEN AUTOBLOGRAFICO.....	91

# SINTESIS

En este estudio doy a conocer la importancia que se le debe prestar al sistema de red de tierras en las subestaciones eléctricas de potencia, especialmente de tipo intemperie; desde el diseño, elaboración de proyecto, factores que hay que tomar en cuenta y criterios a considerar.

El conocer los efectos a los que las personas quedan expuestas cuando se encuentren dentro o en las cercanías de una instalación eléctrica en especial una subestación, al ocurrir una falla a tierra en el sistema; dichos efectos pueden causar hasta la muerte si las condiciones que se presentan coinciden en tiempo, lugar y posición de la persona.

Un factor importante a considerar es la magnitud del nivel de corto circuito que la compañía suministradora debe proporcionar en el punto donde se ubicará la subestación, brindando además el factor de incremento del sistema para garantizar y brindar una mayor protección en lo que a seguridad se refiera.

Se plantea el problema de la resistividad de los terrenos, los diversos tipos que se tienen en la región, su medición y sus métodos; así como la influencia que tiene en el buen diseño de una red de tierras. Plantear y dar a conocer los factores que influyen en la resistividad como lo son la granulometría, temperatura, compacidad entre otros.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El arreglo de un sistema de red de tierras para una subestación eléctrica de potencia depende mucho de los criterios utilizados por los ingenieros que la diseñan, provocando con esto una incertidumbre en el funcionamiento de la misma tanto en el estado normal de operación como en la eventualidad de una falla interna o externa del sistema.

El nivel de potencia de corto circuito actual en las principales ciudades de México se ha incrementado de manera considerable, provocando con esto que las corrientes que circulan en una falla a tierra son más grandes y por consecuencia se crean gradientes de potencial más peligrosos.

Aunado a esto la dependencia en gran parte de la composición física del terreno, y las condiciones pluviales existentes, originan a que el diseño de una malla de tierras nunca será de características iguales en una subestación y otra, aun y que tengan en común la misma capacidad y tamaño.

## 1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS

La realización de esta tesis persigue los siguientes objetivos:



- 1) Establecer bases para el diseño de una red de tierras, dar a conocer los valores límite de diferencias de potencial que puedan existir en una subestación bajo condiciones de falla, entre puntos que puedan ser tocados por una persona.
- 2) Revisar los métodos utilizados para el sistema de tierras en subestaciones, con especial enfoque en la seguridad, desarrollando criterios para un diseño seguro.
- 3) Desarrollar métodos analíticos que ayuden en la comprensión y solución de problemas típicos de gradientes de potencial.
- 4) Unificar criterios en el diseño de una red de tierras.
- 5) Ayudar a clarificar la nebulosidad que rodea la problemática de la puesta a tierra.
- 6) Que sirva de apoyo tanto para estudiantes como para profesores de la ingeniería eléctrica y ramas afines, así como a profesionistas de la práctica general en tales disciplinas, tanto en las tareas de planeación y construcción de sistemas de tierras que se requieran dentro de subestaciones eléctricas.
- 7) Difundir los avances tecnológicos más recientes en nuestro país.
- 8) Dar a conocer los valores actuales y futuros de la potencia de corto circuito en el área metropolitana de Monterrey.

### 1.3 HIPÓTESIS

Es posible lograr el diseño de una red de tierras más confiable, previendo incrementos de capacidad en plantas generadoras, tomando factores de corrección adecuados.

### 1.4 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS

Como prioridad se pretende proteger al máximo la vida de una o varias personas que laboren o transiten en las cercanías de una subestación a causa de un choque eléctrico.

Aunado a todo esto, el costo de los equipos instalados en una subestación de distribución o de potencia es elevado, el buen funcionamiento y tiempo de vida útil depende en gran parte a la solidez y confiabilidad del sistema de tierras, por lo que es conveniente orientar al desarrollo de un sistema más efectivo y eficaz.

Hacer conciencia de que un buen sistema de tierras radica en dar seguridad a las personas durante un eventual traspaso de corriente hacia la tierra, pero también en promover la eficiencia de los procesos técnicos involucrados y por supuesto, en el monto de los recursos necesarios para la realización de las instalaciones de puesta a tierra.

## 1.5 METODOLOGÍA A SEGUIR

- Proporcionar un conocimiento amplio de todo lo relacionado al diseño de una red de tierras.
- Revisión de los diferentes métodos existentes en la planeación y construcción de red de tierra .
- Comparar los diferentes métodos y diseños estableciendo el más adecuado.

## 1.6 LIMITES DEL ESTUDIO

Llevar a la practica los conocimientos teóricos, desarrollando un sistema de tierras en el que se puntualicen los aspectos aquí descritos así como su seguimiento en el mantenimiento y supervisión de la misma.

## 1.7 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El Instituto de Investigaciones Eléctricas al igual que la Comisión Federal de Electricidad, se han preocupado intensamente por este tema, ambos se basan principalmente en lo establecido por la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.), tratando de establecer como prioridad el proporcionar seguridad a los seres vivos dentro y en las cercanías de una subestación eléctrica. Sin perder de vista el buen funcionamiento de los equipos, y la calidad del servicio.

## 2 INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA

### 2.1 PRESENTACIÓN

La temática de la puesta a tierra permite enfoques muy variados. El que he elegido para esta Tesis pretende ir introduciendo al lector de forma paulatina y natural en esta materia, tratando de arrancar desde el origen del problema.

### 2.2. PROBLEMA BÁSICO

El diseño de un sistema de tierra seguro, persigue los dos siguientes objetivos:

- Proporcionar un medio para llevar las corrientes eléctricas a tierra bajo condiciones normales o de falla, sin exceder los límites operativos de los equipos y procurando dar continuidad al servicio.
- Asegurarse que una persona que transite o permanezca dentro o cerca de las instalaciones que tienen equipo eléctrico energizado (subestaciones) no se vea expuesta a potenciales peligrosos y pueda sufrir una descarga eléctrica.

Los sistemas de tierra se pueden clasificar de dos maneras desde el punto de vista seguridad:

- Aterrizamientos intencionales, los cuales consisten en colocar electrodos a tierra a cierta profundidad de la superficie.
- Aterrizamientos accidentales, establecidos temporalmente por una persona la cual queda expuesta a gradientes de potencial peligrosos en una subestación.

La gente asume frecuentemente que un objeto aterrizado puede ser seguro de tocar. Una subestación que tenga resistencia de tierra muy baja, no es garantía de seguridad. Lo anterior porque no existe una relación simple entre la resistencia de un sistema de tierra y la máxima descarga de corriente a la que una persona puede ser expuesta. Por lo tanto una subestación que presente una baja resistencia de tierra puede ser peligrosa, mientras que otra subestación con muy alta resistencia puede ser segura o puede ser diseñada con mas seguridad. Por ejemplo si una subestación no tiene cable de neutro, es muy importante tener una muy baja resistencia de malla.

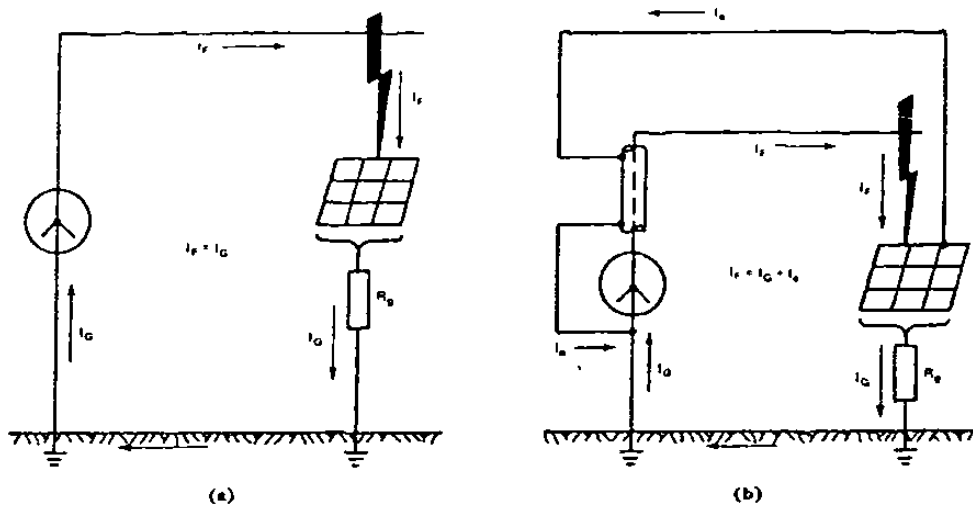


Figura No. 1

Muchas de las corrientes de falla entran a tierra causando frecuentemente un incremento en el potencial de paso, como se observa en la figura. Pero si tiene o presenta cable de neutro, gran parte de la corriente de falla retorna a través de la tierra a la fuente.

## 2.3 CONDICIONES DE PELIGRO

Durante una condición de falla, el flujo de la corriente a tierra producirá gradientes de potencial dentro y en los alrededores de la subestación. En la siguiente figura se muestran los efectos que se pueden presentar para una subestación con arreglo de malla rectangular y un terreno homogéneo.

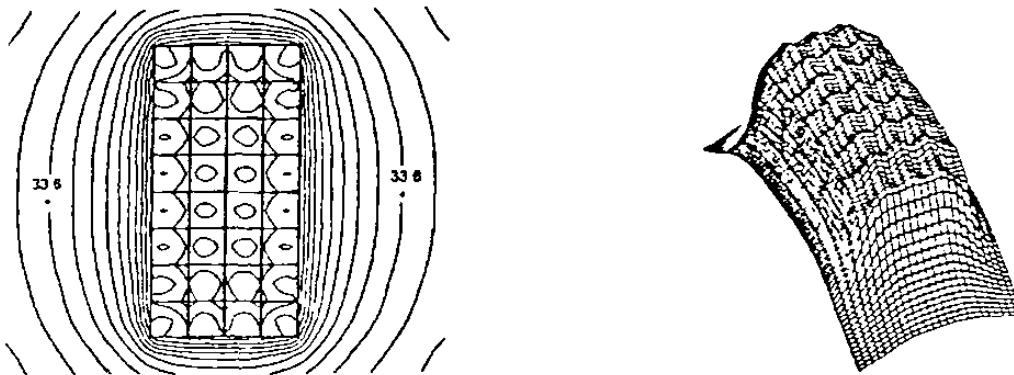


Figura No. 2

## 2.4 ¿QUE ES UNA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA?

Es la unión eléctrica con la tierra, de una parte de un circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo, definida también como el conjunto formado por electrodos y malla de tierra que conecta a los elementos que deban estar puestos a tierra en una instalación eléctrica, que para este caso será el de una subestación eléctrica de distribución tipo exterior.

## 2.5 FUNCIONES Y OBJETIVOS BÁSICOS DE UNA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA

Una instalación de puesta a tierra es aquella instalación eléctrica que tiene como misión derivar corriente hacia tierra, o bien establecer contacto con ella; las corrientes involucradas pueden ser de naturaleza estacionaria, de alta frecuencia o electromagnética en forma de

impulsos, corrientes que pueden ser originadas durante el funcionamiento de un sistema técnico hecho por el hombre o causado por un fenómeno natural. Se demuestra por otra parte, que la puesta a tierra más elemental satisface los requisitos para considerarse sistema, por tanto, se establece que una instalación de puesta a tierra es realmente un sistema de puesta a tierra.

Que se logrará:

- Limitar la diferencia de potencial, que en un momento dado puede presentarse entre estructuras metálicas y tierra.
- Posibilitar la detección de fallas a tierra y asegurar la actuación y coordinación de las protecciones.
- Limitar las sobretensiones internas (de maniobra, transitorias y temporales) que pueden aparecer en la red eléctrica.
- Evitar que las tensiones que originan las descargas de los rayos provoquen “flameos inversos”, para el caso de instalaciones tipo exterior, particularmente en las líneas aéreas de llegada a la subestación.

La circulación de las intensidades de corriente por la instalación de puesta a tierra, puede originar la aparición de diferencias de potencial entre ciertos puntos, por ejemplo entre la instalación de puesta a tierra y el terreno que la rodea o entre dos puntos del mismo, por cuya razón debe concebirse la instalación de puesta a tierra para que, incluso con la aparición de las diferencias de potencial aludidas se cubran los siguientes objetivos:

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

Debe hacerse especial énfasis en que la seguridad de las personas es lo que verdaderamente preocupa y se constituye en el fin primordial de la instalación de puesta a tierra, lo que no significa que se deje de reconocer la importancia de los otros tres objetivos.

Por esta razón toda subestación eléctrica deberá disponer de una protección o instalación de tierra, diseñada en forma tal que en ningún punto normalmente accesible del interior o exterior de la misma donde las personas puedan circular o permanecer, exista el riesgo de que puedan estar sometidas a una tensión peligrosa durante cualquier falla de la instalación o red unida a ella.

Mas sin embargo se conoce que es absolutamente imposible, amenos que se abandone totalmente la distribución de energía eléctrica, prevenir en todo momento, en todo lugar y bajo todas las circunstancias, la presencia de tensiones peligrosas. Sin embargo este hecho no ampara la responsabilidad de intentar disminuir esa probabilidad tanto como razonablemente se pueda. Afortunadamente en la mayoría de los casos mediante un diseño cuidadoso e inteligente esa probabilidad puede reducirse a un valor extremadamente bajo.

Al hacer referencia a la acción del “puenteo” de dos puntos con el cuerpo, se esta pensando en el comportamiento profesional del personal sobre la instalación y en el que se podría llamar comportamiento normal de las personas ajenas a ella.

En este punto conviene pues remarcar, que la puesta a tierra no garantiza de algún accidente ante las incalculables conductas, reacciones anómalas, imprudencias que las personas puedan llevar a cabo con respecta a una instalación de alta tensión.

## 2.6 DEFINICIÓN DE LA PUESTA A TIERRA

La ingeniería de la puesta a tierra es la tecnología de la acción que se ocupa de la aplicación de conocimientos científicos y tecnológicos sustantivos, pero también de conocimientos empíricos comprobados, dirigidos hacia la eficiente, segura y económica utilización de la tierra como elemento eléctrico para fines diversos.

## 2.7 ANTECEDENTES HISTORICOS

A pesar de que la tierra ha sido elemento eléctrico desde hace millones de años, tanto su reconocimiento como su utilización en los sistemas técnicos construidos por el hombre son muy recientes. Para las primeras civilizaciones la única manifestación eléctrica perceptible,

la electricidad atmosférica, estuvo siempre ligada a las supersticiones, a la mitología y a la religión. Sin embargo en los orígenes de la ciencia eléctrica se observó que ya desde entonces los hombres se interesaron en las posibles aplicaciones de la electricidad y sus efectos en los diversos aspectos de su vida diaria y, como se mencionó antes, se puede considerar que en los experimentos de hombres, prácticamente sin facilidades, pero con mente muy abierta, se encuentran las raíces de la técnica de la puesta a tierra, cuyos aspectos esenciales sigan siendo el estudio del comportamiento de la tierra como conductor y polo eléctrico, así como de sus efectos tanto benéficos como nocivos, sobre los sistemas técnicos hechos por el hombre y muy especialmente sobre los seres vivos.

## 2.8 NATURALEZA DE LAS CORRIENTES A TIERRA.

Las corrientes telúricas o de tierra son las corrientes eléctricas que se propagan a través de la tierra; pueden ser distinguidas según su naturaleza eléctrica como sigue: 1) estacionarias de corriente continua; 2) casi estacionarias o alternas lentas regularmente entre 50 y 60 Hz; 3) alternas rápidas o de alta frecuencia normalmente utilizadas en las telecomunicaciones, y 4) corrientes que se propagan como ondas electromagnéticas de impulso que son las corrientes de rayo.

## 2.9 ORÍGENES DE LAS CORRIENTES A TIERRA.

Las corrientes a tierra pueden ser causadas por fenómenos naturales, o bien, por el funcionamiento de ciertos sistemas eléctricos creados por el hombre. Dentro de las primeras, se tiene por ejemplo, a las corrientes que son originadas por campos variables en el tiempo, las causadas por fenómenos meteorológicos transitorios, así como las excitadas de manera natural dentro de la tierra. Debido a las oscilaciones en el tiempo del campo magnético de la tierra, se inducen en su masa corrientes parásitas a escala global. El campo magnético estacionario de la tierra provoca en las corrientes marinas y otras corrientes eléctricas unipolares por inducción. Los fenómenos eléctricos transitorios entre la atmósfera y la masa de tierra originan el establecimiento de corrientes eléctricas entre ellos, lo que se manifiesta por medio del rayo durante la tormenta.

En los límites entre materiales químicamente diferentes se crean campos eléctricos naturales que originan corrientes telúricas, tanto en la masa de la tierra como en corrientes



de agua, en la superficie, así como en la desembocadura de un río al mar al mezclarse el agua dulce con la salada; y aun, diferencias de temperatura dentro de la masa de la tierra ocasionan corrientes de calor, que frecuentemente van acompañadas del transporte de electricidad.

Dentro de los sistemas creados por el hombre, en ciertos casos, por razones de operación, y en otros por circunstancias accidentales, se derivan corrientes eléctricas hacia el suelo (superficie de la tierra considerada como soporte sobre el cual se mueven los seres vivos o se asientan las cosas), o bien, se utiliza como polo eléctrico. Ejemplos de caso de operación son los sistemas de transporte electrificado, tanto en corriente continua, como en corriente alterna.

Dentro de los casos accidentales se puede mencionar al que se origina debido a un defecto del aislamiento en los medios eléctricos de servicio, en los sistemas industriales o en las líneas aéreas de transporte de electricidad, pero también en los no menos importantes sistemas de distribución de energía eléctrica a los diversos usuarios y dentro de sus propias instalaciones.

Por otro lado, la caída de rayos sobre líneas aéreas y otra clase de instalaciones eléctricas originan la derivación de corrientes de impulso de elevada magnitud.

## 2.10 IMPORTANCIA Y TRASCENDENCIA DE LAS CORRIENTES A TIERRA.

El hecho de que la tierra conduzca corriente eléctrica es de suma importancia para los sistemas técnicos que el hombre construye, ya que participa de diversas maneras en el proceso central del sistema particular. Sin embargo, los efectos eléctricos, magnéticos, térmicos y fisiológicos que se originan durante el proceso del transporte y circulación de la corriente dentro de la tierra son también trascendentales, repercuten en la eficiencia y economía del sistema técnico en cuestión, así como en aspectos de seguridad para los seres vivos.

El valor de las intensidades de corriente que se traspan a la tierra puede llegar a varias decenas de kA; además, no se puede conocer de antemano la magnitud de la corriente ni el sitio exacto donde se sucederá el impacto del rayo. En principio toda clase de estructuras, en particular las metálicas de gran altura, son sitios muy probables de atracción para los rayos. En la práctica se trata de utilizar varias técnicas que provoquen la descarga en ciertos

lugares, en donde se puede controlar en cierta medida sus efectos, los cuales son de naturaleza eléctrica, magnética y térmica. Éstos producen altos voltajes que pueden llegar a dañar a las personas que se encuentren en el sitio del impacto o en su proximidad. De acuerdo con el estado actual de las investigaciones en este campo tecnológico, la medida más efectiva sigue siendo contar con una puesta a tierra eficiente.

Dentro del ámbito de las corrientes de tierra artificiales, el campo tecnológico de las líneas aéreas de transporte de electricidad es uno de los más trascendentales. Por ejemplo, en el caso de transporte por medio de corriente continua en altos voltajes se pueden usar dos opciones fundamentales: 1) utilizar un conductor metálico para el circuito de ida de la corriente, y para el circuito de retorno de la corriente, usar la tierra, o en el caso de un circuito submarino, el mar (el mar profundo presenta una alta conductibilidad), y 2) utilizar dos conductores metálicos en la operación normal y, en caso de una falla de aislamiento en una de las vías, utilizar la tierra como circuito de retorno de la corriente, conduciéndose entonces, por supuesto, solo la mitad de la potencia.

En los sistemas modernos de suministro de energía eléctrica en corriente alterna, tanto en alta tensión como en baja tensión, una falla de aislamiento origina la conexión a tierra de cuando menos uno de los conductores activos, dando por resultado el traspaso de la corriente de defecto a tierra, que servirá entonces como circuito de retorno hacia las fuentes de la misma, la corriente de retorno puede llegar a alcanzar magnitudes muy elevadas, en particular cuando se trata de redes con el punto estrella puesto a tierra directa o indirectamente. Tal hecho causará disturbios en la distribución del potencial entre las fases del sistema y a toda la operación de las líneas, originando la salida del servicio de las mismas. En esta clase de evento sí se puede calcular de antemano la magnitud de la intensidad de la corriente que circulará hacia la tierra.

## 2.11 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.

La primera clasificación de los sistemas de tierras es en base a su naturaleza: 1) instalación artificial de puesta a tierra, y 2) instalación natural de puesta a tierra, siendo las primeras aquellas instalaciones que se construyen específicamente para tal fin, utilizando las diversas clases de electrodos de puesta a tierra. La segunda, en cambio, son en realidad elementos de otros sistemas técnicos, por ejemplo las líneas de tuberías metálicas o de cables de energía con cubierta conductora, cimientos ( de estructura metálica ,de equipos

eléctricos, etc.), vías férreas y hasta vías de agua que se encuentren dentro del ámbito de la instalación que se desea proteger y/o en su proximidad.

La siguiente clasificación que se hará mención aquí es la que distingue a las instalaciones de puesta a tierra: 1) instalaciones de puesta a tierra de servicio; y 2) sistemas de tierra de protección. En este caso la primera es la que se aplica para satisfacer ciertas condiciones del servicio del sistema técnico en cuestión. La segunda, en cambio, es indispensable para asegurar que durante el traspaso de corriente a tierra sus efectos fisiológicos no dañen a los seres vivos que eventualmente estuviesen dentro del ámbito del sistema de tierras o en su proximidad en esos momentos.

## 2.12 ELEMENTOS

El elemento central de una instalación de puesta a tierra es el electrodo, que es un elemento metálico ( fierro, acero, cobre, aluminio, etc.), por medio del cual se introduce la corriente a la tierra; los electrodos adoptan formas geométricas bien ensayadas para tal fin y son: semiesfera, varilla (pica, tubo, bastón, etc.), conductor o banda, placa y anillo. Son componentes importantes, por supuesto, los conductores de tierra (los que unen al elemento por proteger con el electrodo), los conductores colectores (los conductores que unen a varios electrodos para la operación en paralelo), así como los conectores de unión (que hacen factible la unión correcta entre los diversos elementos del sistema de tierra).

## 2.13 SISTEMAS DE ELECTRODOS

Cuando la corriente de tierras no es muy intensa y el equipo o elementos por conectar a tierra no están muy separados entre sí, ni de un electrodo, la puesta a tierra puede hacerse por medio de ese único electrodo, con la forma geométrica más conveniente, es decir, la que ofrezca mejor eficiencia y requiera un menor gasto; sin embargo, cuando por el contrario, la corriente a tierra sea muy elevada y todos los medios de servicio y elementos por conectar a tierra estén muy desparramados sobre una superficie mas o menos extensa, se necesita utilizar varios electrodos y conectarlos de manera que trabajen en paralelo, integrándose de esta manera los llamados electrodos múltiples . Así se integran sistemas de electrodos con un único tipo de electrodos elementales ( con varillas, bandas, anillos, etc.).

## 2.14 EFECTOS FISIOLÓGICOS DE LAS CORRIENTES A TIERRA

Al circular la corriente de tierra por los electrodos es originan entre ellos y en la tierra que los rodea fenómenos de naturaleza eléctrica, magnética y térmica. Así por ejemplo, desde el punto de vista de seguridad para las personas, el potencial de electrodo y su distribución sobre el terreno son el problema central por atender, ya que se manifiesta como voltajes de contacto y de paso; tales tensiones no solo les pueden afectar a su salud, sino hasta ocasionarles la muerte. Se tienen ya determinados valores de grado de peligrosidad de la corriente sobre el cuerpo humano, es decir, los valores de corriente y de voltaje que son peligrosos para él, tales magnitudes están ya normalizadas y sirven de base para el diseño de los sistemas de puesta a tierra.

## 2.15 PROBLEMAS BÁSICOS DE LA RED DE TIERRAS

Durante una falla en una subestación, el flujo de corrientes a tierra produce gradientes de tensión dentro y alrededor de la misma, que se muestran en la figura para una subestación con una malla de tierra simple, rectangular, en un terreno homogéneo.

La resistencia que ofrece la tierra al paso de la corriente eleva el potencial eléctrico de la malla y a menos que se tomen precauciones adecuadas en el diseño, los gradientes en toda la superficie pueden resultar tan grandes en condiciones adversas que ponen en peligro a cualquiera que camine por ahí. Pueden resultar además diferencias de tensión peligrosas durante alguna falla entre estructuras o equipos conectados a tierra. Generalmente la geometría de un sistema de tierras es mas compleja que la mostrada en la figura y por ello no resulta fácil precalcularlas, ya que tampoco pueden determinarse en forma exhaustiva las condiciones del subsuelo.

Debe hacerse hincapié en que contrariamente a ideas generalizadas que a veces se expresan, una resistencia baja a tierra no es en sí una garantía de seguridad. No existe una relación simple entre la resistencia del sistema de tierras en conjunto y el potencial máximo del choque que pueda sufrirse. Una estación de baja resistencia a tierra puede en ocasiones hacerse peligrosa y, por lo contrario estaciones de alta resistencia pueden hacerse seguras por medio de diseños elaborados con cuidado.

La idea generalizada de que puede tocarse todo objeto conectado a tierra es falsa y resulta evidente que ella ha sido causa de muchos accidentes.

Por razones económicas se justifica un sistema de transmisión eficazmente aterrizado, lo que requiere de una conexión a tierra adecuada en cada subestación. Debido a que las mallas de tierra quedan enterradas fuera de la vista, podrían descuidarse durante su vida útil. Es por esto que uno como ingeniero deberá estipular una red de tierras que cumpla con características mecánicas, eléctricas y químicas para que puedan durar no menos de 30 años.

## 2.16 VENTAJAS DE UN SISTEMA EFICAZMENTE ATERRIZADO

- 1).- Costo mínimo de los equipos
- 2).- Mínima radio interferencia (RIF)
- 3).- Facilidad de localizar fallas
- 4).- Aplicación satisfactoria de relevadores
- 5).- Niveles mínimos de aislamiento (NBAI) y de estabilidad

## 2.17 PROBLEMAS TÍPICOS QUE SE ENCUANTRAN EN EL DISEÑO DE RFD DE TIERRAS

- 1) - Valor de Resistencia de tierra alto
- 2).- Altos gradientes de potencial en la superficie de la tierra
- 3).- Requerimientos de coordinación de protecciones
- 4).- Tensiones mayores de inducción electromagnética
- 5).- Dificil mantenimiento de la instalación por estar enterrada

## 2.18 ASPECTOS SOCIALES Y LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD EN LA TÉCNICA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Dentro de este sector, es valido establecer que por medio de las normas, prescripciones, reglamentos, etcétera, se pretende:

- 1) Proteger la vida de personas y animales útiles
- 2) Conseguir la suficiente seguridad de servicio en la producción, transporte y utilización de la energía eléctrica.
- 3) Evitar perturbaciones en los equipos que sirven como medios de seguridad en instalaciones y aparatos de energía eléctrica.

Consecuentemente, se declara que: “ cuando las instalaciones eléctricas y los medios de servicios eléctricos son planeados y construidos sin tomar en consideración los mejores conocimientos técnicos disponibles, normas, reglamentos, prescripciones, lineamientos y, en fin las reglas reconocidas en la técnica y además cuando aquellos no son aplicados ni utilizados correctamente, se pueden presentar riesgos y peligros para las personas y/o animales útiles, medios de servicio, edificaciones, plantas vegetales y hasta para el ambiente”.

Debe aceptarse que muchos accidentes mortales, la destrucción de medios eléctricos de servicio, así como la perturbación del grado de fiabilidad en la producción, transporte, almacenamiento y utilización de la energía eléctrica, puede evitarse si se concibe y adopta un sistema de seguridad, el cual estará constituido por conocimientos de diversa naturaleza: 1) científicos y tecnológicos ( electricidad, mecánica, electrofisiología, etc.); 2) economía; 3) sociología y psicología; 4) culturales, y 5) normalización.

Cuando se trata en particular de la seguridad de los medios de servicios eléctricos, se utilizan las técnicas: 1) de la protección con relevadores eléctricos; 2) de alta tensión (protección contra sobre tensiones, coordinación de aislamiento, etc.); 3) de la protección contra rayos ( interceptores de rayos, conductores de tierra o de blindaje, la puesta a tierra, etc.), y 4) de la supervisión y del diagnóstico anticipado. Las primeras bases en conocimiento o teorías tecnológicas sustantivas; las segundas en cambio, más en teorías operativas y de naturaleza empírica. En cuanto a la perturbación del grado de seguridad del servicio (disponibilidad, continuidad, etc.), el medio fundamental lo constituye la técnica de fiabilidad, la cual esta sustentada, por una parte, en teorías fenomenológicas físico - químicas, en teorías de la electrotecnia y de la mecánica técnica y, por otra parte, en teorías formales de matemáticas ( teoría de la probabilidad).

La seguridad de las personas y/o animales útiles se persigue, en principio, por medio de la puesta a tierra; sin embargo, cuando con ella no se puede garantizar el grado de seguridad

requerido, se complementa o se aplican ciertas medidas adicionales directas o indirectas de protección, según se trate de una instalación de alta o baja tensión. Así en el caso de instalaciones de alta tensión, en caso necesario se puede utilizar, por ejemplo las siguientes medidas adicionales indirectas:

- Aumentar la resistividad del suelo en las zonas peligrosas, agregando una capa de grava suelta ( ya con una capa de 0.15 m se consigue una suficiente seguridad).
- Uso de zapatos aislantes, con los cuales en estado seco se puede, teóricamente alcanzar una resistencia infinita del cuerpo, pero aún húmedos ofrecen una aceptada protección.
- Utilización de guantes aislantes ( secos y en buen estado) para el caso de contacto por medio de las manos.
- La delimitación de las zonas peligrosas ( donde se presenten voltajes de contacto y/o de paso peligrosos para los seres vivos).
- Y, aún aplicando alguna medida de protección de la técnica de seguridad demostrativa, por ejemplo avisos de peligro, llamadas de atención, recomendaciones, entre otras.

Si bien todas las medidas antes citadas utiliza la puesta a tierra, sólo en la medida de puesta a tierra de protección juega el papel principal; en las restantes medidas, tiene un papel secundario. Así cuando los requisitos de puesta a tierra de protección (generalmente se quiere un valor muy pequeño de las resistencias de propagación del electrodo) no se pueden conseguir en el sitio, se puede utilizar alguna otra de las siguientes medidas, usualmente junto con la puesta a tierra de servicio ( por ejemplo la puesta a tierra del neutro del transformador).

En cualquier forma , se trate de una instalación de alta o baja tensión, las anteriores medidas de seguridad no solo se deben aplicar sino además, integrar para formar un sistema de protección total, es decir tanto para los medios eléctricos de servicio y otros bienes como para las personas y/o animales útiles. Pero finalmente, el sistema de protección total debe garantizar la seguridad de los seres vivos, y ello no únicamente de los que se encuentren dentro de su ámbito, sino también de los que estén fuera, pero en sus cercanía. Por tanto, el

concepto moderado de sistema de seguridad en una instalación de energía eléctrica de gran tamaño, involucra los siguientes aspectos:

El análisis de peligros, defectos y fallas.

El manejo del punto estrella del transformador de potencia en las redes trifásicas de corriente alterna.

Los disturbios y análisis de magnitudes de corto circuito.

La puesta a tierra, la conexión al neutro y otras medidas de protección adicionales.

La técnica de la protección con relevadores para los medios de servicio.

La protección contra sobrevoltaje y la coordinación de aislamiento.

La técnica de la protección contra rayos.

La protección de reserva y contra maniobras erróneas.

La protección contra incendio y explosión.

La técnica de la fiabilidad.

La técnica de supervisión y el diagnóstico anticipado.

La técnica de la seguridad en el trabajo.

Dentro de tal sistema total de seguridad, cada uno de los anteriores conceptos puede ser, en un momento dado, elemento integrante o subsistema entero de seguridad.

En consecuencia, un sistema de puesta a tierra de protección es un subsistema de un sistema de seguridad o de protección completo. Así, por ejemplo, en particular en los sistemas de suministro de energía eléctrica con el punto estrella puesto a tierra directamente o indirectamente (en los cuales se traspasan a tierra, en caso de falla corrientes de alta intensidad, durante el diseño de una instalación de puesta a tierra de estaciones y de subestaciones, se debe aplicar un enfoque de sistema, con el propósito de lograr la solución más aproximada a la óptima (desde los puntos técnico, social y económico); para tal objeto se deberá sistematizar la técnica de la protección con relevadores para los medios eléctricos de servicio, adecuado entonces a los tiempos de aperturas de los interruptores de potencia del circuito en cuestión, a los valores de los voltajes de contacto y/o de paso máximos admisibles para las personas y/o animales útiles (los cuales deben ser diferentes entre ellos).



## 3 RESISTIVIDAD DEL TERRENO

### 3.1 CONDICIONES DE LOS TERRENOS.

Uno de los tres factores decisivos para el dimensionamiento y comportamiento de un sistema de tierras es la condición del terreno a través del cual van a circular las líneas de corriente, ello involucra no sólo al volumen de terreno sobre el cual esté emplazada la instalación de tierra, sino también el de sus alrededores. En realidad el terreno debe ser considerado como un sistema geológico y geoelectrico. El cálculo de la resistencia a la propagación de todo electrodo (ya sea sencillo o múltiple) se realiza con base a cierto valor de conductividad del terreno, la cual es variable en un amplio rango; por conveniencia, el análisis fundamental se desarrolla suponiendo un terreno homogéneo, es decir, que posee la misma naturaleza geológica y geofísica en el volumen de tierra ilimitado por todos lados en el que está embutido el sistema de tierra y por el cual las líneas de corriente se propagan, sin embargo en la realidad y en la mayoría de los casos, el terreno es de naturaleza heterogénea, lo cual causa que el comportamiento del sistema de tierras no resulte según el cálculo hecho para terreno homogéneo, ya que el valor de la conductibilidad ya no corresponde a tal clase de terreno.

Si bien la teoría permite llegar a una expresión matemática para indagar la conductividad macroscópica, es en verdad muy difícil de aplicar en la práctica; y, por otro lado, aunque los efectos de ciertas heterogeneidades son relativamente sencillas de determinar numéricamente en electrodos elementales, no resulta así el caso de electrodos múltiples. De ahí que la ingeniería de puesta a tierra se establezca que aún con la aplicación de la mejor teoría y con las facilidades más sofisticadas, se debe asumir que el resultado será sólo

aproximado, y que, por tanto, tendrá que ser mejorado con base a mediciones de campo y las modificaciones consecuentes.

Por supuesto los efectos de tales heterogeneidades tienen consecuencias diferentes sobre el comportamiento del sistema de electrodos, según se trate de una instalación de puesta a tierra de pequeña, mediana o gran dimensión. Por ejemplo durante el cálculo del sistema de electrodos para una extensa subestación ( de extra alta tensión) es imprescindible una investigación minuciosa del subsuelo del terreno en que se emplazará, pero también de sus alrededores; no hacerlo puede dar lugar a un dimensionamiento erróneo, es decir que resulte sobredimensionado o, por el contrario, ineficiente (técnica y socialmente) influyendo, por supuesto, en su costo.

### 3.2 DEPENDENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL TERRENO

Como se ha dicho, el valor de la resistencia de puesta a tierra, y también, como se verá mas adelante, el reparto de potencial en el suelo cuando el sistema de puesta a tierra está recorrido por una intensidad de falla, tienen, fundamentalmente, como factor proporcional determinante la resistencia específica o resistividad del terreno y del subsuelo en el que esta enterrada. Es por esta razón que la concepción de una red de puesta a tierra requiere, inicialmente, el análisis de la naturaleza del suelo sobre el que valla a realizarse y, de ahí la necesidad de tal estudio como primer paso para realizar el proyecto de una instalación de puesta a tierra.

Puede parecer que la investigación de la naturaleza y de la estructura geológica, para determinar la variación de la resistividad en función de la profundidad es más propia de la geofísica pero no es así, pues si bien para calcular la resistencia de una toma de tierra puntual es suficiente el conocimiento del perfil de la resistividad aparente de un terreno, no sucede lo mismo en el caso de una malla de gran extensión, como la de una subestación, por ejemplo.

Una de las bases necesaria para determinar la configuración de una red mallada que abarque una gran superficie es el conocimiento de la resistividad a diversas profundidades. En efecto, si bien la presencia de filones profundos muy resistentes o muy conductores, puede tener escasa influencia sobre la resistividad aparente del terreno, esas particularidades pueden ser capaces, no obstante, de variar notablemente la resistencia de la red de tierras

que se establezca más a flor de la superficie por la deformación que provocan sobre los filetes de corriente. Sin embargo, las resistividades del terreno en la superficie o en la profundidad, raramente se conocen antes del establecimiento de las obras y es frecuente que la realización de las redes de tierras sean las que aporten las primeras indicaciones sobre la calidad de los terrenos cuando, en buena lógica, debería ser el proceso inverso el que prevaleciera.

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

Si bien los componentes más importantes del terreno son, en estado seco, aislante (la sílice, el óxido de aluminio, etc.), su resistividad disminuye rápidamente en presencia de sales solubles y de la humedad.

Por otro lado, la composición de la tierra, incluso en lugar determinado, es muy heterogénea, presentándose capas, bolsas, depósitos, etc., tanto horizontal como verticalmente. Las zonas superficiales en que se instalan las tomas de tierra tampoco son uniformes y, además, están afectadas fuertemente por los cambios climáticos, lluvias y heladas.

Todo ello hace que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro y pueda resumirse en que la modifican, de manera muy notable, los siguientes factores del terreno:

- La composición.
- Las sales solubles y su concentración.
- El estado higrométrico.
- La temperatura.
- La granulometría.
- La compacidad.
- La estratigrafía.

#### 3.3.1 COMPOSICIÓN DEL TERRENO

La variación de la resistividad según la composición del terreno es muy acusada, tropezándose con la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están delimitadas como para saber, de antemano, el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la toma de tierra. Sucede, incluso, que para una misma clase de terreno, situada en distintos

parajes, la resistividad puede ser sensiblemente diferente. Los valores extremos que se encuentran en la práctica pueden variar de algunas decenas de Ohm-metro, para terrenos orgánicos y húmedos a una docena de miles para granitos secos.

### 3.3.2 SALES SOLUBLES Y SU CONCENTRACIÓN

Al ser aislantes los principales componentes del terreno, la conductibilidad del suelo es, esencialmente de naturaleza electrolítica, esto, es, la conducción de corriente tiene lugar, principalmente, a través del electrolito formado por las sales y el agua habitualmente contenida en el terreno.

### 3.3.3 ESTADO HIGROMÉTRICO DEL TERRENO

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

Cuando la humedad del terreno varíe considerablemente de unas épocas del año a otras, se tendrá en cuenta esta circunstancia al dimensionar y establecer el sistema de tierra. Se podrá usar recubrimientos de gravas como ayuda para conservar la humedad del suelo.

### 3.3.4 TEMPERATURA

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

### 3.3.5 GRANULOMETRÍA

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

### 3.3.6 COMPACIDAD

La resistividad se ve también afectada por el grado de compactación del terreno, disminuyendo al aumentar éste.

### 3.3.7 ESTRATIGRAFÍA

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

Queda, pues, justificado que la resistividad de las capas superficiales de un terreno presente variaciones estacionales bajo el efecto del hielo y la sequedad (que la aumentan) o de la humedad (que la disminuye). Esta acción puede hacerse notar hasta una profundidad de varios metros, en condiciones climáticas extremas y prolongadas.

Puede concluirse en que claramente se ve que la resistividad del terreno es una magnitud variable y que el único camino aceptable para conocer su valor consistirá en medirla, lo que permitirá establecer su magnitud en las condiciones existentes en cada caso.

### 3.3.8 OTROS FACTORES

La resistividad del suelo es, en ausencia de efectos secundarios, prácticamente independiente de la intensidad de corriente que lo recorre.

Existen, sin embargo, otros factores distintos de los ya enumerados que son susceptibles de modificar apreciablemente la resistividad del terreno pero que, por su naturaleza eléctrica, solo pueden surgir posteriormente al establecimiento de la red de tierra, tales como:

- El efecto de gradientes de potenciales elevados.
- El calentamiento del suelo a consecuencia de la circulación de corrientes de puesta a tierra elevadas o de forma prolongada.

### 3.4 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DE LA GRAVA DE UNA SUBESTACIÓN

La resistividad del agregado de roca utilizado como aislamiento de la superficie en las subestaciones eléctricas es un parámetro importante en el diseño de los niveles de seguridad de los voltajes de contacto y de paso. Esta roca presenta los valores mas bajos de resistividad cuando esta húmeda. El agua en la superficie y entre los pedazos de la roca forma la trayectoria principal de conducción de la corriente eléctrica. Algo de la conducción también tiene lugar a través de los pedazos de la roca, pero esta dependería probablemente de la porosidad y la composición química. El tamaño de los pedazos de la roca también juega un papel importante. Los agregados mayores tendrán menos punto de contacto y mayor resistividad húmeda que los mas pequeños del mismo material.

Para entender la importancia de la prueba de resistividad húmeda del material de la superficie, es necesario ver la ecuación utilizada para el voltaje tolerable de contacto será mas fácil diseñar un sistema de aterrizado seguro. El voltaje tolerable de contacto es:

$$E_{con} = (100 + 1.5 C_p E) k/\sqrt{t}$$

PE es la resistividad húmeda del material de la superficie. Esta última varía en cuatro órdenes de magnitud, desde 10 Ohm-metro o menos para algunos tipos de suelos húmedos, hasta más de 10,000 Ohm-metro para una capa de asfalto.

Ya que se ha postulado que la conducción eléctrica de una roca húmeda depende del grado de saturación de esta y de la resistividad del agua, se desarrolló un experimento para probar esta relación.

### 3.4.1 MÉTODO

La instalación experimental consistió en un cilindro de plástico de seis pulgadas de alto y 11.75 pulgadas de diámetro, con uno de sus extremos abiertos fijo a una base plana metálica. El cilindro se llenó con un agregado grueso lavado de  $\frac{3}{4}$ " a 1".

La roca utilizada fue granito. El extremo superior se niveló y se cubrió completamente con capas de láminas delgadas de aluminio. Se utilizó una almohadilla suave y con peso de 10 kg para presionar las láminas delgadas contra la roca.

Después de la instalación, se quitaron el peso, la almohadilla y las láminas y se humedeció la roca con agua de resistividad conocida. El agua se vertió sobre la roca, permitiendo que se filtrara a través de la muestra y se recolectó en una charola colocada en la parte inferior de la base metálica. Esta agua recolectada se vertió nuevamente sobre la roca. Este proceso se repitió por aproximadamente 10 a 20 minutos hasta que la roca estuviera completamente húmeda. Se colocaron nuevamente las láminas, la almohadilla y el peso sobre la parte superior de la roca húmeda. Se utilizó un medidor de resistividad de tierra para medir la resistencia de la roca húmeda 10 minutos después de mojar por última vez la muestra. La resistividad de la roca se calcula a partir de mediciones de siete parámetros.

Se utilizó agua de diferentes conductibilidades cada vez para humedecer la roca. Los valores de esta conductividad fueron: 20-, 40-, 93-, 158-, 323-, 880-, y 1750- micro Ohms/cm. Se comenzó el experimento utilizando la solución de 20- Ohms/cm y cada vez una de mayor conductividad; el experimento se repitió cada vez para asegurar que la instalación no retenía agua de mayor conductividad de la etapa previa. La solución se

preparo con cloruro de potasio y las conductividades se midieron utilizando dos diferentes medidores.

### 3.4.2 OBSERVACIONES Y RESULTADOS

La primer observación fue que resistencia de la masa de la roca húmeda vario con la instalación del experimento. Se obtuvo una medición diferente de la resistencia cada vez que se dreno la roca y se lleno el cilindro con la misma muestra de roca. Repitiendo este procedimiento 27 veces con la misma muestra, se midieron valores de resistencia entre 6779 y 7825 Ohms, una dispersión del 14 %. Esta variación fue debida al diferente arreglo de los pedazos de la roca en las diferentes instalaciones.

Debido a esta variación, se utilizo la misma instalación experimental para el resto del experimento cuando se estaban comparando las resistividades de la roca debidas a diferentes resistividades del agua. Cada vez, se enjuago la instalación con agua nueva. Por tanto el arreglo de las rocas no se cambio de un experimento a otro. (el volumen escurrido se recolecto y se reutilizo en el enjuagado. Esto se repitió aproximadamente 20 veces.)

El cilindro tenia 11.75 pulgadas de diámetro y seis de altura. La resistividad de la roca húmeda esta dada por:

$$P = 0.459 R$$

Donde ,

P= resistividad en Ohm-metro y

R= resistencia medida en Ohms.

La segunda observación fue que la resistencia de la instalación o montaje se incremento a medida que el agua drenaba de entre la roca. Por tanto, nosotros utilizamos los valores de resistividad calculados para el mismo tiempo transcurrido.

Se midió la conductividad final del volumen escurrido de cada experimento y encontramos que era diferente de la del agua utilizada para humedecer la roca. Estas son las



conductividades reales del agua en contacto con la roca cuando se hicieron las mediciones. Este cambio en la conductividad puede ser debido a un intercambio de iones entre la roca y el agua, o a una disolución de otros componentes de la roca en el agua.

Aunque medimos la conductividad del agua que estaba en contacto con la roca en el experimento, se escogió relacionar la variación de la resistividad de la roca húmeda a la del agua utilizada para humedecer la roca. En la práctica, si estas mediciones se hubieran hecho en campo, se podría utilizar agua de la llave, sin embargo, en la mayoría de los casos, el humedecimiento de la roca de la subestación es debido principalmente al agua de lluvia (la cual es normalmente de menor conductividad que la del agua de la llave) la derivación de las ecuaciones utilizando la resistividad del agua para humedecer haría más fácil realizar mediciones de campo con el agua de la llave fácilmente disponible y relacionar los resultados a lo que se obtendría realmente si el humedecimiento fuera debido a la lluvia.

### 3.5 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

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

#### 3.5.1 MÉTODOS DE MEDIDA

Existen diversos métodos para determinar la resistividad de un terreno pudiendo citarse, en primer lugar, el basado en la toma de muestras y el de los dos electrodos, pero que solo proporcionan indicaciones muy locales y, consecuentemente, insuficientes o engañosas para la concepción de las tomas de tierra.

También en alguna ocasión, se utiliza el sistema consistente en medir la resistencia de tierra de un electrodo que responda a una fórmula bien conocida (varilla por ejemplo) para determinar a partir de ahí, la resistividad del terreno que la rodea, método que tiene la ventaja de proporcionar una medida global pero cuya aplicación no resulta adecuada más que si la toma de tierra a implementar es de dimensiones comparables a la de los electrodos utilizados como referencia.

Existe también el método de los cuatro electrodos, el cual es el más utilizado para determinar la resistividad del terreno. En este procedimiento, se establece la resistividad, en función de la profundidad en la vertical de un punto, haciendo circular una corriente con la ayuda de un generador entre dos electrodos puntuales de pequeñas dimensiones, enterrados en el suelo. En el caso de que el terreno sea homogéneo, la resistividad aparente medida por el instrumento es casi idéntica a la resistividad real.

Considerado como una derivación de este método, se tiene también el método de Wenner, caso particular del método de los cuatro electrodos, que se disponen en línea recta y equidistantes, simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del suelo, no siendo necesario que la profundidad de las varillas, que para ello se utilizan, sobrepasen los 30 cm. El aparato de medida es un telurómetro clásico, siendo los dos extremos los de la inyección de la corriente de medida y los dos centrales, los de medida del potencial.

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

Noción de la profundidad de investigación:

La densidad de la corriente en el suelo decrece regularmente cuando aumenta la profundidad en la vertical de los dos electrodos centrales de medida del potencial ya que la corriente penetra tanto más profundamente en el suelo cuanto más alejados estén los electrodos de inyección. En la práctica, se puede admitir que la resistividad aparente es, básicamente, la de las capas comprendidas entre la superficie del suelo y la profundidad a la cual la densidad de corriente se ha reducido a la mitad de su valor en la superficie, siendo esta profundidad de investigación, el orden de magnitud de la distancia que separa dos de las varillas adyacentes, en suelo homogéneo.

### 3.5.2 CONSIDERACIONES SOBRE LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD

Ya se ha indicado que las variaciones climáticas influyen sobre la resistividad de las capas superficiales de un terreno. Es por ello que las lecturas de resistividad deben incluir anotaciones sobre las condiciones reinantes durante las medidas ( temperatura y condiciones

de humedad del suelo) y, si es posible, contrastarlas con las que se repitan en épocas diferentes del año.

La presencia en la zona de residuos de cuerpos metálicos o de filones de terreno muy resistente o muy conductores, que acaben aflorando a la superficie, puede perturbar las medidas de la resistividad, ya que para franquear tales obstáculos se originan modificaciones a la trayectoria de los filetes en el suelo y, en consecuencia, del campo eléctrico sobre los puntos de medición.

Mientras más grandes sean las desviaciones, más lecturas deberán tomarse, especialmente si alguno de los valores es tan elevado que haga intuir problemas graves de seguridad. Para un mismo punto de investigación es preciso efectuar dos medidas como mínimo, según dos ejes perpendiculares entre sí que pasen por el punto, recomendándose, no obstante, proceder a medir en otro lugar próximo, situado en la misma área de estudio.

Las medidas deben realizarse en condiciones representativas de la situación del electrodo en el futuro, y, por ello, si esta previsto modificar las condiciones naturales del terreno, mediante desmontes, las mediciones deben efectuarse una vez realizadas tales tareas o repetirlas, a efectos comparativos, una vez concluidas las mismas.

También es necesario efectuar la determinación de la resistividad en tiempo seco, tratando de reproducir las condiciones más desfavorables y si ello no fuera posible, se deberá de aplicar un cierto factor de seguridad que disminuya los resultados obtenidos.

### 3.5.3 ELEMENTOS NECESARIOS PARA EFECTUAR LAS MEDICIONES

El material necesario para determinar las resistividades del suelo es el siguiente:

- Un instrumento de medida de resistencia de tierra que tenga cuatro bornes.
- Cuatro varillas o piquetas metálicas que sirvan de electrodo.
- Cuatro cables aislados para conectar las varillas a las tomas del instrumento.

# 4 FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS Y FACTORES ESENCIALES EN EL ANÁLISIS DE INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA

## 4.1 GENERALIDADES

### 4.1.1 ACERCA DEL TRANSPORTE DE ELECTRICIDAD A TRAVES DE LA TIERRA

La tierra como elemento eléctrico, desempeña varias funciones: 1) circuito de retorno de corrientes eléctricas, es decir, para cerrar circuitos; 2) disipar corrientes eléctricas hacia el seno de la tierra, por ejemplo las corrientes de rayo, y 3) como polo eléctrico, por ejemplo en las telecomunicaciones.

Dentro de la rama eléctrica estas tres funciones son importantes y trascendentes. Así en el primero de los casos, dentro de la técnica de la energía eléctrica, la tierra hace la función de un conductor, operando en paralelo con los conductores metálicos, y por ello, dentro del ámbito tecnológico de las líneas aéreas, se le designa como “cuarto conductor”, el cual debe

ser considerado durante la determinación de la magnitud de la corriente por defecto de aislamiento en un cierto sitio de la trayectoria de la línea.

Se acepta en términos generales, que la tierra posee la cualidad de conducir corriente eléctrica, gracias a su conductividad natural, lo cual se acepta sin que se tenga conocimiento de los detalles, dificultades, límites, etc., de tal proceso físico y sin considerarle mayor importancia y aun, lo que es peor, sin siquiera estar conscientes de la enorme diferencia que existe entre la conductibilidad de los conductores metálicos y de la tierra, (la conductibilidad de un terreno no mal conductor es del orden de cinco millones de veces menor que la del cobre); en realidad, el transporte de electricidad es una cuestión nada trivial, difícil de explicar y en verdad muy compleja, en comparación con el proceso de circulación de la corriente por los conductores metálicos. Por otra parte la cuestión de la puesta a tierra, se maneja en general de manera muy simplista al considerarla como una solución automática y/o mágica, por el solo hecho de conectar los medios de servicio a tierra por medio de un electrodo, sin entrar en análisis del proceso físico-químico, así como de todos los aspectos de interés relacionados y mucho menos de comprobar la eficiencia conseguida con tal acción.

Para presentar una idea objetiva de la problemática esencial, basta con considerar el caso en el que la tierra actúa como circuito de retorno de corriente de falla de aislamiento en una línea con conductores de cobre con una cierta sección transversal, al indagar la conductibilidad del cobre y la de un terreno considerado como favorable se puede percibir que tal diferencia entre sus conductividades debe presentar dificultades y limitantes durante el proceso.

#### 4.1.2 ACERCA DE LA NATURALEZA ELECTRICA DE LA CORRIENTE DE TIERRA

La manera técnica de introducir la corriente eléctrica a la tierra es hacerlo por medio de elementos metálicos conductores de electricidad llamados electrodos (fierro, cobre, etc.), los cuales pueden adoptar formas geométricas diferentes (esferas, semiesferas, varillas, anillos, placas, así como sus combinaciones). En tal proceso el electrodo y la tierra forman un

sistema eléctrico-geológico, cuyas respuestas esenciales son 1) una resistencia de propagación de cierta magnitud, la cual será función del tipo y dimensiones del electrodo, de la conductividad efectiva del terreno, donde este embutido el electrodo, pero también de la de sus alrededores, así como de la manera en que este colocado en el terreno (embutido en la superficie, pero contra la atmósfera, embutido dentro de la tierra, pero prácticamente rasante; o bien embutido en la tierra, pero a gran profundidad); 2) el potencial del electrodo que será igual al producto de la corriente que se introduzca a tierra por medio del electrodo (corriente del electrodo) por la resistencia a la propagación; 3) una intensidad de campo eléctrico y magnético, que originara un gradiente de potencial sobre el terreno en la dirección seguida por el campo creado, es decir, alrededor del electrodo, y 4) un calentamiento, tanto del electrodo como del terreno circundante, debido a la corriente que circula por el mismo, cuya magnitud será función del tiempo de permanencia de ella.

Según la clase de sistema eléctrico que se trate, la corriente que se derivara a tierra podrá ser de naturaleza eléctrica siguiente: 1) estacionaria (de corriente continua); 2) casi estacionaria, es decir, alterna, pero de relativamente baja frecuencia (50 o 60 Hz.); 3) no casi estacionaria, es decir alterna rápida (de alta frecuencia), 4) corrientes que se propagan como ondas electromagnéticas (ondas de impulso)

El comportamiento de los electrodos, en particular el de banda o conductor, es en rigor, diferente para cada clase de corriente; así por ejemplo, la resistencia a la propagación de un sistema electrodo tierra de un electrodo de banda de cierta longitud de corriente estacionaria y o casi estacionaria es invariable; en cambio, con corriente de rayo (ondas de impulso) no lo es, resultando mucho mayor que la correspondiente a la de corriente estacionaria al principio del proceso y decayendo después de cierto tiempo a este ultimo valor (esta cuestión es de mucha trascendencia en el diseño de la puesta a tierra para corrientes de rayo en las torres de acero de las líneas aéreas). Además la tierra misma se comporta y reacciona de manera diferente, según la clase de corriente que la recorra; así en el caso de corriente estacionaria la tierra solo presenta una clase de conductividad (conductividad ohmica), pero en el caso de corriente casi estacionaria, por ejemplo ya interviene el fenómeno de la inducción y, por lo tanto presenta una conductividad compleja (es decir tanto ohmica como inductiva), lo cual hace mucho mas difícil y complicado el análisis riguroso (científico y/o tecnológico sustantivo).

### 4.1.3 INFLUENCIA DE LA NATURALEZA ELECTRICA DE LA CORRIENTE EN EL GRADO DE DIFICULTAD DEL ANÁLISIS RIGUROSO

Para el grado de dificultad del análisis de los electrodos, es trascendente la naturaleza de la corriente que se va a derivar a la tierra, pues aquel aumenta progresivamente al ir pasando de corriente estacionaria a corriente casi estacionaria y a las corrientes que se propagan como ondas electromagnéticas (de rayo). Por tal razón el análisis a nivel científico se hace abordando el caso menos difícil y complicado, es decir el caso estacionario, el cual servirá de base para los siguientes y, posteriormente, conforme lo requiera la clase de sistema eléctrico particular, se adoptan las modificaciones y adiciones necesarias.

En el caso de los sistemas eléctricos de potencia principalmente de corriente alterna ( 50 -60 Hz.), el problema se simplifica un poco (excepto el caso de la puesta a tierra de líneas aéreas), en virtud de que en la electrodinámica se demuestra que el análisis estacionario es prácticamente equivalente al análisis casi estacionario dentro del rango de las relativamente bajas frecuencias; por ello en la practica se permite aplicar los resultados del análisis estacionario de electrodos tanto en instalaciones energéticas de corriente continua como de corriente alterna industrial.

### 4.1.4 ACERCA DE LOS FACTORES INTEGRANTES TÉCNICO Y SOCIAL

Desde el punto de vista técnico, la magnitud de la resistencia a la propagación del sistema electo-tierra es la esencial (se persigue un cierto valor en Ohms), en cambio desde la perspectiva social, es decir lo relativo a la seguridad de las personas y animales útiles, que como ya antes se ha citado, se concentran dentro del ámbito o en las cercanías del sistema de tierra, lo importante y trascendente es el valor del potencial del electrodo, así como su distribución sobre el terreno, pues ello produce efectos fisiológicos sobre el cuerpo, los cuales se manifiestan como voltajes de contacto y de paso.

Puesto que todas las obras tecnológicas se ejercen dentro del seno de la sociedad, el requisito de que sean inofensivas para sus miembros debe ser la cuestión esencial en el diseño y construcción de todo sistema de tierras por sencillo que este sea y, por lo tanto, se deben considerar las recomendaciones de la electrofisiología del trabajo, las cuales deben de estar contenidas dentro de todo sistema de normalización actual y vigente.

Así pues, los factores integrantes básicos que intervienen en el análisis de los electrodos de puesta a tierra dentro del ámbito de la electrotecnia son, con rigor científico los siguientes: 1) clase de electrodo (superficial, rasante o de profundidad; 2) el tipo de electrodo, es decir su forma geométrica, (semiesfera, varilla, anillo, placa, banda, etc.); 3) condiciones de la derivación de la corriente a tierra, es decir, si se utiliza un único electrodo elemental o varios trabajando en paralelo; aun en estas condiciones si se tratan de electrodos elementales de un mismo tipo (varillas) , o bien de varios tipos,; 4) la conductividad (o su inversa a la resistividad) del terreno donde estará emplazado el sistema de tierra, pero también del terreno vecino; 5) la naturaleza de la corriente eléctrica que es derive a ala tierra a través del electrodo o sistema de electrodos, y 6) en ciertos casos, las heterogeneidades que pueda contener el terreno.

En la problemática general del análisis científico y/o sustantivo de los electrodos de puesta a tierra que se aplican en las instalaciones eléctricas, intervienen elementos de geología, de la teoría de la electricidad, de la matemática y de la electrofisiología, a los cuales se puede formar dentro de tres grupos: 1) aspectos geotécnicos, 2) aspectos geoeléctricos, y 3) aspectos de fisiología del trabajo. Cada una de estas disciplinas conforman un sistema problemático que no es posible abarcar por completo en este trabajo de tesis, pero si considero conveniente presentar con la finalidad de mostrar los aspectos principales y la problemática que tienen con los sistemas de puesta a tierra.



## 4.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS

### 4.2.1 GENERALIDADES

La puesta a tierra de los medios de servicio eléctricos y de elementos metálicos unidos a ellos se abordan en la practica general de manera muy simplista, por un lado, al tomar tal medida como un mero requisito impuesto por las normas técnicas que hay que satisfacer y, por otro lado, cuando se asume que por el simple hecho de conectarlos a uno o varios electrodos de varilla de cierta longitud (generalmente la más comercial de 3m.) se evitaran algunos problemas los cuales, en algunas normas no están perfectamente bien puntualizados. Sin duda, a la practica de tales actitudes coadyuva la confusión que se presenta en lo relativo a la conductibilidad de la tierra ya que, por una parte, se acepta que la tierra es una buena conductora de electricidad, pero por otra se declara que es mala conductora y, aun, que hay tierra que prácticamente no la conduce; llegándose entonces de manera simplista a pensar que se trata de una cuestión muy subjetiva y hasta fortuita, al no tener idea del proceso en cuestión ni de las condiciones geológicas de la tierra. Por lo anterior creo conveniente repasar algunos conceptos de geología de la tierra relacionados de diversas maneras en el sistema problemático del transporte de electricidad por ella, empezando con una vista panorámica de la ciencia geológica.

### 4.2.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS GENERALES

La geología es la ciencia que trata de la estructura de la tierra, de la formación de las rocas y terrenos, así como la evolución de los mismos desde sus orígenes. Se clasifica en: 1) geología general, la cual incluye a la petrográfica, la paleontología, la geología dinámica, la geología histórica o estratigrafía y la geología experimental; 2) geología aplicada, la cual utiliza los conocimientos de la geología general para descubrir y explotar minerales, petróleo y carbón.

Desde el punto de vista geológico, la tierra es un cuerpo aproximadamente esférico, compuesto de varias capas concéntricas de material rocoso: la corteza (con una profundidad aproximada de 30 km), el manto superior (situado entre 30 y 700 km de profundidad), el

manto inferior (ubicado entre 700 y 2900 km de profundidad), las cuales envuelven a un núcleo central con un radio aproximado de 3741 km.

La tierra no es un cuerpo rígido y estático, sino que se encuentra en continuo estado de cambio, tanto en el interior como en la superficie. Así, fuerzas internas actúan creando nuevas rocas, mientras en la superficie otras destruyen las del pasado. Al producto de tales fuerzas destructivas se le denomina suelo, que es de hecho un nuevo material, por lo que a estos procesos destructivos también se les puede considerar constructivos.

En consecuencia, el material rocoso esta en continuo movimiento y durante este sufre cambios; se puede decir entonces que el ciclo completo de las rocas es: formación, intemperización y erosión.

#### 4.2.3 LA CORTEZA TERRESTRE

Las corrientes eléctricas de tierra circulan a través de la corteza terrestre, que es la capa superficial de la misma, constituida por rocas ligeras con un espesor de alrededor de 30 km; en general, tales corrientes circulan a una profundidad relativamente pequeña, prácticamente por el denominado suelo y en casos especiales, circula por el fondo y/o lecho del mar. Así pues, las corrientes de tierra circulan por suelos de muy diversa naturaleza geológica, es decir, por rocas formadas por muy distintos tipos de minerales y procesos geológicos, por lo tanto daré un repaso general de algunos aspectos relacionados con la composición de las rocas y las estructuras que se conforman.

Se entiende por roca a cada una de las masas minerales que se constituyen en la corteza terrestre, o bien, la sustancia mineral que por su extensión forma parte importante de la masa terrestre.

La roca dura es una mezcla de ciertos minerales firmemente unidos y formados naturalmente; sus formas, tamaños y orientación determinan la resistencia o consistencia de la roca. La roca fragmentada no consolidada, esta constituida por distintos materiales, principalmente por variedad de minerales arcillosos, hidróxidos de hierro.

El conocimiento detallado del origen, estructura y composición química de las rocas y masas rocosas, es muy importante no solo para la geología, sino también para la geotecnia,

en particular ciertas propiedades muy relacionadas con la técnica de la puesta a tierra, tales como: grado de intemperización, grado de porosidad, permeabilidad, grado de conglomerado, contenido de agua, el paisaje característico y especialmente las propiedades mecánicas y eléctricas. Tales conocimientos ayudan a los ingenieros que deben realizar obras electromecánicas subterráneas, como lo es el caso de la ingeniería de la puesta a tierra. Lo cual sirve para concienciar del comportamiento del suelo a la corriente eléctrica de que no es un comportamiento fortuito, sino que depende precisamente del origen, estructura y composición de las rocas.

### 4.3 ASPECTOS GEOFÍSICOS

#### 4.3.1. PROPIEDADES MAGNÉTICAS Y ELÉCTRICAS DE ROCAS Y MINERALES

Las propiedades generales magnéticas y eléctricas son: susceptibilidad magnética y eléctrica, permeabilidad magnética, polarización magnética y eléctrica, potenciales eléctricos, constante dieléctrica, conductibilidad eléctrica o resistividad; sin embargo los esenciales para la técnica de la puesta a tierra son: la conductibilidad eléctrica, los potenciales eléctricos, la constante dieléctrica y la permeabilidad.

#### 4.3.2 LOS POTENCIALES ELÉCTRICOS

Aunque en los sistemas de puesta a tierra artificial (hechos por el hombre) los potenciales determinados son originados por las corrientes introducidas al suelo, ya sea de manera deseada o indeseada, no se debe ignorar o menospreciar a los potenciales eléctricos naturales dentro de las masas rocosas. Ciertos potenciales naturales o espontáneos que ocurren en la superficie de la tierra, son originados por actividades electroquímicas y mecánicas, mas sin embargo en todos los casos el factor integrante es el agua subterránea. Tales potenciales están asociados con la descomposición de cuerpos minerales sulfurosos, variaciones en las propiedades de las rocas (contenido mineral), en contactos geológicos, actividades bioeléctricas de materiales orgánicos, corrosión, gradientes térmicos y de presión en fluidos subterráneos, así como de otros factores de naturaleza similar.

### 4.3.3 CONDUCTIBILIDAD ELECTRICA

La conductibilidad eléctrica es la propiedad de los cuerpos de transportar electricidad; generalmente, en la practica la conductibilidad se expresa por el valor de su inversa que es la resistencia eléctrica específica, la cual se denomina con la letra griega Rho ( $\rho$ ) y sus unidades son los Ohms-metro. La resistividad eléctrica de cualquier sustancia se determina numéricamente por la resistencia que se obtiene en un centímetro cúbico de esa sustancia, tomado en forma de cubo, a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente a una de las aristas de ese cubo.

La corriente eléctrica puede ser propagada en las rocas minerales por medio de tres mecanismos: electrónico, electrolítico y conducción dieléctrica.

La conducción electrónica es el mecanismo normal que se presenta en los materiales que contienen electrones libres, tales como los metales. En la conducción electrolítica, el transporte de electricidad se realiza por medio de conducción iónica; puesto que en general las rocas son malas conductoras de electricidad, sus resistividades deberían ser en un principio elevadas, pero como generalmente contienen poros que se llenan de líquidos, principalmente agua, no resulta siempre así, y su resistencia entonces, varia con la movilidad, concentración y grado de asociación de sus iones, lo cual finalmente depende de la constante dieléctrica de los solventes. La corriente fluye lentamente en comparación con la conducción ohmica y el movimiento representa un gran transporte de material, que generalmente se vuelve una transformación química. La conducción dieléctrica es el resultado del cambio electrónico, iónico o molecular por la polarización causada por el campo eléctrico alternante.

### 4.3.4 CONSTANTE DIELECTRICA

La constante dieléctrica de rocas y minerales, como se ha mencionado, es una medida de la polarización resultante de la aplicación de un cuerpo eléctrico. Esta polarización puede ser electrónica, iónica o molecular. El primer tipo es característico de todos los conductores. El desplazamiento iónico ocurre en muchas rocas formadas de minerales, mientras que el

agua y los hidrocarburos son los únicos materiales comunes que muestran polarización molecular.

En la conducción dieléctrica el mecanismo de la conducción (corriente de desplazamiento) tiene lugar en aisladores o pobres conductores cuando el campo eléctrico externo cambia en el tiempo. El parámetro significativo en la conducción dieléctrica es la constante dieléctrica, que en ocasiones se le llama capacidad inductiva específica del medio. Debido a la relativamente lenta movilidad de los portadores de carga, la polarización molecular y la polarización iónica son significativas a muy altas frecuencias. La constante dieléctrica, la cual es proporcional al grado de polarización, varía inversamente con la frecuencia. Esto también es indicativo de la cantidad de agua presente, ya que el agua tiene una constante dieléctrica de 80 a bajas frecuencias.

#### 4.3.5 PERMEABILIDAD MAGNETICA

La permeabilidad magnética es la relación entre la inducción magnética y la intensidad del campo magnético; es respecto al magnetismo lo que la conductividad es respecto a la electricidad. Es una propiedad del material, y así, cuando se emplean fuentes electromotrices el voltaje inducido en un conductor bajo la superficie varía no solo en la relación del campo magnético, sino también con la permeabilidad magnética del conductor.

### 4.4 ASPECTOS GEOELÉCTRICOS

#### 4.4.1 GENERALIDADES

Como se analizó en los puntos anteriores, la manera usual del transporte de corriente al suelo es a través de los llamados electrodos (artificiales o naturales), los cuales son elementos metálicos que por lo tanto, poseen una conductividad muy alta en comparación con la del terreno, los cuales pueden adoptar diferentes formas geométricas, tales como esfera, semiesfera, varilla, banda, anillo; los cuales pueden actuar de manera individual o bien en conexión en paralelo, tanto con electrodos de un mismo tipo o en combinación.

Para la ingeniería de puesta a tierra lo esencial es indagar el comportamiento (eléctrico, magnético y térmico) de electrodos de las diferentes formas geométricas en terrenos con diversas condiciones geoelectricas al traspasar por ella, por medio de diferente naturaleza corrientes, así como también todos los efectos derivados de tal hecho como calentamientos, gradientes de potencial, voltajes de contacto y de paso, corrientes peligrosas para el cuerpo humano tanto dentro como en las cercanías de una red de tierras.

Para conseguir lo anterior, se requiere además tener conocimientos de la geología aplicada, se requiere involucrar a una de las disciplinas de la geofísica aplicada: la geoelectrica. Esta disciplina tiene que ver con el estudio de las corrientes telúricas, naturales o artificiales, así como de los diferentes fenómenos que se verifican dentro de la tierra y de sus posibles efectos.

Los conocimientos de la geoelectrica se utilizan dentro del sistema problemático de la puesta a tierra, para la final determinación de los conocimientos tecnológicos de la acción, así como de reglas tecnológicas para la resolución de los problemas de la practica.

#### 4.4.2 CONCEPTOS ESCENCIALES DEL SISTEMA ELECTRODO-TIERRA

Un sistema de puesta a tierra por sencillo que este sea, esta conformado básicamente por los siguientes elementos: 1) el terreno, 2) electrodo (elemental o múltiple) y 3) la(s) líneas conductora(s) que conducen la corriente del exterior hacia el electrodo (llamada conductor de tierra), desde luego como lo acepta la ingeniería de sistemas, en ciertos casos un elemento también puede ser un factor integrante. De los dos primeros elementos se deducen los conceptos y relaciones esenciales del sistema electrodo-tierra; y el tercer elemento es digno de consideración cuando se analizan los sistemas de puesta a tierra de ciertas instalaciones eléctricas particulares.

El electrodo de puesta a tierra es, un principio todo elemento metálico conductor cuya función primordial es introducir la corriente dentro del seno de la tierra. Como la conductividad del electrodo (fierro, cobre, aluminio, etc.) es varios millones de veces mayor que la conductividad de un terreno considerado como buen conductor.

## 5 DIFERENTES TENSIONES A TIERRA

### 5.1 EFECTOS DE LA CORRIENTE SOBRE EL CUERPO HUMANO

Los efectos de la electricidad sobre el cuerpo humano dependen esencialmente de los siguientes efectos:

- a).- De la intensidad de la corriente.
- b).- De el tipo de corriente, si es corriente continua o alterna a la frecuencia normal o altas frecuencias.
- c).- De la trayectoria seguida por la corriente a través del cuerpo humano.
- d).- De las condiciones del individuo en el momento del contacto.

Como se puede observar algunos de los factores mencionados no son de fácil valoración, por lo que no es posible establecer reglas rigurosas. como medida orientativa se pueden elaborar curvas de peligrosidad de la corriente, en donde se relaciona el tiempo de contacto tolerable en función de la corriente.

De estas curvas se observan las secuencias de tener contacto con las partes de extensión, ya que por ejemplo corrientes mayores a 50 mA y tiempos correspondientes a la zona 2 de la grafica, pueden tener consecuencias mortales para el hombre.

Es conveniente también hacer notar que la resistencia eléctrica del cuerpo, es muy variable (de algunos cientos de Ohms hasta miles de ellos), por lo que los valores de tensión que aplicados al cuerpo humano se consideran peligrosos se deberán definir en forma conservadora.

Las instalaciones de puesta a tierra, y el empleo de instalaciones adecuadas y coordinadas, constituyen el medio principal para limitar dichas tensiones.

## 5.2 LÍMITES DE CORRIENTES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas debidas a disturbios atmosféricos o a fallas de equipo, obligan a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezcan peligro a los operadores, o en general a las personas que laboren en el recinto.

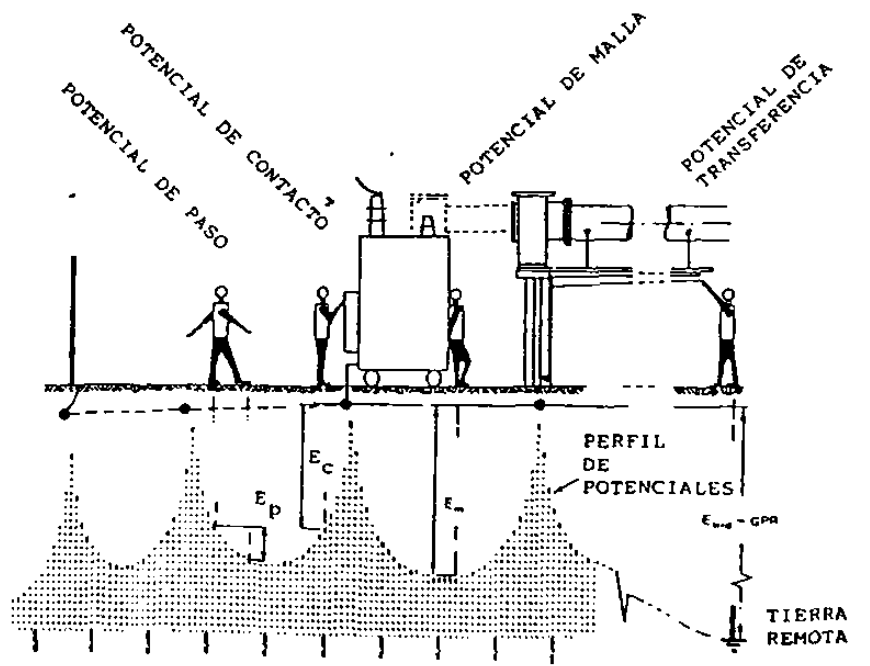


Figura No. 3



Intensidades en el orden de miles de amperios producen gradientes de potencial elevados en la vecindad del punto o puntos de contacto a tierra y si además se da la circunstancia de que algún ser viviente se apoye en dos puntos entre los cuales exista una diferencia de potencial debida al gradiente arriba indicado, puede sufrir una descarga de tal magnitud que rebase el límite de su contractibilidad muscular y provoque su caída. En tal situación, la corriente que circula por su cuerpo aumenta y si por desgracia, esta pasa por un órgano vital como el corazón, puede originar fibrilación ventricular y sobrevenir la muerte.

Si el camino de la corriente incluye la mano y el antebrazo, las contracciones musculares, el malestar y el dolor aumentan al crecer la corriente y bastan intensidades de unos cuantos miliamperios para que el sujeto pueda soltar el electrodo agarrado con la palma de la mano, que es la condición de contractibilidad antes mencionada.

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

$$I_k t = 0.0135$$

Donde la  $I$  es el valor efectivo que circula por el cuerpo humano en amperios, y  $t$  es el tiempo de duración del choque eléctrico en segundos. El 0.0135 es una constante derivada empíricamente.

Es necesario que para una buena comprensión hay que tomar en cuenta los diversos casos que pueden presentarse al hacer contacto con superficies a diferente potencial.

Las diferencias de potencial tolerables se determinan de acuerdo con los conceptos de tensión de paso, de contacto  $t$  de transferencia, que mencionare mas adelante.

La muerte por fulminación se presenta por mecanismos diferentes que pueden conducir a la muerte instantánea con el primer contacto de la corriente o a la muerte no instantánea con la supervivencia de la victima, durante cierto tiempo. En el primer caso se presenta un paro en el corazón del tipo sincope (por fibrilación) y el segundo caso se presenta la asfixia.

El conocimiento de los valores de corriente que pueden producir efectos letales aun son muy inciertos porque como resulta obvio, las investigaciones directas sobre el cuerpo humano deben de limitarse a corrientes que no pongan en peligro la vida humana y en corrientes mayores los resultados se obtienen por extrapolación de pruebas efectuadas a animales.

### 5.3 CONO DE TENSIÓN

Durante la acción de una falla a tierra, la corriente circula en muchas direcciones y como el mismo posee una resistencia, genera caídas de potencial que se presentan en muchos planos, siendo estas diferencias de potencial peligrosas para las personas, es decir, si uno esta en un solo punto del terreno al ocurrir la falla, nada sucederá, pero si abre las piernas, habrá una diferencia entre ambas que provocará un choque eléctrico.

### 5.4 TENSIÓN DE PASO

Se define como la tensión que durante el funcionamiento de una red de tierras puede resultar entre un pie de una persona apoyada en el suelo a la distancia de 1 (un) metro o entre un pie y otro en forma convencional. Es decir el voltaje medido desde el suelo de un punto a otro situado a un metro de distancia.

Los otros circuitos incluyen resistencias del sistema de electrodos ( $R_1, R_2, R_3$ ), las resistencias de contacto de la mano y la de los zapatos (las dos ultimas se consideran despreciables), la resistencia  $R_t$  del terreno inmediato debajo de cada pie y la resistencia del cuerpo  $R_c$  para fines prácticos se considera:

$R_t = 3ps$  para cada pie, donde  $ps$  es la resistividad superficial (Ohm-metro) que toca el pie.

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

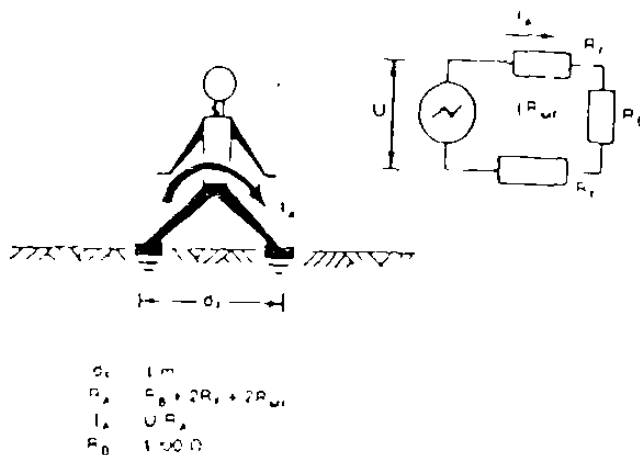


Figura No. 4

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

$$E_s = I_c (R_c + 2R_t) = (1000 + 2(2\text{ps}))(0.116 (t)^{1/2})$$

Donde:  $I_c = 0.116 (t)^{1/2}$  y  $R_t = 3\text{ps}$

## 5.5 TENSIÓN DE CONTACTO

Es la tensión a la cual se puede ver sometido el cuerpo humano por contacto con una carcasa o estructura metálica que normalmente no está en tensión de una máquina o aparato.

$$E_t = (R_c - R_t) I_c = (1000 + 5\text{ps})(0.116 (t)^{1/2})$$

$$E_t = (116 + 0.17\text{ps}) (t)^{1/2}$$

Como se sabe una corriente eléctrica que circula por el cuerpo humano puede producir más o menos grave y e inclusive la muerte según sea la intensidad y duración, su naturaleza y las condiciones en que se encuentra la persona afectada.

Por una persona puede circular corriente por contacto directo o con partes que tengan tensión normalmente o con partes de una instalación que encontrándose normalmente sin

tensión, en algunas ocasiones se puedan poner a tensión por fallas de aislamiento o fallas a tierra, de aquí resulta obvio que es necesario reducir al mínimo los contactos directos y hacer que los contactos indirectos no resulten peligrosos.

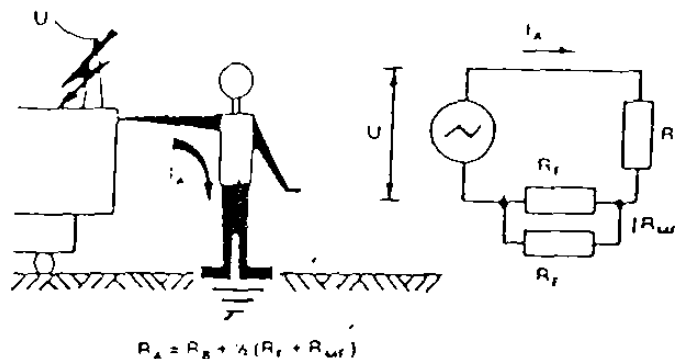


Figura No. 5

Los efectos fisiológicos de una corriente eléctrica que pasa por el cuerpo humano son diferentes según se trate de una corriente alterna a la frecuencia del sistema, de una corriente continua o de una corriente a alta frecuencia, en cada caso depende de la intensidad de la corriente, de la duración, de la trayectoria a través del cuerpo humano y de las condiciones fisiológicas de la persona.

## 5.6 INVESTIGACIÓN DE LOS POTENCIALES DE TRANSFERENCIA

Este caso se presenta cuando una persona hace contacto con un conductor puesto a tierra y queda fuera de la periferia de la malla de tierra, en este caso la elevación de la tensión del choque eléctrico puede ser esencialmente igual a la elevación total de potencial de la malla de tierra.

Entre las áreas de la red de tierras y puntos externos existe el peligro de producirse potenciales de transferencia a través de los conductores de los circuitos de comunicación o de las señales de los hilos neutros de los circuitos de baja tensión, de los conduits, tuberías, rieles, rejillas metálicas, etc., el peligro reside en los potenciales de contacto. La importancia del problema se encuentra en las muy altas diferencia de potencial que pueden resultar, acercándose al máximo valor de elevación de la tensión de la red de tierra durante los cortos

circuitos en contraste con la porción relativamente baja de ella que se observa normalmente en las de paso y contacto dentro del área de la malla de tierra.

Para estos se han diseñado aparatos de protección, como lo son transformadores de aislamiento y de neutralización, o se dan recomendaciones de conectar ciertos elementos de la subestación para evitar esas condiciones peligrosas.

Las recomendaciones básicas son las siguientes:

### 5.6.1 RIELES

Los rieles metálicos nunca deberán conectarse a la red de tierras de una subestación, porque transfieren un aumento de potencial a un punto lejano durante un corto circuito, por el contrario, si la puesta a tierra es en un punto lejano se introduce el mismo peligro pero en el área de la subestación.

Para eliminar estos riesgos se aísla una mas partes de las juntas de los rieles donde estos salen del área de la red de tierras.

### 5.6.2 NEUTROS DE LOS ALIMENTADORES O CORTO CIRCUITOS SECUNDARIOS DE BAJA TENSIÓN

No se debe conectar a la red de tierras de la subestación los neutros de los alimentadores o circuitos de baja tensión, pues al elevarse la tensión de la red durante un corto circuito, toda la elevación del potencial de la red se transfiere a puntos lejanos como una tensión peligrosa entre este hilo conectado a tierra de la subestación y la tierra propia del lugar que se trata.

Para eliminar este peligro se aísla el hilo neutro de baja tensión, procurando no reducir el tiempo de libranza de las fallas de baja tensión. Por ,o tanto se debe considerar el hilo neutro como un conductor vivo, aislado de la tierra y además evitar que pueda ser tocado por el personal.

### 5.6.3 TUBERÍA DE AGUA

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

### 5.6.4 EDIFICIOS

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

### 5.6.5 CERCAS METÁLICAS

En las bardas aparecen las tensiones de contacto mas peligrosas, ya que por estar en la periferia de la red de tierra aparecen los máximos gradientes de potencial superficiales.

Se recomienda que el perímetro de la malla de tierra se extienda mas allá de la reja, aproximadamente a 1.5 metros fuera de ella para evitar tensiones de contacto peligrosas a personas ajenas a la subestación.

## 5.7 TENSIONES DE SEGURIDAD

Una vez que se mencionaron las diferentes tensiones que aparecen en una subestación (de paso y de contacto), así como los efectos de la corriente sobre el cuerpo humano, es mas fácil comprender sobre las normas de seguridad que establecen valores máximos de tensión.

Estos valores pueden tener algunas pequeñas variaciones de acuerdo a las normas y reglamentos de seguridad de los diferentes países, pero por lo general se establece que en ningún punto de la subestación no se deben presentar tensiones de paso y de contacto superiores a los siguientes valores:

- 60 Volts cuando no se marca la eliminación rápida de una falla de línea a tierra.
- 120 Volts cuando la falla se elimina en un periodo de un segundo.

Las normas se preocupan por conciliar la seguridad de las personas con la posibilidad práctica de la ejecución de las instalaciones tomando en consideración el aspecto probabilístico, ya que cuando una falla se elimina en un tiempo muy breve es poco probable un contacto de una persona con la parte de la falla en un periodo breve de tiempo, por lo que en algunas técnicas de diseño se toma en cuenta no solo las tensiones máximas permisibles sino también una reducción en el tiempo de eliminación de la falla.

## 5.8 MAGNITUDES ELÉCTRICAS QUE CARACTERIZAN UNA PUESTA A TIERRA

Bajo condiciones de falla, la circulación de una corriente ( $I$ ), por una toma de tierra, provoca en esta una tensión ( $V_0$ ), denominada tensión de puesta a tierra, en relación con un punto lejano, de potencial cero, definiendo el cociente  $V_0/I$  como la resistencia ( $R$ ) de la toma de tierra, la cual es la que interviene como elemento de cálculo de corriente que circula, y de esta depende el comportamiento de las protecciones.

No obstante en los problemas de seguridad intervienen siempre tensiones entre puntos físicamente más cercanos como para que se puedan acceder a ellos simultáneamente, de forma que  $V_0$  no cuenta directamente en estas situaciones salvo que se produzca alguna de las siguientes particularidades:

- Introducción de alguna manera del potencial de referencia en el interior de la instalación, acercando hasta distancias de contacto estructuras cuya fijación del suelo este alejada.

## 6 EFECTOS FISIOLÓGICOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

### 6.1 PERCEPCION DEL CUERPO HUMANO AL PASO DE LA CORRIENTE

La iniciación de la percepción y los efectos biológicos dependen de la intensidad de la corriente, relacionada con el valor del voltaje aplicado al cuerpo, de la resistencia y la conductividad del mismo. La parte mas sensible del cuerpo se encuentra en la retina; con solo 0.02 mA aplicados al globo ocular, le sigue la lengua, con la intensidad de 0.045 mA y se manifiesta por un sabor alcalino. En cuanto a la piel, la percepción es variable y es función del electrodo, así como de las condiciones físicas en que se encuentra; en experimentos se ha encontrado que ya alrededor de 1 mA de inicia la percepción.

#### 6.1.1 INICIO DE LA CONTRACCIÓN

Para el inicio de la contracción se requiere una intensidad un poco mayor. La contracción de los músculos puede ocasionar que la persona no se pueda desprender del contacto, y puesto que la corriente puede interesar por igual a los músculos de la respiración es posible entonces que se origine la muerte por asfixia. En general ya algunos mili amperes originan contracciones irregulares de los músculos, siendo 16 mA efectivos el limite de



desprendimiento para hombres cuando poseen una elevada resistencia de cuerpo, y de 8 en el caso de baja resistencia.

### 6.1.2 LA REPARTICIÓN DE LA CORRIENTE POR EL CUERPO

En el caso de contactos dentro de recintos, las posibilidades de establecer un contacto con corriente de falla, son básicamente dos: por medio de la(s) mano(s), o bien, con un pie; los efectos de la corriente de contacto son diferentes en ambos casos y con sus variantes posibles. En ello influyen fundamentalmente la manera en que se distribuye la corriente por el cuerpo, ya que según sea su recorrido, la resistencia que presentara el cuerpo tendrá diferente valor, y por ende, la magnitud de la corriente que la recorrerá será también distinta; además ciertas trayectorias por el cuerpo son mas peligrosas que otras. Desde luego, el recorrido mas peligroso es el que pase por su tórax, ya que afecta a el corazón directamente, y en el caso de contacto por medio del pie, se originara el llamado voltaje de paso, en el cual la corriente circulara del pie con el contacto al otro, interesando predominantemente la parte baja del abdomen, por lo que resulta el menos dañino.

En cuanto al contacto por medio de las manos, se puede presentar algunas variantes, pero desde el punto de vista del recorrido de la corriente se puede diferenciar la circulación de corriente longitudinal, es decir, de manos a pie; y la circulación transversal, de una mano a otra pasando entonces por el tórax; lo anterior en el caso de que un apersona estuyese parada sobre el piso aislante, de no ser así se presentaría una circulación transversal y al mismo tiempo una circulación longitudinal.

Tal cuestión es de mucha importancia para el grado de peligrosidad de un contacto en particular dentro del ámbito de las instalaciones de baja tensión. Tales aseveraciones sobre el grado de peligrosidad según el recorrido de la corriente a través del cuerpo están sustentadas en una larga serie de experimentos efectuados con animales con pesos semejantes al del hombre, así como también a partir del análisis de accidentes; de todo ello se ha concluido que el recorrido que sigue en peligrosidad al arriba citado es el de la mano izquierda hacia los pies, ya que entonces atraviesa a el corazón. Algunos investigadores aseguran que con tal recorrido de la corriente, 88 % de accidentes son mortales.

Dentro del ámbito de instalaciones que cuentan con generación, puede presentarse el caso de que la corriente circule desde la cabeza hacia los pies, el cual también es muy peligroso dado que atraviesa el cerebro; esto puede suceder, al establecerse el arco voltaico entre partes metálicas dentro del edificio, estando la persona situada entre ellas.

### 6.1.3 EL INICIO DEL PARO RESPIRATORIO

En los experimentos sobre animales la aplicación de una corriente de 50 mA siguiendo una trayectoria de las partes anteriores a las posteriores, causó la parada respiratoria, pero esta se restableció al interrumpir la circulación de la corriente. En las personas esta clase de efecto se presentó cuando la corriente atraviesa el tórax con una intensidad de 50 mA; si bien los efectos fisiológicos no necesariamente conducen a la muerte de la persona, por los efectos físicos que se puedan presentar, ya se le considera como peligrosa para la vida y, en consecuencia se le denomina corriente peligrosa. Accidentes de esta clase en personas han reportado que en ciertos casos, fueron necesarias de tres a ocho horas de aplicación de respiración artificial, para que el aparato respiratorio volviese a funcionar por sí mismo.

## 6.2 UMBRAL DE SENSIBILIDAD

El establecimiento de los límites a partir de los cuales la corriente eléctrica resulta peligrosa presenta notables dificultades.

Puede dar idea de ello las dispersiones que aparecen en la determinación del umbral de sensibilidad sobre el paso de la corriente eléctrica, definido como el valor de la intensidad mínima que percibe una persona al hacer circular una corriente de mano a mano.

Mientras que algunos detectan la corriente con intensidad de 0.5 mA, otros no empiezan a percibir su paso hasta que esta alcanza valores cercanos a los 2 mA. Es de mencionar que una mujer es más sensible al paso de la corriente por su cuerpo. Si se mide este umbral sobre otros órganos, también se pone de manifiesto la diferente sensibilidad de los mismos. Por ejemplo, el tejido más sensible del organismo es la retina (aproximadamente 100 veces más que la mano), originándose sensaciones con corrientes de 0.02 mA aplicadas al ojo, mientras que la lengua acusa los 0.05 mA.

### 6.3 UMBRAL DE NO SOLTAR

Al circular una corriente eléctrica por el cuerpo humano se tiende a una contracción muscular y lo que se le conoce como umbral de no soltar, este fenómeno tiene lugar por la excitación de nervios y músculos flexores bajo la acción de la corriente eléctrica, de forma que al quedar contraídos, inhabilitan al individuo a dejar el conductor, toda vez que los extensores son menos potentes que los flexores. Con valores obtenidos en laboratorio se puede apreciar que existen hombres que con intensidades menores a los 10 mA quedan “enganchados”, mientras que otros pueden soportar hasta dos veces esta corriente por su cuerpo.

### 6.4 MUERTE APARENTE

Cuando la intensidad que atraviesa el organismo se eleva por encima del umbral de no soltar, pueden verse afectadas las grandes funciones fisiológicas, respiración, circulación, y el paso de la corriente acarrea, entonces, una detención respiratoria o circulatoria que viene acompañada, rápidamente, de un estado de muerte aparente. En efecto, para intensidades del orden de 20 a 30 mA, la contracción muscular puede difundirse y alcanzar los músculos respiratorios (intercostales, pectorales, diafragma), originando un paro circulatorio, la cual ocasiona una asfixia, lo cual desemboca en un estado de muerte aparente. Si el accidentado se sustrae rápidamente de la acción de la corriente y se le proporciona una asistencia respiratoria, antes de que sobrevenga un paro cardíaco y, en consecuencia, las lesiones anóxicas del encéfalo.

### 6.5 FIBRILACION VENTRICULAR Y SU UMBRAL

Desgraciadamente, no sucede lo mismo cuando el estado de muerte aparente se debe a una fibrilación ventricular.

Esta situación esta caracterizada por una contracción de cada una de las fibras del miocardio, lo que se traduce, velozmente en un paro circulatorio y un estado de bloqueo que alcanza primero al cerebro y después al mismo corazón.

### 6.5.1 PARAMETROS DE QUE DEPENDE

En realidad este umbral no puede definirse por una sola cifra, puesto que varía grandemente con las condiciones fisiológicas del sujeto y también con los parámetros físicos del accidente: tensión y tipo de contacto, pero fundamentalmente con:

- La trayectoria seguida por la corriente
- El valor de la resistencia del organismo
- El tiempo de paso y amplitud de la corriente

La trayectoria seguida por la corriente es el primer factor importante, pues la densidad de corriente que atraviesa el corazón es muy variable según el recorrido.

El valor de la resistencia del cuerpo humano es otro parámetro importante al ser de intensidad inversamente proporcional a ella.

Las primeras mediciones fueron efectuadas desde el año 1897. al ser realizadas con bajas tensiones, los resultados estaban influidos por la impedancia de la piel, la cual varía mucho con la superficie y la presión de contacto, así como la temperatura y la humedad, por lo que eran variables y parecían contradictorias y poco fiables.

Otras medidas más prácticas fueron efectuadas en 1929, pero también con el problema de efectuarlas con valores inferiores a los 100 Volts, por lo que hasta años después se conoció con más precisión la impedancia del organismo. En años recientes se han utilizado cadáveres y podido alimentar hasta 5000 Volts.

La impedancia del cuerpo humano puede describirse en tres partes básicas, dos de ellas son impedancias de la piel a través de los puntos de contacto y una tercera como la impedancia interna del cuerpo humano, la suma de las tres impedancias nos dan la impedancia total.

La impedancia interna puede considerarse como resistiva principalmente, su valor depende esencialmente de la trayectoria de la corriente y en cierta medida de la superficie de contacto, aunque las mediciones indican que posee una componente capacitiva.

Las dos impedancias de la piel pueden considerarse como una red de resistencias y capacitancias, debiendo resaltarse que para diferencias potencial de contacto de algunas decenas de Volts, su valor varia ampliamente con la superficie de contacto, la temperatura, la transpiración, etc., incluso para una misma persona.

Mas recientemente, se han realizado medidas sobre un gran numero de personas vivas con tensiones alternas de hasta 200 Volts a 60 Hertz, con el fin de llegar a valores estadísticos fiables sobre la impedancia.

Los voluntarios estaban protegidos por cadenas de interruptores diferenciales de diferente sensibilidad, que se iban eliminando paulatinamente a la vez que se obtenían oscilografías de todas las magnitudes y electrocardiogramas de los individuos para poder atender cualquier eventualidad.

Se admite que una resistencia de 1000 Ohms, constituye una buena aproximación para la resistencia media del cuerpo humano, si bien se observa que no es lineal y presenta valores mas elevados para tensiones reducidas.

El tiempo de paso y la amplitud de la corriente es otro factor de variación del umbral de fibrilación que ha sido objeto de numerosos trabajos experimentales. Se ha demostrado que la intensidad necesaria para la fibrilación esta ligada al tiempo de circulación dada por la expresión:

$$I = K/\sqrt{t}$$

Para duraciones de contacto entre 0.4 y 5 segundos.

## 6.6 CONCORDANCIA DE SUCESOS PARA ORIGINAR RIEGO DE ACCIDENTES

Es importante considerar que el riesgo de que ocurra un accidente por la puesta a tierra de una instalación eléctrica, se debe tomar en cuenta que un accidente se producirá cuando ocurran sucesos aleatorios independientes como son:

- La aparición de una falla a tierra en la instalación.
- La existencia de una resistividad de terreno y una distribución en el mismo de la corriente de falla tales que puedan darse puntos con altos gradientes de potencial.
- La presencia de una persona en ese punto, en ese momento y en una posición tal que su cuerpo quede sometido a ese alto gradiente.
- La no-existencia de una alta resistencia de contacto suficiente, ni de cualquier otra resistencia en serie que limite la corriente que circule a través del cuerpo a un valor peligroso.
- La duración de la falla y el contacto con el cuerpo el tiempo suficiente para que intercepte la curva de seguridad.

## 6.7 RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL CUERPO HUMANO

En relación con el problema de la variación de la resistencia del cuerpo en función de la tensión aplicada, una serie de investigadores realizaron pruebas y mediciones al respecto, con el propósito de llegar a determinar de manera objetiva valores de tensiones permisibles con las que el cuerpo humano no se viese expuesto a peligro alguno.

Así, una serie de experimentos efectuados arrojaron valores mínimos para la resistencia del cuerpo bajo la piel entre 500 y 1000 Ohms, medidas entre la superficie de las manos, por lo que fácilmente se podrían identificar valores de resistencia de cuerpo en diversas condiciones; por ejemplo con la piel reblandecida (debido a cierto grado de humedad), con la piel totalmente seca, o bien, impregnada con una solución salina o ácida, o aun con piel dañada. Las mediciones revelaron que los valores de resistencia resultan muy diferentes según sea el estado o condición de la piel, por ejemplo una serie de mediciones arrojan valores medidos hasta de 100000 Ohms con la piel totalmente seca. Por ello se concluyó que la piel es el lugar de la resistencia efectiva para la conducción de la corriente a través

del cuerpo, pero también que esa resistencia es en buena parte dependiente de la tensión que se le aplique a la piel.

Esta circunstancia se puede apreciar en la grafica, la cual muestra los resultados de una serie de pruebas que fueron efectuadas en 25 personas de ambos sexos con diferentes profesiones. Las pruebas muestran el transcurso dependiente de la tensión aplicada desde un limite inferior hasta valores entre 100 y 200 Volts, para el recorrido de la corriente de mano a mano, o hacia el pie, mostrando una fuerte disminución de la resistencia del cuerpo (del orden de 40000 a cerca de 20000 Ohms), lo que significaba que en tales circunstancias la resistencia que permanecía era únicamente la resistencia interna del cuerpo. Durante mucho tiempo se le llamo a esto "perforación de la piel". Considerando lo anterior, el valor de la tensión del electrodo permisible de 125 Volts, para el caso de redes con el punto de estrella libre o compensado, permanece arriba del limite de la zona de perforación de la piel; sin embargo como se demuestra durante el calculo de distribución de potenciales de los electrodos, la tensión de 125 Volts no recae totalmente sobre la persona afectada, sino solo una parte de ella, por lo que se puede evitar casi siempre la perforación de la piel y el consecuentemente aumento de peligro por tal motivo.

Se puede señalar aquí que las vestimentas de trabajo dentro de las instalaciones de alta tensión en particular (zapatos con suela de hule) presentan una resistencia que puede variar desde unos cuantos miles hasta cientos miles de Ohms, teniéndose entonces un completo aislamiento del cuerpo, puesto que la tensión de perforación de piel queda muy por debajo de las vestimentas; sin embargo como también se sabe, aquellos valores de resistencia pueden llegar a reducirse drásticamente debido a ciertos factores naturales (humedad, lluvia, etc.), así que a tales vestimentas se les considera como medios de protección indirectos, de acuerdo con la técnica de seguridad.

Consecuentemente, para el diseño de sistemas de puesta a tierra de protección se debe considerar únicamente la resistencia del cuerpo (caso mas desfavorable), que dando entonces el efecto de la vestimenta como un factor de seguridad, para el caso de subestaciones de alta y extra alta tensión.

Con un enfoque rigorista, considerando el hecho de que se asume la intensidad de corriente de 50 mA como la corriente critica para el calculo seguro, a pesar de que la

fibrilación se pueda presentar entre 80 y 100 mA, se deberá por lo tanto adoptar el valor mas desfavorable para la resistencia del cuerpo humano, lo cual significaría suponer que la corriente circularía dentro del cuerpo humano y por lo tanto la resistencia de un hombre caminando o parado sobre el suelo sin zapatos.

La resistencia interna del cuerpo humano es aproximadamente de 200 Ohms. La resistencia de contacto entre una mano y un conductor o una parte metálica bajo tensión, varia dentro de límites muy amplios, según sea la extensión y la naturaleza de la superficie de contacto, de la naturaleza de la piel de las personas (lisa o callosa), del grado de humedad de la piel, etc. Como se mencionó la resistencia de contacto entre el pie y el suelo puede variar considerablemente según sean las condiciones del calzado y del suelo.

Otros estudios proporcionan datos interesantes, por ejemplo, para personas con calzado adecuado para el trabajo eléctrico, suelo seco y, manos callosas, es del orden de los 200,000 Ohms. Mientras que para personas con calzado normal, suelo húmedo y manos lisas y húmedas es del orden de los 500 Ohms.

En la mayoría de los casos la resistencia de contacto es elevada, por lo que de acuerdo con las normas internacionales se recomienda tomar como base una resistencia de 3000 Ohms como promedio.

## 6.8 CORRIENTES TOLERABLES

El 99.5 % de todas las personas de 50 a 70 kg (o mas) pueden resistir en forma segura (sin fibrilación ventricular) el paso de una corriente de 50 o 60 Hz en una magnitud ( $I_b$ ) y en duración ( $t_s$ ), determinado por la siguiente formula:

$$I_b (50) = 0.116 / \sqrt{t_s}$$

$$I_b (70) = 0.157 / \sqrt{t_s}$$



El recierre en sistemas modernos de distribución eléctrica es común. En este caso la persona puede ser afectada por la primera falla, la cual no lo hiere mortalmente, pero que lo deja confundido y afectado temporalmente. Luego un recierre automático o manual pudiera resultar un segundo choque eléctrico que se inicia en ocasiones a menos de 0.5 segundos del inicio del primer choque.

Este segundo eléctrico que ocurre después de un corto periodo de tiempo sin darle a la persona tiempo de recuperación, puede causar un serio accidente. En el caso de que ocurran varios choques eléctricos a cortos intervalos de tiempo, se deberá sumar el tiempo de cada choque y este tiempo total será el que se introduzca en la fórmula anterior con el valor (ts).

## 6.9 TENSIONES DE SEGURIDAD

La tensión máxima de contacto aplicada, en Volts, que se puede aceptar, se determina en función del tiempo de duración de la falla, según la fórmula siguiente:

$$V_{ca} = K/t \text{ En}$$

donde:

$K = 72$  y  $n = 1.0$  para tiempos inferiores a 0.9 segundos  
 $K = 78.5$  y  $n = 0.18$  para tiempos superiores a 0.9 segundos e inferiores a 3 segundos.

T = duración de la falla en segundos.

Para tiempos comprendidos entre 3 y 5 segundos, la tensión de contacto aplicada no sobrepasará los 64 V. Para tiempos superiores a los 5 segundos la tensión de contacto aplicada no será superior a los 50 V.

## 6.10 CONDICIONES DE PELIGRO

Para que un accidente suceda se tendrán que cumplir al mismo tiempo las siguientes condiciones de peligro:

- Una alta corriente de falla a tierra en relación con el área de la malla de tierra y una alta resistividad de seta a tierra remota.
- Combinación de una resistividad del suelo y una distribución de las corrientes de tierra de manera tal que se presenten gradientes altos de potencial en la superficie de la tierra.
- La presencia de un individuo en un punto de la subestación, en el tiempo y posición de tal manera que el cuerpo de éste esté punteando dos puntos de alto potencial.
- Ausencia de la suficiente resistencia de contacto para limitar la corriente a través del cuerpo a un valor seguro.
- Que la duración de la falla a tierra y la duración del contacto de la persona a estos puntos de potencial, sean lo suficientemente largos para causar daño al nivel de corriente que exista en ese momento.

Esto hará que los accidentes en las subestaciones eléctricas sean mucho menos comunes que otros de otro tipo.

## 7 INTENSIDAD DE CORRIENTES DE FALLA

### 7.1 PANORAMA GENERAL

El proyectista o constructor deberá tomar en cuenta los posibles tipos de falla a tierra y sus intensidades máximas en los distintos niveles de tensión existentes en la instalación y tomar el valor más desfavorable. Para el cálculo de las intensidades de falla y de puesta a tierra, se ha de tener en cuenta la forma de conexión del neutro a tierra, así como la configuración y características de la red durante el período subtransitorio.

En el caso de red con neutro a tierra, bien rígido o a través de una impedancia, se considerará a efectos del cálculo de la tensión aplicada de contacto o paso, la intensidad de la corriente de puesta a tierra que provoca la elevación del potencial de la instalación a tierra. En el caso de redes con neutros aislados, la intensidad que se considera para el cálculo de la tensión aplicada de contacto o paso, será el producto de la intensidad capacitiva de falla a tierra por un factor de reducción igual a la relación de la intensidad de la corriente que contribuye a la elevación del potencial de la instalación de tierra y la homopolar del sistema hacia la falla.

## 7.2 CORRIENTES MÁXIMAS DE CORTO CIRCUITO A TIERRA

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

- a).- Determinar el tipo de falla posible a tierra que produzca el máximo flujo de corriente entre la malla del sistema de tierra y la tierra adyacente, por lo tanto su mayor elevación de potencial y los mayores gradientes locales en el área de la subestación.
- b).- Determinar por sistemas de cómputo o analizadores, el máximo valor efectivo de la corriente simétrica de falla a tierra entre la malla de tierra y la tierra circundante en el instante de iniciarse la falla.

### 7.2.1 TIPOS DE FALLAS A TIERRA

Son principalmente de dos tipos:

- a).- Falla monofásica a tierra
- b).- Falla trifásica a tierra

Para cualquiera de los dos tipos de falla mencionados, se debe hacer un diagrama equivalente que represente la situación real de los circuitos. El diagrama deberá de incluir todo hilo aéreo neutro que este conectado al sistema de tierra o a los neutros de los transformadores.

### 7.2.2 COMPONENTE SIMÉTRICA DE LA CORRIENTE A TIERRA DE LA FALLA EN EL INSTANTE DE LA FALLA

El máximo valor efectivo de la corriente simétrica de la falla a tierra se calcula por la siguiente ecuación:

$$I = 3E / (3R + 3f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X''_1 + X_2 + X_0)); \text{ en Amperes.}$$

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

$$I = 3E / (X''1 + X2 + X0)$$

En las ecuaciones anteriores:

I= valor efectivo de la corriente simétrica en el instante en que se inicia la falla a tierra, en amperes.

E= Es la tensión de fase a neutro, en Volts.

R= Es la resistencia de tierra estimada del sistema local de la subestación en Ohms.

Rf= Resistencia mínima de la falla misma, en Ohms.

R1= Resistencia de secuencia positiva, en Ohms/fase

R2= Resistencia de secuencia negativa, en Ohms/fase

R0= Resistencia de secuencia cero, en Ohms/fase

X''1= Reactancia subtransitoria de secuencia positiva, en Ohms/fase

X2= Reactancia de secuencia negativa, en Ohms/fase

X0= Reactancia de secuencia cero, en Ohms/fase

Los valores de R1,R2,R0, X''1,X2,X0, son los correspondientes del sistema vistos desde el punto de la falla. Los cálculos se efectúan excluyendo las corrientes que no circulan entre el sistema local de tierra y la tierra circundante.

### 7.2.3 FACTORES DE CORRECCIÓN CONSIDERADOS EN EL CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO

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

- a).- Cuando sea necesario tomar en cuenta el efecto de desplazamiento de la onda de corriente por corriente continua y los decrementos en las componentes transitorias de corriente directa y alterna de la corriente de falla.

b).- Cuando sea pertinente tomar en cuenta los aumentos de las corrientes de falla a tierra debidos al crecimiento del sistema eléctrico.

#### 7.2.4 FACTORES DE DECREMENTO “D”

Este factor se produce por el desplazamiento de la componente directa y por la atenuación de las componentes transitorias de corriente alterna y directa de la corriente de falla.

Debido a que los cortos circuitos suceden en forma aleatoria con respecto a la onda de tensión y, como el contacto puede existir en el momento en que se inicia la falla, se hace necesario suponer una onda de corriente de falla asimétrica desplazada 100% durante el tiempo del choque eléctrico.

Como las experiencias para fijar el umbral de fibrilación están basados en corrientes senoidales de amplitud constante, es necesario determinar la magnitud efectiva I de una corriente senoidal equivalente a la onda de falla simétrica.

De lo anterior se obtienen los siguientes valores:

DURACIÓN DE LA FALLA Y CHOQUE ELÉCTRICO (SEG).	FACTOR DE DECREMENTO (D)
0.08	1.65
0.10	1.25
0.20	1.20
0.25	1.10
0.50	1.00

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

### 7.2.5 FACTORES DE SEGURIDAD POR CRECIMIENTO DE LA SUBESTACIÓN

Resulta prudente un margen adecuado para estimar los aumentos futuros de las corrientes de falla por aumento de la capacidad del sistema eléctrico o por interconexiones posteriores, pues las modificaciones posteriores a la red de tierras resultan costosas y generalmente se omiten dando motivo a introducir inseguridad en el sistema de tierras, por lo general se aplica un factor de seguridad calculando la corriente de falla esperada en los próximos diez años como mínimo.

El incremento de la potencia de generación del sistema o la realización de nuevas interconexiones originará aumentos de las corrientes de falla, con la consiguiente repercusión en el cumplimiento de los requisitos de seguridad. Por tal motivo se puede decir que la posterior adecuación de la instalación a los nuevos valores es menos conveniente y más costosa que haberlos contemplado en el proyecto original, es muy usual prever un margen en el sistema de tierras, obtenido mediante la introducción de un factor de corrección que disminuya el valor de la impedancia global a tierra del sistema o, directamente, aumentar el valor de la corriente de falla calculada, como es práctica usual, al considerar la relación entre la potencia de cortocircuito previsible en un plazo determinado y la actual, y utilizar ese cociente como factor de seguridad.

### 7.3 EFECTO DE LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS

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

La resistencia puede estimarse por:

$$R = \rho/4r$$

O con mayor precisión por:

$$R = \rho/4r + \rho/L$$

En donde:

$R$  = Es la resistencia del sistema de tierras de la subestación, en Ohms.

$\rho$  = Es la resistividad media del terreno en Ohms-metro.

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

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

## 7.4 EFECTOS DE LOS HILOS DE GUARDA

Quando los hilos de guarda de las líneas aéreas quieren conectarse a la malla de tierra de la subestación, debe tomarse en cuenta que estos desvían una pequeña porción de la corriente de falla, restándosela al sistema de tierras. En vista de que la corriente a tierra se divide en porción inversa a la resistencia de la malla y de los hilos aéreos, se hace necesario establecer sus valores aunque estos serían muy aproximados.

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

$$Z = (Z_1 * R_2)$$

Por ejemplo un hilo de guarda de acero, de 70 mm<sup>2</sup> de sección, tiene una impedancia longitudinal de aproximadamente 4  $\Omega$ /km, si se suponen tres conexiones a tierra por



kilómetro, de  $30 \Omega$  cada una, la resistencia transversal es unos  $10 \Omega/\text{km}$ . Dicho hilo de guarda es visto desde la fuente como una impedancia de  $6.3 \Omega$ , ligeramente inductiva que queda en paralelo con la resistencia propia de la subestación si se conecta a su estructura.

Puede observarse que  $6.3 \Omega$  es mucho mayor que  $R$ , y por lo tanto se puede despreciar en la mayoría de los casos que la corriente se desvía por los hilos de guarda.

## 7.5 TIEMPO MÁXIMO DE ELIMINACIÓN DE UNA FALLA

El tiempo de despeje de una falla está estrechamente ligado al tipo de protecciones que se utilicen y a las características mecánicas y eléctricas que tiene que efectuar la interrupción, puesto que la eliminación de la falla se consigue mediante la actuación de un elemento de corte, ordenada por un dispositivo de protección que de alguna manera, detecte la existencia de la falla. En instalaciones actuales se pueden encontrar, para las protecciones, tipos que van desde soluciones electromagnéticas, totalmente analógicas, a las extáticas, que ya incorporan en sus últimas versiones, uno o varios microprocesadores y tratamiento digital de las magnitudes a controlar. Por lo que respecta a los equipos de corte (interruptores), utilizan técnicas de extinción del arco variadas, pues el medio puede ser aire comprimido, hexafluoruro de azufre, aceite, etc.

No se considerarán los cortacircuitos fusibles como elementos de interrupción de las intensidades de falla a tierra, salvo que se justifique lo contrario.

# 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 8.1 CONCLUSIONES

Como se mencionó a través de este documento, la cantidad de material utilizado (cobre) en el diseño de una instalación de puesta a tierra es directamente proporcional con en el nivel de corto circuito que exista en el punto donde se construya la subestación, por lo que resulta económicamente incosteable si se pretende proporcionar el nivel de seguridad que las normas lo especifican.

Con los valores de corto circuito actuales, y aun más, los esperados para los próximos cinco años, se tendrían que diseñar mallas con cuadrículas de menos de un metro, lo cual según el manual de la IEEE resulta peligroso por los voltajes de paso que se alcanzarían.

## 8.2 RECOMENDACIONES

La solución para el problema de instalar mallas de tierra sobredimensionadas derivado del incremento del valor de corto circuito en las principales ciudades de México en especial de la ciudad de Monterrey Nuevo León, es establecer un límite como tope para los niveles de falla; lo anterior puede lograrse si se reconfigura la red eléctrica y se crean sub-anillos a

nivel de subtransmisión (principalmente 115 kV), esto es rompiendo enlaces mallados con lo cual se pierde confiabilidad del sistema pero se evita el reemplazo de equipo de seccionamiento, como interruptores de potencia por baja capacidad interruptiva, y el rediseño de las redes de tierra tanto para instalaciones de la propia CFE como servicios particulares conectados en 115 kV.

## BIBLIOGRAFIA

De la Vega Ortega Miguel  
Ingeniería de la puesta a tierra  
Limusa-Noriega  
1998

García Márquez Rogelio  
La puesta a tierra de instalaciones eléctricas  
Grupo Alfa omega  
1999

O' riley Ronald P.  
Electrical Grounding  
Delmar Publishers Inc.  
1993

Martínez Requena Juan J.  
Toledano Gasca José C.  
Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas  
1998

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc  
Guide for Safety in AC Substation Grounding.  
ANSI/IEEE Std. 80-2000  
2000

## LISTADO DE FIGURAS

Figura	Página
1.- Diferentes trayectorias de las corrientes a tierra.....	6
2.- Gradientes de potencial que se forman en una subestación.....	7
3.- Diferentes potenciales a los que una persona queda expuesta.....	42
4.- Representación del voltaje de paso.....	45
5.- Representación del voltaje de paso.....	46

# APÉNDICE No. 1

*DISEÑO DE RED DE TIERRAS*  
*PARA*  
*SUBESTACIONES ELECTRICAS*  
*DE POTENCIA*

PROYECTO DE COGENERACION TRACTEBEL - ALCALI  
GARCIA N.L.

**SUBESTACION MANIOBRAS ALCALI**

**115 KV**

## **INDICE**

1.0 Generalidades.....	74
1.1 Nomenclatura.....	75
2.0 Datos base para el cálculo.....	76
2.1 Area ocupada por la malla del sistema de tierras.....	76
2.2 Tiempo de liberación de la falla.....	76
3.0 Factores de corrección.....	77
3.1 Factor por decremento.....	77
3.2 Factor por crecimiento.....	77
4.0 Corrección de la corriente.....	77
5.0 Cálculo de la sección del conductor y conectores.....	77
6.0 Cálculo para determinar el número de varillas.....	78
7.0 Longitud de la malla.....	79
7.1 Malla propuesta.....	79
7.2 Determinación del coeficiente Km.....	79
7.3 Determinación del coeficiente Ki.....	80
7.4 Determinación de la longitud total de la malla de tierra.....	80
7.5 Cálculo de la resistencia de la malla.....	81
8.0 Determinación de potenciales.....	81
8.1 Potencial de la malla.....	81
8.2 Potencial del paso.....	81
8.3 Límites de tensión tolerables por el cuerpo humano.....	82
8.3.1 Voltaje de paso tolerable por el cuerpo humano con superficie de grava.....	83
8.3.2 Voltaje de contacto tolerable con superficie de grava.....	83
9.0 Comprobación de las condiciones de seguridad.....	83
10.0 Comparación de los voltajes generados y tolerables.....	84
11.0 Conclusiones y Recomendaciones.....	84

---

## 1.0 GENERALIDADES

La red de tierras se instala para lograr los tres propósitos principales.

- a). Seguridad para el personal, proporcionando un circuito de baja impedancia para la circulación de las corrientes en la tierra, evitando que durante la circulación de corriente se presenten diferencias de voltaje peligrosas para el personal que se encuentra ó circula en el área de la subestación.
  
- b). Para la conexión a tierra de las estructuras, con el fin de dar seguridad a las personas que las tocan.
  
- c). Para la conexión a tierra de los circuitos eléctricos, con objeto de facilitar la detección de fallas a tierra, obteniendo mayor seguridad y confiabilidad en el servicio eléctrico.

ESTE CALCULO FUE REALIZADO EN BASE A LAS NORMAS IEEE Std. 80-1986,  
NOM-001-SEMIP-1999 Y LOS SIGUIENTES DOCUMENTOS.

- a). Reporte de medición de resistividad eléctrica en la S.E. 115 kV  
Para efectos de calculo se considero una resistividad promedio de 200 ohm-m
  
- b). La Potencia de Cortocircuito fue proporcionada por la C.F.E.
  
- c). Ver Tabla 3 del Capítulo 10 de la Norma ANSI/IEEE - Std. 80-1986  
Resistividades típicas para piedra triturada.



### 1.1. Nomenclatura

$\&$	=	Distancia entre varillas en metros.
$p$	=	Resistividad del terreno.
$p_p$	=	Resistividad superficial.
$A$	=	Sección del cobre en circular mils.
$A_d$	=	Ancho de la red.
$A_s$	=	Ancho de la subestación.
$D$	=	Distancia entre conductores en metros.
$d_c$	=	diámetro del conductor.
$d_{vs}$	=	Diámetro de las varillas de tierra.
$E_m$	=	Potencial de la malla.
$h$	=	Profundidad de enterramiento de la red.
$h_s$	=	Espesor de la superficie de grava.
$I_{cc}$	=	Corriente de falla a tierra.
$I_B$	=	Valor efectivo de la corriente que circula por el cuerpo durante un tiempo determinado.
$K_i$	=	Factor de corrección por irregularidades en la distribución de corr.
$K_m$	=	Coefficiente de la malla.
$K_s$	=	Factor que considera las dimensiones de la red.
$L_d$	=	Longitud de la red.
$L_m$	=	Longitud de la malla.
$L_s$	=	Longitud de la subestación.
$L_{vs}$	=	Longitud de las varillas de tierra.
$N$	=	Número de conductores promedio.
$n_1$	=	Número de conductores en paralelo.
$n_2$	=	Número de conductores transversales.
$R$	=	Resistencia de la red.
$R_{esp}$	=	Resistencia esperada.
$R_b$	=	Resist. del cuerpo humano entre ambos pies, ó entre pie y mano.
$S_d$	=	Area de la malla.
$t_f$	=	Tiempo de duración de la falla.
$T_m$	=	Temperatura máxima admisible de los elementos.
$T_a$	=	Temperatura ambiente.
$F_{dc}$	=	Factor de división de corriente.
$K_h$	=	Factor de corrección para la profundidad de la red.

## 2.0 DATOS BASE PARA EL CALCULO.

a). Resistividad del terreno. (Ver Estudio de Resistividad)	$\rho = 200.00 \text{ ohm-mto.}$
b). Longitud de la varilla de tierras.	$L_{vs} = 3.05 \text{ mts.}$
c). Diámetro de la varilla de tierras.	$d_{vs} = 0.0159 \text{ mts.}$
d). La corriente de falla a tierra. (4050 MVA 1f (C.F.E))	$I_{cc} = 20,334 \text{ Amp.}$
e). La resistividad del piso en el área, (grava).	$\rho_p = 8,534 \text{ ohm-mto.}$
f). Profundidad de enterramiento de la malla.	$h = 0.60 \text{ mts.}$
g). Resistencia esperada (NOM-001-SEMP-1999)	$Resp. = 5.00 \text{ ohms.}$
h). Factor de división de corriente	$F_{dc} = 0.60$

## 2.1 Area ocupada por la malla del sistema de tierras..

$$A_s = 57.50 \text{ mts.}$$

$$L_s = 105.00 \text{ mts.}$$

Como el limite de la subestación, será delimitado por una malla ciclónica, tenemos que :

$$A_d = A_s + 2 \times (2) \quad \text{Por lo tanto :} \quad A_d = 61.50 \text{ mts.}$$

$$L_d = L_s + 2 \times (2) \quad \text{Por lo tanto :} \quad L_d = 109.00 \text{ mts.}$$

$$S_d = L_d \times A_d. \quad \text{Por lo tanto :} \quad S_d = 6,703.5 \text{ mts}^2.$$

## 2.2 Tiempo de Liberación de la Falla.

Tiempo de Apertura de Interruptor (3 ciclos)	0.050 seg.
Relevador 50 / 51. (tiempo de respuesta)	0.200 seg.
<b>TOTAL :</b>	<b>0.250 seg.</b>

### 3. FACTORES DE CORRECCION.

#### 3.1 Factor Por Decremento. ( Df )

El factor por decremento se aplica de acuerdo a la duración de la falla, esta se considera 0.25 seg. (Ver Pag.105 ANSI / IEEE Std. 80-1986). Este valor se puede considerar completamente seguro. ( Ver tabla 6, Pág. 105 ANSI / IEEE ).

$$Df = 1.1 \quad (t = 0.25 \text{ seg})$$

#### 3.2 Factor Por Crecimiento. ( Cp ).

El factor por crecimiento del sistema toma en consideración la corriente de Corto - Circuito debido al crecimiento de la red ( C.F.E. )

$$Cp = 1.2$$

### 4. CORRECCION DE LA CORRIENTE.

$$I_{\text{corregida}} = I_{cc} \times Df \times Cp \times F_{dc} \quad \longrightarrow \quad I_{cc} = 16,105 \text{ Amps.}$$

### 5. CALCULO DE LA SECCION DEL CONDUCTOR Y CONECTORES.

a). Cálculo del conductor de la red de tierras.

$$A = \frac{I_{cc}}{\sqrt{\frac{\log_{10} \left[ \frac{(T_m - T_a)}{234 + T_a} + 1 \right]}{32.85 \cdot S}}}$$

$I_{cc} =$	16,105	Amp.	
$tf =$	0.250	seg.	
$S =$	0.5	seg.	* valor de $\sqrt{0.25}$ seg
$T_m =$	1083	° C	* valor para calcular el cable.
$T_a =$	40	° C	

$$A = \frac{16,104.53}{\sqrt{\frac{\log_{10} \left[ \frac{1083 - 40}{234 + 40} + 1 \right]}{32.85 \cdot 0.5}}}$$

$$A = 79,043 \text{ CM} = 79 \text{ KCM.} = 40.052 \text{ mm}^2$$

El área obtenida, comprende a un calibre de cobre # 1 AWG, pero se usará cable calibre 4/0 AWG, por cuestión de esfuerzos mecánicos y según las Normas de C.F.E.

b). Cálculo de la sección de uniones con soldaduras de exotérmica de cobre.

$$A = \frac{I_{cc}}{\sqrt{\log_{10} \left[ \frac{(T_m - T_a)}{234 + T_a} + 1 \right]}} \cdot 32.85 * S$$

$I_{cc} = 16,105 \text{ Amp.}$   
 $t_f = 0.250 \text{ seg.}$   
 $S = 0.5 \text{ seg.}$   
 $T_m = 250 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

\* valor de  $\sqrt{0.25} \text{ seg}$   
 \* valor para conectores soldables.

$$A = \frac{16,104.53}{\sqrt{\log_{10} \left[ \frac{250 - 40}{234 + 40} + 1 \right]}} \cdot 32.85 * 0.5$$

$$A = 131,301 \text{ CM}, = 131 \text{ KCM.} = 66.532 \text{ mm}^2$$

El área obtenida, comprende a un calibre de cobre # 2 AWG; pero se usará cable cal. # 4/0 AWG por cuestión de esfuerzos mecánicos.

## 6. CALCULO PARA DETERMINAR EL NUMERO DE VARILLAS.

$$N = \frac{(D)}{2 * \pi * R * L_{vs}} \left\{ \ln \left[ \left( \frac{4 * L_{vs}}{d_{vs}} \right) - 1 \right] \right\}$$

$$N = \frac{200.00}{6.28 * 5.00 * 3.05} * \ln \left[ \left( \frac{4 * 3.05}{0.0159} \right) - 1 \right]$$

$$N = 13.87 \text{ v} \quad N = 14 \text{ Varillas.}$$

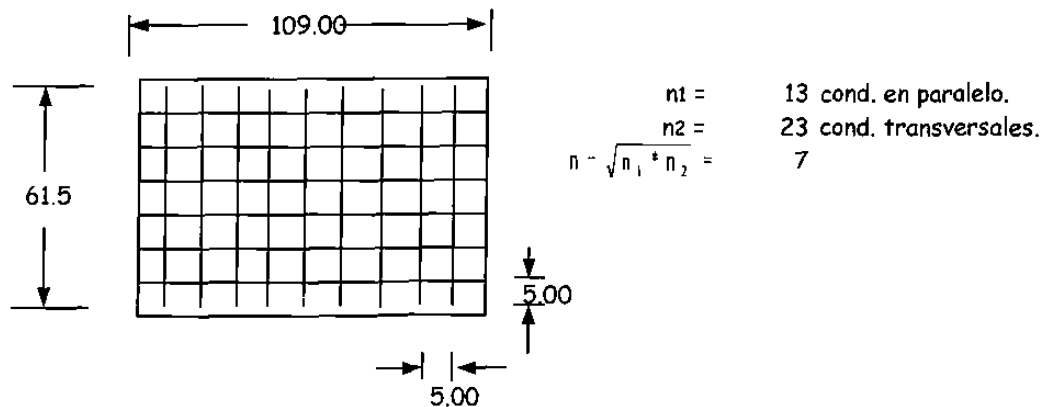
\*\*Observamos que el cálculo nos indica que se deben utilizar 14 Varillas para la red y 16 varillas para la puesta a tierra de los equipos, la cual da un total de 30 varillas.

## 7. LONGITUD DE LA MALLA.

### 7.1. Malla Propuesta.

Ancho = 61.50 mts.      Largo = 109.00 mts.      Area = 6,703.5 m<sup>2</sup>.

\* Espaciamiento entre conductores: 5.00 mts.



#### a). Total del conductor de la malla propuesta.

$$61.50 * 23 = 1414.50 \text{ mts.} \quad \text{Conductores verticales}$$

$$109.00 * 13 = 1417.00 \text{ mts.} \quad \text{Conductores horizontales}$$

$$30 * 3.05 = 91.50 \text{ mts.} \quad \text{Varillas de red de tierra}$$

$$\text{Total del conductor propuesto} = 2831.50 \text{ mts.} \quad \text{no incluye long. de varillas}$$

$$L = \frac{(K_m * K_i * P * I_{cc} * \sqrt{t})}{157 + 0.235 * P_p C_s(h_s, k)}$$

#### 7.2. Determinación del coeficiente. ( $K_m$ ).

$$K_m = \frac{1}{2 * \pi} \left[ \text{Ln} \left[ \frac{D^2}{16 * h * dc} + \frac{(D + 2h)^2}{8 Ddc} - \frac{h}{4dc} \right] + \left[ \frac{K_{11}}{K_b} \text{Ln} \frac{8}{\pi (2n - 1)} \right] \right]$$

$K_{11} = 1$  Para mallas con varillas en la esquina.

$D = 5.00$  mts.

$dc = 0.0135$  mts.

$P_p = 8,534$  ohm-mto.

\*\*\* Para el cálculo de  $K_h$  aplicamos :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad \begin{array}{l} h = 0.60 \text{ mts.} \\ h_0 = 1.00 \text{ mto. referido a la profundidad de la malla.} \end{array}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.60}{1.00}} \quad \rightarrow \quad K_h = 1.265$$

\*\*\* Una vez obtenido " $K_h$ ", procedemos a obtener " $K_m$ ".

$$K_m = \frac{1}{2 * \pi} \left[ \text{Ln} \left[ \frac{D^2}{16 * h * dc} + \frac{(D + 2h)^2}{8 Ddc} - \frac{h}{4dc} \right] + \left[ \frac{K_{11}}{K_h} \text{Ln} \frac{8}{\pi (2n - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0.556$$

### 7.3. Determinación del coeficiente. ( $K_i$ ).

Por la geometría de la red, (Página 117, ANSI / IEEE Std 80 - 1986)

$$K_i = 0.656 + 0.172n$$

$$K_i = 3.630 \text{ para cálculo de } E_m$$

$$K_i = 4.612 \text{ para cálculo de } E_p$$

### 7.4. Determinación de la longitud total de la malla de tierra.

La longitud del conductor necesario para obtener la seguridad dentro de la subestación, será de acuerdo a la formula ( Pág. 115 - ANSI / IEEE - Std. 80 - 1986 )

$$L = \frac{(K_m * K_i * P * I_{cc} * \sqrt{t})}{157 + 0.235 * P_p * C_s (h_s, k)}$$

$$L = \frac{0.5561 * 3.63 * 200.00 * 16,105 * 0.5}{157 + 0.235 * 8,534 * 0.68}$$

$$L = 2,138 \text{ mts.}$$

### 7.5 Cálculo de la resistencia de la malla

$$R_{red} = p \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

$$R_{red} = 1.14 \text{ Ohms}$$

$R_{red}$  : Resistencia a tierra en ohms.

$p$  : Resistividad del terreno 200.00 ohms - mto

$A$  : Area de la malla 6,704 mts

$L$  : Long. Total del conductor 2923

$h$  : Prof. prom. de la malla 0.60

Ver fórmula en pág. 82 ANSI / IEEE Std. 80-1986

$R_{red}$	es menor que	$R_{esperada}$
-----------	--------------	----------------

## 8.0 DETERMINACION DE POTENCIALES.

### 8.1 Potencial de la malla.

Es la diferencia de potencial en volts, del conductor de la malla y la superficie del terreno al centro del rectángulo de la malla

$$** \quad E_m = K_m * K_i * p * \frac{I_{cc}}{L}$$

$L$  = Longitud del cond. incluyendo varillas.

$$L = L_c + 1.15 * L_r$$

$L_c$  = Longitud del cond. calculada.

$$L_r = 91.50 \text{ mts.}$$

$L_r$  = Longitud de las varillas de tierra.

$$L = 2,937 \text{ mts.}$$

\*\* Ver fórmula en pág. 114 ANSI / IEEE Std. 80-1986

$$E_m = 0.5561 * 3.63 * 200.00 * \frac{16,105}{2937}$$

$$E_m = 2,214 \text{ Volts.}$$

### 8.2 Potencial de paso.

Es el valor que se genera entre dos puntos distantes a un metro, sobre la superficie del terreno, al ocurrir la falla máxima.

$$E_p = K_s * K_i * p * \frac{I_{cc}}{L}$$

\*\*Ver fórmula en pág. 114 ANSI / IEEE Std. 80-1986

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

$n = N^{\circ}$ . mayor de conductores

$$K_s = \frac{1}{\varphi} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{0.60} + \frac{1}{5.0} + \frac{1}{0.60} \right] + \frac{1}{5.00} \left[ 1 - (0.5)^{23-2} \right]$$

$$K_s = 0.3858$$

\*\*\* Una vez obtenido "Ks", procedemos obtener el "Ep".

$$E_p = 0.3858 * 4.61 * 200.00 * \frac{16,105}{2,937}$$

$$E_p = 1,951 \text{ Volts.}$$

### 8.3 Limites de tensión tolerables por el cuerpo humano.

- La corriente mínima, para producir fibrilación ventricular, es de 100 miliamperes.
- La corriente mínima para producir contracción muscular en el pecho, y que se tenga asfixia es de 25 miliamperes.
- La corriente mínima para evitar soltar las partes energizadas es de 9 y 6 miliamp. para hombres y mujeres, respectivamente.

Los límites indicados, son para tiempos relativamente grandes, se pueden tolerar corrientes mayores durante tiempos cortos.

La ecuación que relaciona la corriente tolerable por un cuerpo humano promedio, con el tiempo de duración es:  $I_B^2 * t = 0.0246$  ( hasta  $t = 3$ segs.), para el tiempo de liberación de la falla que consideramos de 0.250 seg. Se tendrá una corriente de:

\*\*Ver fórmulas en págs. 39-46 ANSI / IEEE Std. 80-1986

$$I_B = \sqrt{\frac{0.0246}{t}}$$

Por lo tanto :

$$I_B = 0.3137 \text{ Amps.}$$

$$h_s = 0.15 \text{ m}$$

$$k = \frac{P - P_p}{P + P_p}$$

$$k = \frac{200 - 8534.4}{200 + 8534.4}$$

$$k = -0.95$$

Con  $h_s$  y  $k$  en gráf. ANSI/IEEE Std. 80-1986 pág 41 obtenemos  $\rightarrow C_s = 0.68$



Resistencia de los dos pies en serie

$$R_{2Fs} = 6 Cs(hs, k) Pp$$

$$R_{2Fs} = 34820 \text{ ohms}$$

Resistencia de los dos pies en paralelo

$$R_{2Fp} = 1.5 Cs(hs, k) Pp$$

$$R_{2Fp} = 8705.1 \text{ ohms}$$

8.3.1 Voltaje de paso tolerable por el cuerpo humano con superficie de grava.

$$V_{p-pp} = (R_B + R_{2Fs}) I_B \quad \text{Considerando resistencia del cuerpo } R_B = 1000 \text{ ohms}$$

$$V_{p-pp} = 11236 \text{ volts}$$

8.3.2 Voltaje de contacto tolerable con superficie de grava.

$$V_{c-pp} = (R_B + R_{2Fp}) I_B$$

$$V_{c-pp} = 3044.4 \text{ volts}$$

## 9.0 COMPROBACION DE LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD.

Para verificar si la red es adecuada, nos valemos de la siguiente ecuación: (NORMA IEEE - 80-76)

$$\frac{K_m * K_i * P * I_{cc} * \sqrt{t_f}}{L} - (0.235 * C(h, K) P_p) < 157$$

$$\frac{0.5561 * 3.63 * 200 * 16,104.53 \sqrt{0.25}}{2,936.73} - (0.235 * 8,534 * 0.68) < 157$$

$$-257 < 157$$

## 10.0 COMPARACIÓN DE VOLTAJES GENERADOS Y TOLERABLES.

TENSION EN LA RED GENERAL AL OCURRIR EL CORTO CIRC. MAXIMO	TENSION QUE PUEDE TOLERAR EL PERSONAL QUE TRANSITA EN LA SUBESTACION
$E_p = 1,951$ Volts.	$V_{p-pp} = 11,236$ Volts
$E_m = 2,214$ Volts.	$V_{c-pp} = 3,044$ Volts

Lo anterior muestra que los voltajes generados al ocurrir la falla son menores que los que puede tolerar un cuerpo humano promedio.

## 11.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- a). El personal autorizado, podrá circular dentro y fuera de la subestación, si se pone firme de grava, por dentro de la cerca y a un metro por fuera de la misma, para incrementar la resistencia al toque; desde el exterior.
- b). Aterrizar todos los equipos de la subestación, a los puntos más cercanos de la red, con conexión fundida.
- c). Aterrizar los apartarrayos del transformador, directamente a las varillas de tierra, colocadas especialmente para eso.
- d). Asegurarse al termino de la construcción, mediante una prueba, de que la resistencia sea menor a cinco ohms.

# GLOSARIO

## ELECTRODO AUXILIAR DE TIERRA

Es un electrodo de tierra que cuenta con ciertas características especiales de diseño u operación. Su función principal es encargarse de conducir a tierra las corrientes de falla.

## CERCADO CONTINUO

Es un bus o cable continuo en la periferia de las instalaciones, el cual sirve para conectar los conductores transversales que forman la cuadrícula de la malla. Se coloca solo en los extremos de la instalación y en puntos específicos intermedios.

## COMPONENTE DE CORRIENTE DIRECTA ( DC OFFSET)

Es la diferencia entre la onda de corriente simétrica y la onda de la corriente obtenida durante una condición de transitoria del sistema de potencia. Matemáticamente la corriente de falla puede descomponerse en dos partes, una componente simétrica alterna y una componente unidireccional (corriente continua). La componente unidireccional puede ser de otra polaridad, pero sin cambiar y disminuye en un predeterminado rango.

## FACTOR DE DECREMENTO

Es un factor de ajuste usado con la corriente de falla a tierra simétrica, usado para asegurar los cálculos del diseño. Este determina la raíz media cuadrática (rms) equivalente a la duración de la falla con onda de corriente asimétrica.

## CORRIENTE DE FALLA ASIMÉTRICA EFECTIVA

Es la corriente de falla real, suma de las dos diferentes formas de onda, la simétrica y asimétrica.

$$IF = Df \times If$$

Donde

IF = Es la corriente de falla asimétrica efectiva o real en Amperes.

If = Es la corriente de falla a tierra simétrica en Amperes.

Df = Es el factor de decremento.

## CORRIENTES ENCERRADAS

Son las corrientes que resultan de los voltajes inducidos en el interior de la malla de tierra.

## FACTOR DE DIVISIÓN EN LA CORRIENTE DE FALLA

Es el factor que representa la relación de corrientes que fluyen entre la malla de tierra y los alrededores a ella.

$$Sf = I_g / 3I_o$$

Donde:

Sf = Es el factor de división de la corriente de falla

Ig = Es la corriente rms simétrica en la malla de tierra en Amperes.

Io = Es la corriente de falla de secuencia cero en Amperes

## SUBESTACIÓN ENCAPSULADA

Es una subestación compacta, donde las líneas o buses están inmersos en ductos rodeados de gas como aislamiento.

## ATERRIZAR

Conexión a tierra, esta puede ser accidental o intencional, en la cual un circuito o equipo eléctrico es conectado a tierra.

## ATERRIZADO

Puede ser un sistema, circuito o equipo que se conecta a tierra para mantener un potencial aproximado al de tierra.

## CORRIENTE DE TIERRA

Es la corriente que fluye hacia el interior de la tierra.

## ELECTRODO DE TIERRA

Es un conductor embebido en tierra y es usado para drenar a ella las corrientes que circulan por una malla de tierra.

## MALLA DE TIERRA

Es el sistema de conductores unidos en forma de cuadrícula y separados distancias predeterminadas, enterrados a una cierta profundidad. Utilizada para obtener potenciales de toque y de contacto mínimos, que no pongan en peligro la seguridad de las personas. Proporciona un punto común de conexión de todo equipo eléctrico y estructuras metálicas que se encuentren dentro de ella.

## INCREMENTO DEL POTENCIAL DE TIERRA

Es el máximo potencial eléctrico que pudiese existir entre la malla de tierra de una subestación y un punto relativamente distante de ella.

## CIRCUITO DE RETORNO DE TIERRA

Es aquella porción de la tierra o cuerpo metálico equivalente que es utilizado para completar el circuito de circulación de la corriente desde la fuente.

## SISTEMA DE ATERRIZAMIENTO

Es el que comprende todos los elementos interconectados a tierra en una área específica.

## MÁXIMA CORRIENTE DE MALLA

Es el valor máximo de diseño de la corriente de malla, definido como sigue:

$$IG = Df \times Is$$

Donde:

IG = Es la máxima corriente de malla en Amperes.

Df = Es el factor de decremento para la duración completa de la falla en segundos.

Ig = Es la corriente simétrica (rms) de la malla en Amperes.

## CONDUCTOR DE TIERRA PARA EQUIPOS

Se usa para conectar las partes metálicas de las estructuras que no conducen corriente, equipos charolas, conductores y otras cubiertas a la malla de tierra.

## CONDUCTOR DE TIERRA PARA NEUTRO

Conecta el neutro de un transformador, la terminal de tierra de un apartarrayo, el neutro de capacitores, de equipo de conexión a tierra, etc., a la malla de tierras.

## BARRA DE TIERRA

Es una barra o conductor al que se conectan los conductores de tierra de varias partes de equipos y que a su vez esta conectado a la malla de tierras en uno o más puntos.

## RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA

Es la resistencia ohmica entre la malla de tierras y un electrodo de tierras remoto de resistencia cero. En ocasiones puede considerarse como la resistencia de contacto de la malla de una tierra de resistencia cero.

## SOLIDAMENTE ATERRIZADO

Conectado intencionalmente a través de una conexión a tierra de impedancia suficientemente baja y de conductividad alta, de tal manera que una falla a tierra produzca una elevación en las tensiones de las fases no falladas menor de 40 %.

Un sistema de corriente alterna o una porción de él esta efectivamente conectado a tierra cuando la relación de la reactancia de secuencia cero con la secuencia positiva de todos los puntos del sistema o la porción específica, sea no mayor de tres.

$$X_0/X_1 \leq 3$$

Y la relación de la resistencia de secuencia cero con la reactancia positiva sea no mayor a uno, en cualquier condición de operación y para cualquier condición de magnitud de capacidad de generación conectada.

$$R_0 \leq X_1$$

### CORRIENTE A TIERRA

Es la corriente que se inyecta a la tierra, ya sea en un conductor de puesta a tierra o en la malla o red de tierras.

### CORRIENTE RESIDUAL

Es la suma vectorial de las corrientes, exclusivamente en los conductores de fase. Normalmente vale  $3I_0$ , donde  $I_0$  es la corriente de secuencia cero.

### CORRIENTES DE REGRESO A TIERRA

Es la suma vectorial de las corrientes en todos los conductores, el neutro o la pantalla inclusive.

### CORRIENTE DE SECUENCIA CERO

Es aquella porción de las corrientes trifásicas desbalanceadas que pueden representarse matemáticamente con un conjunto de vectores balanceados que están en fase. Las corrientes de secuencia cero pueden circular del neutro a tierra en algunas cargas conectadas en estrella o en bancos de transformadores, o bien fluyen en la delta de los mismos transformadores.

### CORRIENTES DE FALLA A TIERRA

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

### CORRIENTE DE MALLA A TIERRA

Causa los gradientes de tensión y eleva el potencial de la red de tierras sobre el potencial de una tierra lejana.

## POTENCIAL DE TIERRA

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

## ELECTRODO DE TIERRA INCIDENTAL

Es cualquier objeto metálico enterrado, que por cualquier motivo, de uso distinto al del electrodo de tierra, pero que esta conectado al sistema de tierra. Como ejemplos típicos pueden citarse las tuberías metálicas para agua, tubos de pozos, bases de tipo emparrillado.



## RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

La presente Tesis “Sistema de Red de Tierras en Subestaciones Eléctricas de Potencia”, fue elaborada por el Ing. Guillermo Rodríguez Jauregui para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica especialidad de Potencia, él es titulado como Ingeniero Mecánico Electricista y egresado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica en el año de 1994, se desempeña actualmente como Supervisor en el Departamento de Planeación Divisional de la Comisión Federal de Electricidad, donde participa en la revisión de proyectos de nuevas subestaciones y líneas de subtransmisión; nació en la ciudad de Monterrey N.L., el 25 de Junio de 1972, es hijo del Sr. Melchor Antonio Rodríguez Lozano y la Sra. Rosa Maria Jauregui Arroyo.

