



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA  
ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS  
RECURSOS

NATURALES NO RENOVABLES

**TEMA:**

**“IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A  
TIERRA DE LOS EQUIPOS EN LA BASE DE LA TORRE 2 DE LA  
RADIO UNIVERSITARIA 98.5 MHz”**

**AUTOR:**

GUARNIZO JIMÉNEZ JONATHAN FERNANDO

**DIRECTOR:**

ING. JUAN PABLO CABRERA SAMANIEGO, Mg. Sc.

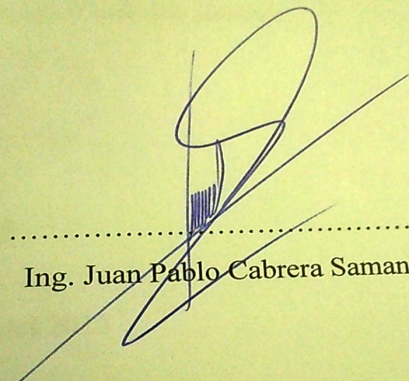
LOJA- ECUADOR 2015

## CERTIFICACIÓN

Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego, Director de la presente Tesis de Grado, certifico haber dirigido, asesorado y corregido el presente trabajo cuyo tema es **“IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS EN LA BASE DE LA TORRE 2 DE LA RADIO UNIVERSITARIA 98.5 MHz”**, previo a optar el Título de Tecnólogo de nivel Superior en la Especialidad de Electrónica y Telecomunicaciones, realizado por el Sr. Jonathan Fernando Guarnizo Jiménez, el mismo que cumple con los requisitos correspondientes.

Para lo que autorizo su presentación y posterior sustentación.

Loja, Enero 2015 .



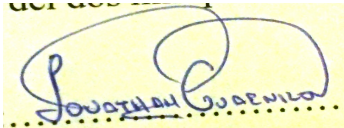
.....  
Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego, Mg.Sc

## AUTORÍA

Yo, Jonathan Fernando Guarnizo Jiménez, declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el repositorio institucional Biblioteca Virtual.

Autor: Jonathan Fernando Guarnizo Jiménez

Firma: .....

Cedula: 110479745-9

Fecha: 05 de Marzo del 2015

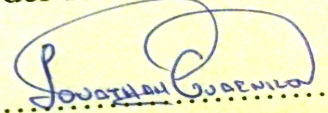
**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE TEXTO COMPLETO.**

Yo Jonathan Fernando Guarnizo Jiménez declaro ser autor de la tesis titulada “IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS EN LA BASE DE LA TORRE 2 DE LA RADIO UNIVERSITARIA 98.5 MHz”; Como requisito para optar el grado de TECNÓLOGO DE NIVEL SUPERIOR EN LA ESPECIALIDAD DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad , a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los cuatro días del mes de febrero del dos mil quince firma el autor.

Firma:  .....

Autor: Jonathan Fernando Guarnizo Jiménez.

Cedula: 1104797459

Dirección: Av. De los Paltas y Cuactemoc. Correo Electrónico: jonaf89@hotmail.com

Teléfono: 0980609906

**DATOS COMPLEMENTARIOS**

Director de tesis: Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego, Mg.Sc

Tribunal de grado: Ing. Jorge Carrión Gonzales, Mg.Sc

Ing. Julio Cuenca Tinitana Mg.Sc

Ing. Byron Solórzano Castillo, Mg.Sc

## **PENSAMIENTO**

“La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar”.

Thomas Chalmers.

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de tesis a Dios, por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado. A mi familia, en especial a mi madre y mi padre que aunque no esté junto a mi es mi ejemplo a seguir, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi capacidad. Es por ello, lo que soy ahora.

También dedico este proyecto a mi esposa y mi hijo, compañeros inseparables de cada jornada. Ella representó gran esfuerzo y tesón en momentos de decline y cansancio. Los amo con mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, ser maravilloso que me dio fuerza y fe para creer lo que me parecía imposible terminar. A mi familia por ayudarme en cada momento de mi vida.

Gratitud al Ing. Juan Pablo Cabrera, por el apoyo, orientación y experiencia que me brindó para culminar mi Tesis.

El Autor.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>a. TÍTULO:</b> .....	13
<b>b. RESUMEN</b> .....	14
<b>c. INTRODUCCIÓN</b> .....	16
<b>d. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	20
<b>d.1. CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES</b> .....	20
d.1.1. Definiciones. ....	20
d.1.2. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPAT).....	20
<b>d.1.3. PUESTA A TIERRA DE EQUIPOS</b> .....	21
d.1.3.1. Conductor de Puesta Tierra. ....	22
d.1.3.2. Resistividad del Suelo.....	22
d.1.3.3. Resistividad Aparente. ....	23
d.1.3.4. Resistencia mutua entre Electrodo.....	23
d.1.3.5. Potencial Eléctrico.....	23
d.1.3.6. Tierra Remota .....	23
<b>d.1.4. PARTES QUE COMPRENEN LAS PUESTAS A TIERRA</b> .....	23
d.1.4.1. Punto de Puesta a Tierra. ....	24
d.1.4.2. Electrodo.....	24
d.1.4.3. Resistencia de Tierra circundante. ....	24
<b>d.2. CAPÍTULO II. OBJETIVOS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA</b> .....	25
<b>d.2.1. MÉTODOS DE PUESTA A TIERRA</b> .....	25
d.2.1.1. Sistema no aterrizado.....	26
d.2.1.2. Sistema aterrizado.....	26
d.2.1.2.1. Sistema aterrizado mediante impedancia.....	27
d.2.1.2.2. Sistema aterrizado con baja impedancia.....	28
<b>d.2.2. TIPOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA</b> .....	28
d.2.2.1. Puesta a tierra para sistemas eléctricos. ....	28
d.2.2.2. Puesta a tierra de los equipos eléctricos.....	29
d.2.2.3. Puesta a tierra en señales electrónicas.....	29



d.2.3. La tierra de protección. ....	30
d.3. CAPÍTULO III. CONDUCTORES DE TIERRA.....	31
d.3.1. Conductores de conexión y conductores de protección.....	31
d.3.1.1. Conductor de protección de circuito. ....	31
d.3.1.2. Conductores de conexión. ....	31
d.3.1.3. Conductores de conexión equipotencial principales. ....	32
d.3.1.4. Conductores de conexión equipotencial suplementarios. ....	32
d.3.2. ELECTRODOS DE TIERRA .....	33
d.3.2.1. Barras. ....	33
d.3.2.2. Placas. ....	34
d.3.2.3. Electrodo horizontales. ....	35
d.3.2.4. Electrodo secundarios.....	36
d.3.3. MÉTODOS DE INSTALACIÓN.....	36
d.3.3.1. Barras. ....	37
d.3.3.2. Planchas.....	39
d.3.3.3. Electrodo horizontales. ....	40
d.3.3.4. Relleno. ....	40
d.3.4. Conexiones. ....	40
d.3.4.1. Conexiones mecánicas.....	41
d.3.4.2. Conexiones bronceadas (soldadas en fuerte).....	42
d.3.4.3. Uniones exotérmicas.....	42
d.3.4.4. Conexiones soldadas en forma autógena.....	43
d.3.5. COMPORTAMIENTO DE ELECTRODOS DE TIERRA.....	43
d.3.5.1. Efecto de la forma, tamaño y posición del electrodo.....	44
d.3.5.1.1. Incremento de la profundidad de enterramiento de una barra vertical en suelo uniforme.....	45
d.3.5.1.2. Incremento de longitud de un conductor horizontal.....	47
d.3.5.1.3. Incremento de la longitud del lado de una plancha o malla de tierra cuadrada.....	48
d.3.5.1.4. Incremento del radio de una barra de tierra.....	48
d.3.5.1.5. Profundidad de enterramiento. ....	49
d.3.5.1.6. Efecto de proximidad. ....	49
d.3.5.2. Arreglos complejos de electrodos. ....	50

<b>d.4. CAPÍTULO IV. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PUESTA A TIERRA</b>	<b>52</b>
<b>d.4.1. RESISTIVIDAD DEL TERRENO</b>	<b>52</b>
d.4.1.1. FACTORES DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD	53
d.4.1.2. Temperatura	53
d.4.1.3. Humedad.	53
d.4.1.4. Estratigrafía.	53
d.4.1.5. Compactación.	53
d.4.1.6. Naturaleza del Terreno.	53
d.4.1.7. Variaciones estacionales.	54
d.4.1.8. Salinidad.	54
<b>d.4.2. MEJORAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO</b>	<b>54</b>
d.4.2.1. Cambio del Terreno.	54
d.4.2.2. Tratamiento Químico del Suelo.	55
d.4.2.2.1. Tipos de tratamiento químico del terreno.	56
d.4.2.2.2. Bentonita.	56
d.4.2.2.3. Compuesto THOR-GEL.	57
d.4.2.2.4. Compuesto TERRAL-LÍQUIDO.	58
d.4.2.2.5. Compuesto PROGAS.	59
d.4.2.2.6. Compuesto ION – FORTE.	60
d.4.2.2.7. Compuesto QUIBACSOL.	61
d.4.2.2.8. SAN-EARTH (cemento conductor).	62
<b>d.5. RESISTENCIA DE TIERRA</b>	<b>62</b>
<b>d.5.1. MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO Y LA RESISTENCIA A TIERRA</b>	<b>64</b>
<b>d.5.2. MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD DE PUESTA A TIERRA.</b>	<b>64</b>
d.5.2.1. Método de Wenner o de los 4 puntos.	64
d.5.2.2. Electrodo igualmente espaciados o arreglo de Wenner:	65
d.5.2.3. Electrodo no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger – Palmer.	66
d.5.2.4. Método de caída de potencial.	67
d.5.2.5. Método de los dos Puntos o dos Polos.	68

d.5.2.6. Método de Tres Puntos o de Triangulación. ....	69
d.5.2.7. Método de Dos Puntos.....	70
d.5.2.8. Método de medición de puesta a tierra de un electrodo vertical. ....	71
<b>d.6. CAPÍTULO VI. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA .....</b>	<b>72</b>
d.6.1. Definición y objetivo de un sistema de puesta a tierra. ....	72
d.6.2. IMPORTANCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA .....	73
d.6.3. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA .....	73
d.6.4. Tomas de Tierra. ....	73
d.6.4.1. Electrodo.....	74
Masa metálica permanentemente en contacto con el terreno, para facilitar el paso de las corrientes. ....	74
d.6.4.2. Línea de enlace con tierra. ....	74
La forman los conductores que unen el electrodo o conjunto de ellos con el punto de puesta a tierra. ....	74
d.6.4.3. Punto de puesta a tierra. ....	74
<b>d.7. CAPÍTULO VII. CONSTITUCIÓN DE UNA PUESTA A TIERRA.....</b>	<b>75</b>
d.7.1. TENSIÓN DE PASO Y CONTACTO .....	76
d.7.1.1. Tensión de paso. ....	76
d.7.1.1.1. Valor Límite para la Tensión de Paso. ....	76
d.7.1.2. Tensión de contacto.....	77
d.7.1.2.1. Valor Límite para la Tensión de Contacto. ....	78
d.7.2. Selección del conductor de la Malla.....	78
Para calcular la sección del conductor se aplica la siguiente ecuación: .....	78
d.7.3. Cálculo Aproximado de Resistencia de Malla. ....	79
d.7.4. Recorrido de las corrientes de falla (IF). ....	81
d.7.5. Corrientes admisibles por el cuerpo humano – $I_k$ . ....	82
<b>d.8. CAPÍTULO VIII. NORMAS.....</b>	<b>83</b>
d.8.1. INTRODUCCIÓN.....	83
d.8.2. INSTITUTO DE INGENIEROS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (IEEE) .....	83
d.8.2.1. IEEE STD 80-2000. GUÍA PARA CONEXIONES SEGURAS A TIERRA EN SUBESTACIONES.....	83
d.8.3. NEC 10, NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN.....	84

d.8.3.1. LITERAL 10.0. CONCEPTOS GENERALES .....	84
d.8.3.2. LITERAL 10.2. MATERIALES.....	86
Literal 10.2.1. Electrodo de puesta a tierra. ....	86
Literal 10.2.3. Conductor de puesta a tierra de equipos.....	87
Literal 10.2.4. Valores de resistencia de puesta a tierra. ....	88
Literal 10.2.6. Sistemas que deben ser puestos a tierra según NEC.....	88
d.8.3.3. Requisitos para conexiones a tierra y uniones para telecomunicaciones en edificios comerciales.....	89
d.8.4. NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2050 NTC 2050.....	90
d.8.4.1. SECCIÓN 250. PUESTA A TIERRA .....	90
d.8.4.2. Disposiciones generales .....	90
Literal 250-1. Alcance. ....	90
Literal 250-58. Equipos que se consideran puestos eficazmente a tierra.....	92
Literal 250-59.. .....	92
d.8.5. Conductores de puesta a tierra. ....	93
Literal 250-91. Materiales.....	93
Literal 250-94.. .....	95
Literal 250-95. Calibre de los conductores de puesta a tierra de los equipos. .	97
Literal 250-112. ....	98
Literal 250-113. Con los conductores y equipos.....	99
Literal 250-114. Continuidad y conexión de los conectores de puesta a tierra de los equipos a las cajas.....	99
Literal 250-115. Conexión con los electrodos.....	99
e. MATERIALES.....	101
e.1. Materiales.....	101
f. RESULTADOS OBTENIDOS .....	105
f.1. Descripción de la zona de instalación y requerimiento del sistema. ....	105
f.2. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES. ....	105
f.3. Selección del conductor de la malla.....	106
f.4. Medición de la resistividad del terreno en los diferentes puntos designados para la construcción de la puesta a tierra. ....	107
f.4.1. Procedimiento utilizado para la medición de la resistividad del terreno en el 108Cerró Huachichambo.....	108

<b>f.5. Cálculo de las tensiones permisibles de paso y contacto.....</b>	<b>108</b>
<b>f.5.1. Tensión de Paso. ....</b>	<b>108</b>
<b>f.5.2. Tensión de Contacto.....</b>	<b>109</b>
<b>f.5.3. Valor Límite para la Tensión de Contacto. ....</b>	<b>109</b>
<b>f.6. Cálculo Aproximado de Resistencia de Malla. ....</b>	<b>110</b>
<b>f.7. Resistencia de la malla. ....</b>	<b>112</b>
<b>g. CONCLUSIONES.....</b>	<b>120</b>
<b>h. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>121</b>
<b>i. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>122</b>

**a. TÍTULO:**

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS  
EN LA BASE DE LA TORRE 2 DE LA RADIO UNIVERSITARIA 98.5 MHz

## **b. RESUMEN**

Una puesta a tierra es un conjunto de electrodos que proporcionan un contacto eléctrico conductivo entre el medio en que se encuentran inmersos e instalaciones, equipos, estructuras metálicas, etc. son de gran importancia para la protección y buen funcionamiento de los equipos eléctricos y electrónicos teniendo también como función fundamental la seguridad del personal que trabaja con los mismos, evitando que una corriente de falla o descargas atmosféricas pueda dañarlos.

El presente estudio trata de investigar los sistemas de puesta a tierra a través de normas nacionales como internacionales tales como la IEE 80-200, NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC), NTC 2050, entre otras, donde se especifica la correcta instalación, utilización y mantenimiento, tratando así de dejar constancia del estado actual de los sistemas de puesta a tierra.

También se habla acerca de los factores que afectan la resistividad del terreno como la temperatura, salinidad, variaciones estacionales, etc., el método que se utilizó para medir la resistividad del terreno en este caso el de Frank Wenner o de los cuatro puntos, de allí teóricamente se detalló otros métodos para hallar la resistividad; como caída de potencial, método de triangulación, entre otros.

Luego se procedió a instalar un sistema de puesta a tierra de los equipos en la base de la torre de la radio universitaria, se hizo con una malla de forma triangular con 3 electrodos de cobre de 1,80 metros.

## **ABSTRACT**

Grounding, is a set of electrodes that provide a conductive electrical contact between the middle in which they are immersed in installation, equipment, metallic structures, etc., which have a big importance for the protection and good performance of electrical and electronic equipment having a principal function the security of staff working whit this, avoiding that a fault current or atmospheric discharger can damage it.

The present study focuses in the investigation about grounding through national standards such as IEEE 80-200, NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC), NTC 2050, where specify the correct installation, use and maintenance to show the current state about grounding.

Another factors that affect soil resistivity as temperature, salinity, seasonal variations, etc., the method that was used to measure soil resistivity was Frank Wenner or four points, and was detailed another methods to find the resistivity as fall of potential, method of triangulation, etc.

Then proceeded to install a system about grounding in the base of college radio tower whit triangular mesh with three electrodes of copper of 1.80 meters.



### **c. INTRODUCCIÓN**

Es bien sabido que la mayoría de los sistemas eléctricos necesitan ser aterrizados y que esta práctica probablemente se inició en los primeros días de los experimentos eléctricos. Entonces, como ahora, la estática se descargaba por conexión a una placa que estaba en contacto con la masa general de la tierra. La práctica ha continuado y se ha desarrollado progresivamente, de modo que tales conexiones a tierra se encuentran en casi todos los puntos en el sistema eléctrico.

Aun cuando la puesta a tierra constituye una parte exclusiva del sistema eléctrico, permanece en general como un tema mal comprendido. En los años recientes ha habido rápidos desarrollos en el modelamiento de sistemas de puesta a tierra, tanto a frecuencia de potencia como superiores, principalmente facilitados por los nuevos recursos y procedimientos computacionales. Esto ha incrementado nuestra comprensión del tema, al mismo tiempo que la actividad de diseño ha llegado a ser significativamente más difícil y las nuevas normas están requiriendo un diseño seguro y más detallado.

El sistema de puesta a tierra se diseña normalmente para cumplir dos funciones de seguridad. La primera es establecer conexiones equipotenciales. Toda estructura metálica conductiva expuesta que puede ser tocada por una persona, se conecta a través de conductores de conexión eléctrica. La mayoría de los equipos eléctricos se aloja en el interior de cubiertas metálicas y si un conductor energizado llega a entrar en contacto con éstas, la cubierta también quedará temporalmente energizada. La conexión eléctrica es para asegurar que, si tal falla ocurriese, entonces el potencial sobre todas las estructuras metálicas conductivas expuestas sea virtualmente el mismo. En otras palabras, la conexión eléctrica iguala el potencial en el interior del local, de modo que las diferencias de potencial resultantes son mínimas. De este modo, se crea una «plataforma» equipotencial.

Si una persona está en contacto simultáneamente con dos piezas diferentes de una estructura metálica expuesta, el conductor de conexión eléctrica debiera garantizar que la persona no reciba un choque eléctrico, haciendo que la diferencia de potencial entre los equipos sea insuficiente para que esto ocurra.

La segunda función de un sistema de puesta a tierra es garantizar que, en el evento de una falla a tierra, toda corriente de falla que se origine pueda retornar a la fuente de una

forma controlada. Por ello se entiende que la trayectoria de retorno está predeterminada, de tal modo que no ocurra daño al equipo o lesión a las personas.

En la actualidad los equipos de la estación base de la torre 2 de la radio universitaria no cuentan con un sistema adecuado de protección contra descargas eléctricas (rayos) y sobretensiones lo único que poseen es una varilla cooperwerld conectada a la estructura metálica de todos los equipos, que de acuerdo a la norma **ANSI/NFPA 70-250(NEC), ANSI/TIA607** referente a “diseño de sistemas de puesta a tierra” este sistema no está bajo las condiciones de operación normal y condición de falla.

Un Sistema de Puesta a Tierra para los medios de comunicaciones debe ofrecer un camino seguro para las descargas de corrientes de fallas, descargas de rayos, descargas estáticas y señales de interferencia electromagnética y radiofrecuencia.

Para evitar estos efectos, se deben instalar dispositivos de protección, para que en el caso de sobretensiones superiores a las nominales, formen un circuito alternativo a tierra, disipando dicha energía. A través de un sistema de puesta a tierra apropiado que asegure una capacidad de disipación adecuada.

En general cualquier sistema de puesta a tierra debe cumplir tres requisitos:

- **Rayos y cortocircuitos:** El sistema de puesta a tierra debe proteger a los ocupantes evitando daños directos tales como fuego, descargas eléctricas o explosiones a causa del impacto directo de un rayo o un sobrecalentamiento provocado por una corriente de cortocircuito.
- **Seguridad:** El sistema de puesta a tierra debe conducir las corrientes de rayo y cortocircuito a tierra sin que se produzca una subida de tensión intolerable o tensiones de contacto.
- **Protección de los equipos y funcionalidad:** El sistema de puesta a tierra debe proteger los sistemas electrónicos, facilitando una ruta de evacuación de baja impedancia a los equipos interconectados. La canalización, ordenación y el apantallamiento adecuados de los cables constituyen aspectos muy importantes y sirven para evitar la producción de averías que podrían afectar al normal funcionamiento de los equipos electrónicos.

Para ello se usará el conductor eléctrico de cobre hasta un sistema en estrella compuesto por 3 varillas de copperwerld mallado con cable de cobre desnudo realizando las uniones de estos por medio de conectores especiales para sistemas a tierra que remplaza la soldadura exotérmica realizando una preparación del suelo usando tierra de cultivo y preparada con un elemento químico especial llamado cemento conductor fabricado especialmente para este tipo de aplicaciones.

Para realizar eficazmente un buen sistema de aterramiento se debe considerar los siguientes componentes principales:

- Resistencia de contacto entre el electrodo y la tierra. Si el electrodo es buen conductor de corriente y está desprovisto de agentes aislantes como grasas o pinturas, la corriente se descargará libremente y se disipará a través de la tierra en forma instantánea

Nota: Al realizar un sistema de tierra por medio de barras copperwerld, el electrodo deberá quedar instalado, por lo menos a 1,2 metros separado del poste o muro según sea el caso.

- Si el electrodo es conectado pegado al poste o al muro, no se produce una descarga de corriente eficazmente, dado que el poste o muro se comporta como un aislador, pues posee una alta resistividad, y no permite que la corriente se descargue a tierra.

La resistividad del propio terreno: Como se ha dicho anteriormente, la propia tierra presenta una resistividad muy heterogénea, y el valor final de la resistencia del sistema dependerá fundamentalmente de las características que tenga el propio terreno.

Por tanto podemos decir que la sección del conductor, la superficie de contacto y la resistividad del suelo, son los factores más importantes en la construcción de un buen aterramiento.

Las razones para tener un sistema aterrizado son:

- Proporcionar una impedancia suficientemente baja para facilitar la operación satisfactoria de las protecciones en condiciones de falla.
- Asegurar que seres vivos no queden expuestos a potenciales inseguros, en régimen permanente o en condiciones de falla.

- Mantener los voltajes del sistema dentro de límites razonables bajo condiciones de falla (tales como descarga atmosférica, ondas de maniobra o contacto inadvertido con sistemas de voltaje mayor), y asegurar que no se excedan los voltajes de ruptura dieléctrica de las aislaciones.
- Limitar el voltaje a tierra sobre materiales conductivos que circundan conductores o equipos eléctricos.

Debido a lo antes mencionado es que surge la necesidad de crear mejores sistemas de puesta a tierra y mejores instrumentos que midan las características del terreno y de los diferentes tipos de electrodos que hay para la conexión a tierra, así como las configuraciones de electrodos más usadas para la instalación de un sistema de puesta a tierra.

## **OBJETIVOS:**

### **GENERAL**

- Realizar la implementación del sistema de puesta a tierra en los equipos de la base de la torre 2 de la radio universitaria 98.5 MHz, ubicada en el cerro Huachichambo.

### **ESPECÍFICOS**

- Realizar el correcto tratamiento de la tierra y estructurar un sistema de descarga, capaz de evitar daños en los equipos en caso de una corriente transitoria peligrosa
- Brindar seguridad al personal que brinda el mantenimiento a los equipos de la radio.
- Proteger los equipos, instalaciones, garantizando estabilidad y correcta operación de los mismos.

## **d. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **d.1. CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES**

#### **d.1.1. Definiciones.**

Establecidas de acuerdo a las especificaciones IEEE Std 81-1983.

#### **d.1.2. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPAT)**

De manera general, para la física, se considera que el globo terráqueo en su totalidad tiene un potencial igual a cero (0 V); por lo tanto, la tierra en sí misma y cualquier conductor conectado a ella es llamado Tierra (ground); generalmente se representa con las siglas (GND o G). Un equivalente al término tierra es, MASA, pero este se utiliza cuando no se trata de una tierra verdadera, es decir, un chasis, un soporte metálico o un armazón.

La denominación "puesta a tierra" comprende toda la ligazón metálica directa, sin fusible ni protección alguna, de sección suficiente, entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo, o grupo de electrodos, enterrados en el suelo, con objeto de conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima del terreno no existan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falla o la de descarga de origen atmosférico.

La mayoría de los sistemas eléctricos necesitan ser aterrizados, por tal motivo esta práctica en función del tiempo ha continuado y se ha desarrollado progresivamente, de modo que tales conexiones a tierra se encuentran en casi todos los puntos del sistema eléctrico. Incluyéndose la estación generadora, las líneas de transmisión, los cables que distribuyen la energía eléctrica y los locales domiciliarios, comerciales e industriales en los cuales se utiliza.

En el transcurso de los últimos años, es visible un rápido desarrollo en lo referente a los sistemas eléctricos, tal es el punto que debemos estar conscientes en que debe existir un modelamiento de sistemas de puesta a tierra, motivo por el cual esto ha incrementado el interés, comprensión y aplicación del tema propiamente dicho, teniendo en cuenta al mismo tiempo que la actividad del diseño ha llegado a ser muy significativo debido a que las nuevas normas requieren diseños seguros, confiables y eficientes.

Es así que mediante el desarrollo de este proyecto se tendrá la oportunidad de explicar más claramente los conceptos que intervienen en lo que se refiere a puestas a tierra y

una necesidad de que estos conocimientos sean traspasados a los diseñadores e instaladores, de tal modo que pueda lograrse una mayor comprensión del tema en estudio.

La IEEE define como sistema de puesta a tierra a la conexión conductora, por medio de la cual un circuito o equipo eléctrico se conecta a tierra, o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de tierra.

Se entiende por puesta a tierra la unión eléctrica de un equipo o componente de un sistema eléctrico a tierra por medio de dispositivos que son conductores de electricidad adecuados. Es importante mencionar que el término normalizado para designar la resistencia ofrecida al paso de una corriente eléctrica hacia el suelo a través de una puesta a tierra es “Resistencia de Puesta a Tierra” (RPT).

Una puesta a tierra presenta resistencia, capacitancia e inductancia, cada cual influye en la capacidad de conducción de corriente a tierra. Por lo tanto, no se debe pensar solamente en una resistencia de puesta a tierra, sino más bien en una impedancia de puesta a tierra.

Para bajas frecuencias, corrientes y valores de resistividad del suelo no muy elevados, son despreciables los efectos capacitivos y de ionización del suelo y el mismo se comporta prácticamente como una resistencia. También hay que tener en cuenta que para el caso de altas frecuencias, es necesario considerar el efecto capacitivo, principalmente en suelos de altas resistividades. Las ondas tipo rayo sufren la oposición de la reactancia inductiva de las conexiones al penetrar el suelo propiamente dicho.

#### **d.1.3. PUESTA A TIERRA DE EQUIPOS**

Los materiales conductores (tuberías y gabinetes metálicos) que contienen conductores y equipos eléctricos se ponen a tierra para limitar el voltaje a tierra entre estos materiales (NEC 250-1, FPN No.2).

Los conductores de puesta a tierra de equipo se unen al conductor puesto a tierra para proporcionar una trayectoria de baja impedancia a la corriente de falla, lo que facilitará la operación de las protecciones de sobrecorriente bajo condiciones de falla a tierra. La puesta a tierra de equipos tiene dos propósitos: a.) limitar el voltaje de los materiales metálicos no portadores de corriente con respecto a tierra y b.), que en caso de falla a

tierra, opere la protección de sobrecorriente. Las figuras 1, a) y b) ilustran un alambrado correcto y la forma en que opera la protección de sobrecorriente evitando que el chasis se ponga a un voltaje peligroso. La figura 1 c) muestra la forma en que la falta de la puesta a tierra pone en riesgo la vida.

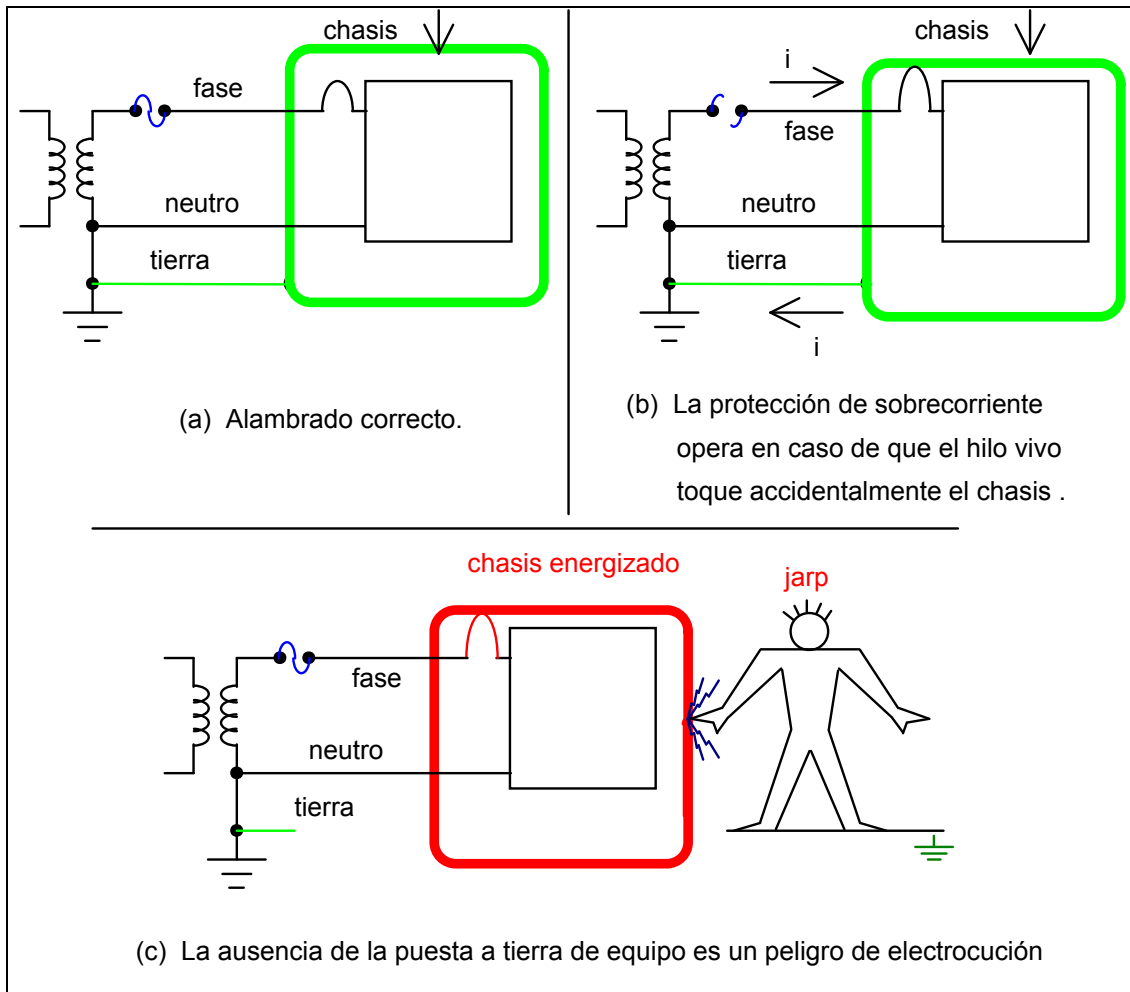


Figura .1: Puesta a tierra de equipos. (A. Llamas, 1995)

**d.1.3.1. Conductor de Puesta Tierra:** Se define de esta manera al conductor que es conectado sólidamente de manera intencional a una puesta a tierra, para conectar a tierra los diferentes puntos de una instalación.

**d.1.3.2. Resistividad del Suelo:** Mediante este término se define a la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, pudiendo ser también un estrato del suelo, se obtiene indirectamente mediante mediciones realizadas en un determinado

campo; su magnitud se expresa en (  $\Omega \cdot m$  ) u (  $\Omega \cdot cm$  ), es inversa a la conductividad. Entonces la resistividad eléctrica (  $\rho$  ) es la relación que se da entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo.

**d.1.3.3. Resistividad Aparente:** Se trata de la resistividad que se obtiene con una medida directa en el suelo natural, realizado por el método de cuatro electrodos, aplicando circuitos de tipo independientes, de corriente y potencial, siendo solo representativo para un punto del suelo.

**d.1.3.4. Resistencia mutua entre Electrodo:** Es aquel fenómeno resistivo que aparece entre electrodos de puesta a tierra o puntos próximos ubicados en el suelo, hay que tener en consideración que la corriente que se dispersa a través de uno de ellos, modifica el potencial del otro, su unidad de medida es el Ohmio (  $\Omega$  ).

**d.1.3.5. Potencial Eléctrico:** Se denomina así a la diferencia de voltaje existente entre un punto y alguna superficie equipotencial que generalmente es la superficie del suelo, la misma que es seleccionada arbitrariamente como potencial cero o tierra remota, entonces hay que conocer que el punto, el cual tiene un potencial más alto que el cero se llama potencial positivo y en caso contrario será denominado potencial negativo.

**d.1.3.6. Tierra Remota:** Conocida también como Tierra de Referencia, es el lugar, espacio o la zona de mínima resistencia, más cercana del suelo subyacente a una instalación eléctrica o a una puesta a tierra, respecto de las cuales se le atribuye por convención el valor del potencial cero.

#### **d.1.4. PARTES QUE COMPRENEN LAS PUESTAS A TIERRA**

Todo sistema de puesta a tierra constará de las siguientes partes:

- Tomas de tierra.
- Líneas principales de tierra.
- Derivaciones de las líneas principales de tierra.
- Conductores de protección.



El conjunto de conductores, así como sus derivaciones y empalmes, que forman las diferentes partes de las puestas a tierra, constituyen el circuito de puesta a tierra.

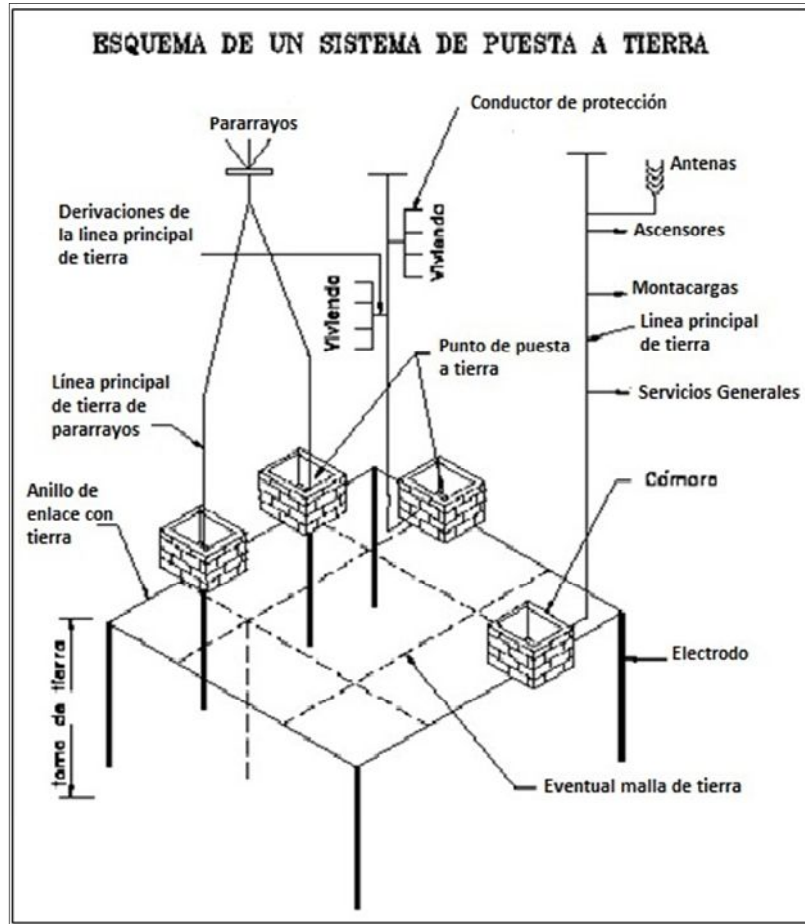


Figura. 2: Esquema de un Sistema de Puesta a Tierra. (M. Aguilar, 2010)

**d.1.4.1. Punto de Puesta a Tierra.-** Es un punto situado fuera del suelo que sirve de unión entre la línea de enlace con tierra y la línea principal a tierra.

**d.1.4.2. Electrodo.-** Es una masa metálica, permanentemente en contacto con el terreno, para facilitar el paso a éste de las corrientes de defecto que puedan presentarse o la carga eléctrica que tenga o pueda tener.

**d.1.4.3. Resistencia de Tierra circundante.-** Este en realidad es el componente que influye en el valor de la resistencia de una puesta a tierra y depende básicamente de la resistividad del suelo y de la conductividad que presenten los conductores y electrodos de la malla a tierra.

En caso de que se trate de una puesta a tierra simple con un solo electrodo, solo tendrá estos tres elementos; si se trata de una puesta a tierra con varios electrodos (Malla) se incluye un elemento adicional que es la línea de enlace con la tierra, que está formada por los conductores que unen el electrodo o conjunto de electrodos con el punto de puesta a tierra. El punto de puesta a tierra estará constituido por un dispositivo de Conexión (regleta, placa, borne, etc.) que permita la unión entre los conductores de las líneas de enlace y principal de tierra de forma que puedan agruparse, con el fin de poder realizar la medida de la resistencia de tierra.

(M. Aguilar, 2010).

## **d.2. CAPÍTULO II. OBJETIVOS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

Los objetivos de instalar la puesta a tierra en conductores eléctricos, materiales y partes de equipo que no deben transportar corrientes eléctricas indeseables en forma permanente son:

- Conducir a tierra todas las corrientes de fuga, producidas por una falla de aislamiento que haya energizado las carcasas de los equipos eléctricos.
- Evitar que en las carcasas metálicas de los equipos eléctricos aparezcan tensiones que resulten peligrosas para la vida humana.
- Permitir que la protección del circuito eléctrico (disyuntor magnético térmico), despeje la falla, en un tiempo no superior a 5 segundos.
- Limitar sobre tensiones debidas a descargas atmosféricas y fenómenos transitorios.
- Limitar la diferencia de potencial a tierra en un circuito, durante su operación normal. Elementos que conforman un sistema de puesta a tierra.

### **d.2.1. MÉTODOS DE PUESTA A TIERRA**

En el ámbito de la puesta a tierra el objetivo común es la búsqueda de la mayor seguridad posible.

En el terreno de la protección de personas, las normas son equivalentes, si se respetan todas las reglas de instalación y utilización. Dadas las características específicas de cada régimen, no puede hacerse una elección previa.

Para realizar el diseño de puestas a tierra es necesario conocer las diferentes técnicas, que se desarrollarán en función de todos los detalles de los puntos que siguen a continuación.

#### d.2.1.1. Sistema no aterrizado.

Este sistema no tiene una conexión a tierra formal, intencional o deliberada. Pueden existir algunas conexiones de alta impedancia para instrumentación, por ejemplo el bobinado de un instrumento de medida (transformador de potencial o de corriente). En condiciones normales, la capacidad entre cada fase y tierra es sustancialmente la misma. El efecto es estabilizar el sistema respecto a la tierra de modo que en un sistema trifásico, el voltaje de cada fase a tierra es el voltaje estrella del sistema. El punto neutro, si existe y está presente, está en, o cerca del potencial de tierra como se puede observar en la Figura 1.

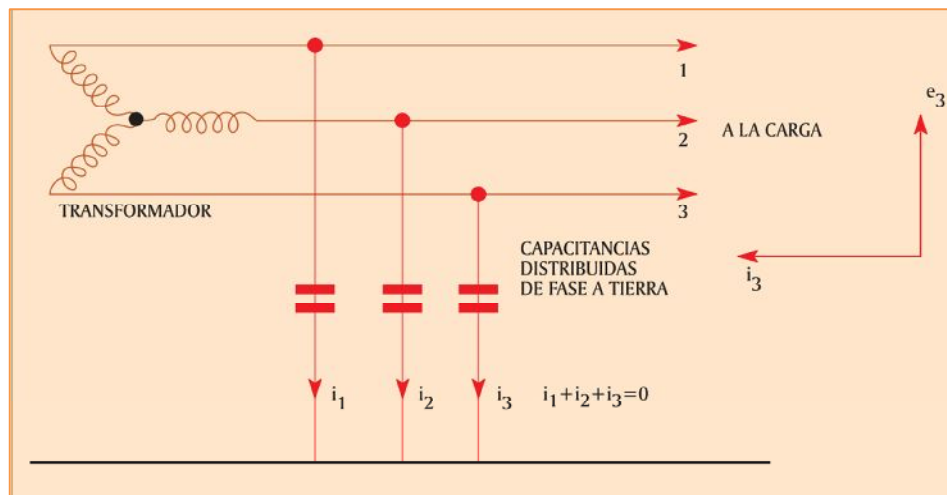


Figura. 3: Corrientes capacitivas en un sistema trifásico. (Pozo, 2011)

#### d.2.1.2. Sistema aterrizado.

Un sistema puesto a tierra tiene al menos un conductor o punto (usualmente el neutro o punto común de la estrella) intencionalmente conectado a tierra. Por condiciones prácticas y de costo, esta conexión se realiza normalmente cerca de donde se unen los 3 enrollados individuales de un transformador trifásico, es decir el neutro o punto común de la estrella. Este método se adapta cuando hay necesidad de conectar al sistema cargas fase neutro, para prevenir que el voltaje neutro a tierra varíe con la carga. La conexión a

tierra reduce las fluctuaciones de voltaje y los desequilibrios que podrían ocurrir de otra forma. Otra ventaja es que puede usarse relés residuales para detectar fallas antes que se conviertan en fallas fase-fase. Esto puede reducir el daño real causado y la solicitud impuesta en otras partes de la red eléctrica.

El tipo de puesta a tierra se clasifica según el tipo de conexión instalada. Los principales tipos son:

#### **d.2.1.2.1. Sistema aterrizado mediante impedancia.**

En este caso se insertan deliberadamente resistores y/o reactores en la conexión entre el punto neutro y tierra, normalmente para limitar la corriente de falla a un nivel aceptable. En teoría, la impedancia puede ser lo bastante alta como para que fluya una corriente de falla poco mayor que en la situación de sistema no puesto a tierra.

En la práctica, para evitar sobre voltajes transitorios excesivos debido a resonancia con la capacitancia paralela del sistema, las puestas a tierra inductivas deben permitir que fluya a tierra por falla al menos un 60% de la capacidad de cortocircuito trifásico. Esta forma de puesta a tierra tiene menor disipación de energía que la puesta a tierra resistiva.

Pueden usarse como conexión a tierra enrollados de supresión de arco, también conocida como bobinas de Peterson o neutralizadora de falla a tierra. Estos son reactores sintonizados que neutralizan el acoplamiento capacitivo de las fases sanas y de este modo la corriente de falla es mínima. Debido a la naturaleza auto compensada de este tipo de puesta a tierra, es efectiva en ciertas circunstancias en sistemas aéreos de media tensión, por ejemplo, aquellos que están expuestos a un alto número de fallas transitorias. El uso de interruptores con cierre automático ha reducido el uso de este método de puesta a tierra en sistemas de alta y media tensión.

La puesta a tierra por resistencia es de uso más común, porque permite limitar la corriente de falla y amortiguar los sobrevoltajes transitorios, eligiendo el valor correcto de resistencia. En principio se usó resistencias líquidas. Ahora es más común el uso de resistores del tipo cerámico. Estos requieren menos espacio, tienen costos de mantención significativamente menores y luego del paso de la corriente de falla se enfrían más rápidamente que las resistencias líquidas.

#### **d.2.1.2.2. Sistema aterrizado con baja impedancia.**

Esta es la técnica más común, particularmente en bajo voltaje. Aquí el neutro se conecta a tierra a través de una conexión adecuada en la cual no se agrega intencionalmente ninguna impedancia. La desventaja de este arreglo es que las corrientes de falla a tierra son normalmente altas pero los voltajes del sistema permanecen controlados bajo condiciones de falla.

(Armas. Pozo, 2011).

#### **d.2.2. TIPOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA**

De acuerdo a su aplicación los sistemas de puesta a tierra son:

- Puesta a tierra para sistemas eléctricos.
- Puesta a tierra de los equipos eléctricos.
- Puesta a tierra en señales electrónicas.
- Puesta a tierra de protección electrónica.
- Puesta a tierra de protección atmosférica.

##### **d.2.2.1. Puesta a tierra para sistemas eléctricos.**

Los sistemas eléctricos se conectan a tierra con el fin de limitar la tensión que pudiera aparecer en ellos, por estar expuestos a descargas atmosféricas, por interconexión en casos de fallas con sistemas de conexiones superiores, o bien, para limitar el potencial máximo con respecto a tierra, producto por la tensión nominal del sistema. Este tipo de conexión se denominará Tierra de Servicio.

Se conectarán a tierra los elementos de la instalación necesarios como ser:

- Los neutros de los transformadores, que lo precisan en instalaciones o redes con neutro a tierra de forma directa o a través de resistencias o bobinas.
- El neutro de los alternadores y otros aparatos equipos que lo precisen.
- Los circuitos de baja tensión de transformadores de medida.
- Los limitadores, descargadores, auto válvulas, pararrayos, para eliminación de sobretensiones o descargas atmosféricas.
- Los elementos de derivación a tierra de los seccionadores de puesta a tierra.

#### **d.2.2.2. Puesta a tierra de los equipos eléctricos.**

Su propósito es eliminar los potenciales de toque que pudieran poner en peligro la vida y las propiedades, de forma que operen las protecciones por sobre corriente de los equipos.

Utilizado para conectar a tierra todos los elementos de la instalación que en condiciones normales de operación no están sujetos a tensiones, pero que pueden tener diferencia de potencial con respecto a tierra a causa de fallas accidentales en los circuitos eléctricos, así como los puntos de la instalación eléctrica en los que es necesario establecer una conexión a tierra para dar mayor seguridad, mejor funcionamiento y regularidad en la operación y en fin, todos los elementos sujetos corrientes eléctricas importantes de corto circuito y sobretensiones en condiciones de falla.

Generalmente la resistencia a tierra en cualquier punto del sistema, no debe ser mayor a 10 Ohms. Para la conexión a tierra de los equipos, se instalan en los edificios, una barra de cobre electrolítico de dimensiones adecuadas, instaladas a unos 60 cm sobre el nivel de piso con una leyenda indicativa, que es de uso exclusivo para el sistema de fuerza en las concentraciones de tableros de cada piso.

#### **d.2.2.3. Puesta a tierra en señales electrónicas.**

Para evitar la contaminación con señales en frecuencia diferentes a la deseada. Se logran mediante blindajes de todo tipo conectados a una referencia cero o a tierra.

#### **d.2.2.4. Puesta a tierra de protección electrónica.**

Para evitar la destrucción de los elementos semiconductores por sobre voltajes, se colocan dispositivos de protección de forma de limitar los picos de sobre tensión conectados entre los conductores activos y tierra.

La puesta a tierra de los equipos electrónicos y de control, consta de una serie de electrodos instalados remotamente al edificio. En el interior se instala una barra de cobre electrolítico de dimensiones adecuadas montada a 2.60 metros sobre nivel de piso terminado con una leyenda indicativa, que es de uso exclusivo para el sistema de electrónica.

La resistencia a tierra máxima en este sistema debe ser de unos 2 Ohms, cuando no se alcanza la resistencia deseada, se instala algún elemento químico para reducir la resistividad del terreno y alcanzar así, la resistencia a tierra requerida.

#### **d.2.2.5. Puesta a tierra de protección atmosférica.**

Como su nombre lo indica, se destina para drenar a tierra las corrientes producidas por descargas atmosféricas (RAYOS) sin mayores daños a personas y propiedades. Se logra con una malla metálica igualadora de potencial conectada al planeta tierra que cubre los equipos o edificios a proteger o se conforma con electrodos tipo copperwerld y cable tipo pararrayos de cobre Clase 1 de 27 hilos.

La distancia del edificio con respecto al sitio donde se entierre el electrodo, no debe ser inferior a 2,50 metros y debe quedar totalmente aislado de los sistemas de tierras para fuerza y para electrónica.

La resistencia a tierra en cualquier punto del sistema, no debe ser mayor a 10 ohms, para lo cual en caso necesario, se implementarán arreglos de electrodos en Delta y/o un agregado de elementos químicos para reducir la resistividad del terreno, recomendados por el CEN en el artículo 250-83.

#### **d.2.3. La tierra de protección.**

Los equipos eléctricos se conectan a tierra para evitar que la carcasa o cubierta metálica de ellos represente un potencial respecto de tierra que pueda significar un peligro para el operario u usuario del equipo. Este tipo de conexión a tierra se denominará Tierra de Protección.

La posibilidad de que ciertas partes de una instalación, que normalmente están sin tensión, puede quedar con una tensión con respecto a la tierra por fallas de aislamiento, se debe evitar conectando todas las partes metálicas con las que pueda una persona entrar en contacto y que no debe estar normalmente con tensión.

Según la presente norma, se entiende por tierra de protección la puesta a tierra de toda pieza conductora que no forma parte del circuito, pero que en condiciones de falla puede quedar energizada.

Se pondrán a tierra las partes metálicas de una instalación que no estén en tensión normalmente pero que puedan estarlo a consecuencia de averías, accidentes, descargas atmosféricas o sobretensiones.

En todos los casos donde el conductor de puesta a tierra se encuentre en vías de circulación de personas u animales ajenas a la instalación deberá contar con protección mecánica, evitándose en lo posible el uso de tubos de material de buena permeabilidad magnética. Salvo se indique lo contrario, se pondrán a tierra los siguientes elementos:

- Los chasis y bastidores de aparatos de maniobra.
- Los envolventes de los conjuntos de armarios metálicos.
- Las puertas metálicas de los locales, las vallas y cercas metálicas.
- Las columnas, soportes y pórticos.
- Las estructuras y armaduras metálicas de los edificios que contengan instalaciones de alta tensión, los blindajes metálicos de los cables.
- Las tuberías y conductos metálicos.
- Las carcasas de transformadores, generadores, motores y otras máquinas.
- Hilos de guardia o cables de tierra de las líneas aéreas.

(Rojas, 2000).

### **d.3. CAPÍTULO III. CONDUCTORES DE TIERRA**

A continuación se explican las funciones más importantes de los conductores de tierra y se presentan algunas definiciones. Se describen los diferentes tipos de electrodos de tierra disponible; se usan generalmente los mismos tipos, ya sea si el sistema de puesta a tierra es para una casa, industria o central generadora.

#### **d.3.1. Conductores de conexión y conductores de protección.**

En las reglamentaciones se han planteado diversas definiciones para describir los diferentes tipos de conductores de tierra usados. Los tipos son:

##### **d.3.1.1. Conductor de protección de circuito.**

Este es un conductor separado instalado con cada circuito y está presente para asegurar que parte o toda la corriente de falla regrese a la fuente a través de él. Puede ser un conductor individual, la cubierta metálica exterior de un cable o la estructura de un ducto metálico.

##### **d.3.1.2. Conductores de conexión.**

Estos conductores aseguran que las partes conductivas expuestas (tales como carcasas



metálicas) permanezcan aproximadamente al mismo potencial durante condiciones de falla eléctrica. Las dos formas de conductores de conexión son:

#### **d.3.1.3. Conductores de conexión equipotencial principales.**

Conductores de conexión equipotencial principales, que conectan entre sí y a tierra, partes conductivas expuestas que normalmente no llevan corriente, pero podrían hacerlo bajo una condición de falla. Estas conexiones normalmente unen al sistema de puesta a tierra tuberías metálicas de gas y agua expuestas que ingresan a la instalación, estructura metálica del edificio y servicios principales. En el interior de instalaciones, estas conexiones deben ser de un cierto tamaño mínimo (al menos 6 mm<sup>2</sup>) y generalmente no necesitan ser mayor que 25 mm<sup>2</sup> en cobre.

#### **d.3.1.4. Conductores de conexión equipotencial suplementarios.**

Conductores de conexión suplementarios, son para asegurar que el equipo eléctrico y otros ítems de material conductivo en zonas específicas estén conectados entre sí y permanecen sustancialmente al mismo potencial. Se usan en adición a los conductores de conexión equipotencial principales y conductor de protección de circuito. En el interior de subestaciones eléctricas, los conductores de conexión y de tierra necesitan ser de tamaño suficiente ya que ellos pueden llevar una buena cantidad de corriente de falla hasta por tres segundos, sin daño. La tabla 1, muestra algunos de los más comunes tamaños de cinta usada tanto para conexiones como para electrodos enterrados. El nivel de corriente mostrado es aquél calculado de acuerdo a una temperatura ambiente de 30° Celsius, duración de falla de 3 segundos y temperaturas máximas de 375 °C y 295 °C para el cobre y el aluminio respectivamente.

Se aplica una formulación diferente de acuerdo a la situación, de modo que siempre debiera consultarse las normas antes de asignar un nivel de corriente. También debiera hacerse alguna estimación respecto de pérdida de material por corrosión a lo largo de la vida de la instalación.

**Tabla 1: Tamaños de cinta usada tanto para conexiones como para electrodos enterrados.**

<b>Máxima corriente kA</b>	<b>Sección de cinta (mm) Cobre</b>	<b>Sección de Cinta (mm) Aluminio</b>
12,0	4 x 25	4 x 40
18,0	5 4 x 40	6 x 40
22,0	4 x 50	6 x 50

Fuente: (PROCOBRE, 2014)

Para conductores de conexión, es esencial que el tamaño escogido del conductor sea capaz de llevar el valor total de la corriente de falla estimada. Si ocurre una falla, la totalidad de la corriente de falla puede fluir a través del conductor de tierra hacia el sistema de electrodos enterrados. Al llegar ahí se diversificará entre los electrodos, por lo tanto, éstos pueden a menudo tener una sección menor que el conductor de conexión o de tierra principal.

### **d.3.2. ELECTRODOS DE TIERRA**

El electrodo de tierra es el componente del sistema de puesta a tierra que está en contacto directo con el terreno y así proporciona un medio para botar o recoger cualquier tipo de corrientes de fuga a tierra. En sistemas puestos a tierra se requerirá normalmente llevar una corriente de falla bastante grande por un corto período de tiempo y en consecuencia se necesitará tener una sección suficientemente grande como para ser capaz de llevar esta corriente en forma segura. Los electrodos deben tener propiedades mecánicas y eléctricas adecuadas para continuar respondiendo las solicitaciones durante un periodo de tiempo relativamente largo, en el cual es difícil efectuar ensayos reales o inspección. El material debe tener buena conductividad eléctrica y no corroerse dentro de un amplio rango de condiciones de suelo. Los materiales usados incluyen cobre, acero galvanizado, acero inoxidable y fierro fundido. El cobre generalmente es el material preferido por las razones que se describirán posteriormente. El aluminio se usa algunas veces para conexiones fuera del terreno, pero la mayoría de los estándares prohíben su uso como electrodo de tierra debido al riesgo de corrosión acelerada. El producto corrosivo -una capa de óxido- deja de ser conductivo y reduce la efectividad de la puesta a tierra.

El electrodo puede tomar diversas formas: barras verticales, placas y conductores horizontales. Las formas más comunes se describen a continuación:

#### **d.3.2.1. Barras.**

Esta es la forma más común de electrodos, porque su costo de instalación es relativamente barato y pueden usarse para alcanzar en profundidad, suelo de baja resistividad, sólo con excavación limitada y relleno. Están disponibles en diversos tamaños, longitudes, diámetros y materiales. La barra es de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios

mecánicos (impacto) ya que el acero usado tiene alta resistencia mecánica. La capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente. Esto último asegura que el cobre no se deslice al enterrar la barra. En condiciones de suelo más agresivo por ejemplo cuando hay alto contenido de sal, se usan barras de cobre sólido. Barras de acero inoxidable son más anódicas que el cobre y se usan ante riesgo de corrosión galvánica. Sin embargo, debe considerarse el hecho que el acero inoxidable tiene baja capacidad de transporte de corriente en comparación con el cobre.

En cada extremo de la barra hay sectores tratados que permiten disponer de un extremo aguzado, un extremo con una cabeza endurecida o con hilo para atornillar barras adicionales. Es importante en el caso de barras recubiertas, que la capa de cobre se mantenga intacta en la sección fileteada (con hilo). Algunos fabricantes también tienen una barra taladradora de cabeza de cruz, que es particularmente útil si los acoplamientos de barra tienen un diámetro mayor que la barra. Se asegura que este tipo de cabeza permite enterrar hasta mayor profundidad. Las barras están disponibles en diámetros de 15 mm a 20 mm (cobre sólido) y 9,5 a 20 mm (acero recubierto de cobre). Las barras individuales tienen longitudes de 1, 2 a 3 metros.

También se dispone de secciones apantalladas de barra para uso, por ejemplo, cuando hay una capa de suelo altamente corrosivo, a través de la cual debe atravesar una barra profunda. La pantalla debe ser por ejemplo de PVC para prevenir contacto entre la barra y el suelo corrosivo. Por supuesto esta sección no contribuye a reducir el valor de impedancia puesto que no está en contacto con el suelo.

#### **d.3.2.2. Placas.**

Se usa varios tipos de placas para propósitos de puesta a tierra, pero el único tipo que se considera generalmente como electrodo debe ser sólido y de tamaño sustancial. Las placas tipo enrejado, como se ilustra en la Figura 4-1, se usan para graduar potenciales y no se espera que permitan el paso de niveles de corriente de falla significativos. Se hacen normalmente de una malla de cobre o de acero.

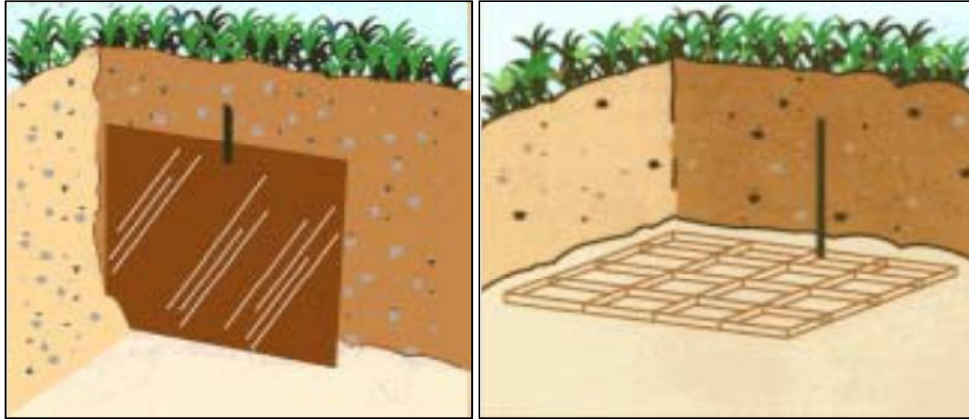


Figura .4: Placas de tierra. (PROCOBRE, 2014)

Los electrodos de placa son de cobre o de fierro fundido. Las planchas de fierro fundido tienen un mínimo de 12mm de espesor y son cuadradas de 915 ó 1220 mm por lado. Las planchas de cobre son típicamente cuadradas de 600 mm ó 900 mm de lado y entre 1,6 mm y 3mm de espesor. Cuando se usan varias planchas, deben instalarse a cierta distancia para prevenir una interacción. Esta distancia es mínimo de 2 m extendiéndose hasta 9 m.

#### **d.3.2.3. Electrodo horizontales.**

Están hechos de cintas de cobre de alta conductividad o conductores retorcidos (cables). La cinta es el material más conveniente pues para una sección dada de material presenta una mayor superficie y se considera que tiene un comportamiento mejor a alta frecuencia, debido a la capacitancia levemente mayor a tierra. Puede ser más difícil de conectar (por ejemplo a barras verticales), de modo que puede significar un costo de instalación levemente mayor.

Para reducir costos globales, la cinta se puede usar para los electrodos que llevarán la mayor corriente (por ejemplo electrodos del perímetro y conexiones principales a los equipos) mientras que el conductor retorcido puede usarse en otra parte. La cinta que se instala bajo tierra es totalmente recocida de modo que puede ser plegada fácilmente. Para conexiones exteriores al terreno están disponibles cinta cubierta de PVC, conductores sólidos o retorcidos.

También se dispone de cinta de cobre cubierta de plomo o estaño para aplicaciones especiales.

#### **d.3.2.4. Electrodo secundarios.**

Existen algunos tipos interesantes de electrodos secundarios, cuyo propósito es mejorar el comportamiento de un electrodo de tierra. Ellos incluyen pozos de tierra y embalses de terreno. Un pozo de tierra puede comprender varias tuberías largas enterradas verticalmente en el suelo. Están conectadas entre sí y rodeadas por un material de baja resistividad.

Un embalse de tierra es típicamente una cavidad en una ubicación donde se pueda mantener la humedad, que está llena con desechos metálicos y otro material conductivo. Un ejemplo de electrodo secundario consiste de un tubo de cobre de 50 mm de diámetro, disponible en longitudes de hasta 6 metros. El cañón interior se llena parcialmente con sales metálicas en bruto y los extremos superior e inferior del tubo se sellan con tapas. Se perfora el tubo en la parte superior para ventilación y también para drenaje en la parte inferior. El material de relleno recomendado es Bentonita.

El dispositivo funciona del siguiente modo:

Producto de los cambios en la presión atmosférica y del movimiento natural del aire, se bombea aire a través de los huecos de ventilación en la parte superior del tubo. La humedad existente en el aire absorbido entra en contacto con la sal y se forman gotas de agua vía un proceso higroscópico. Al acumularse la humedad, se forma una solución electrolítica que escurre hacia la parte inferior del tubo.

Con el tiempo se forma suficiente electrolito el cual fluye a través de las perforaciones inferiores de drenaje hacia el suelo circundante, mediante osmosis. De este modo, el electrolito forma «raíces» en el terreno que lo rodea, las cuales ayudan a mantener su impedancia en un nivel bajo.

(PROCOBRE, 2014).

#### **d.3.3. MÉTODOS DE INSTALACIÓN**

Cuando se instalan electrodos de tierra, se deben satisfacer tres condiciones:

El trabajo debe ser realizado eficientemente para minimizar costos de instalación.

El terreno o material de relleno usado no debe tener un índice de acidez pH que cause corrosión al electrodo. Todas las uniones o conexiones bajo tierra deben ser construidas de modo que no se presente corrosión en la unión o conexión.

El método de instalación, relleno y conexiones que se detalla en los siguientes párrafos dependerá del tipo de sistema de electrodos que se usará y de las condiciones del terreno. Donde se pueda, debiera hacerse uso de trabajo de excavaciones comunes. Invariantemente se necesitará apoyo mecánico y herramientas manuales para apoyar la instalación.

#### **d.3.3.1. Barras.**

Las barras generalmente ofrecen la forma más conveniente y económica de instalar un electrodo. A menudo se requiere modificar poca superficie (tal como romper superficies de concreto), pero por supuesto es necesario inspeccionar para asegurarse que no hay equipo o instalaciones enterradas -tales como tuberías de agua o gas- que puedan ser dañadas al enterrar las barras. Los métodos de instalación incluyen accionamiento manual, accionamiento mecánico y perforadora. Las barras cortas (típicamente hasta 3 metros de largo) se instalan a menudo empleando un martillo pesado (combo) operado manualmente. Los golpes relativamente cortos y frecuentes son más efectivos normalmente.

Las barras están acondicionadas con una cabeza endurecida y una punta de acero para asegurar que la barra misma no se dañe durante el proceso.

Las barras más largas se manejan en forma similar, pero usando un martillo neumático que requiere mucho menos esfuerzo físico y proporciona una inercia directa mayor. Se usan también exitosamente para este propósito herramientas eléctricas, a petróleo, hidráulicas de aceite o aire. Debido a su peso, estas herramientas algunas veces requieren de un aparejo para sostenerlas. Un martillo eléctrico típico podría tener un consumo de 500 Watts y proporcionar aproximadamente 1500 golpes por minuto. Es posible enterrar barras hasta una profundidad de 10 metros o más usando este método, dependiendo por supuesto de las condiciones reales del suelo. Se ha informado también que barras hasta 30 metros han sido instaladas de esta manera pero no se sabe cuán derechas quedaron. Se sabe que algunas veces se doblan y quiebran a cierta profundidad. El tiempo que demora instalar la barra varía con el tipo de suelo. Por ejemplo, en arena o gravilla suelta, la tasa de penetración de una barra de 11 mm de diámetro puede ser 3,5 metros por minuto, pero ésta cae a 0,5 metros por minuto en arcilla firme.

El diámetro de la barra es el principal factor que incide en el esfuerzo necesario para instalarla. Las barras delgadas (9mm de diámetro) se instalan relativamente fáciles, pero a medida que la longitud de la barra aumenta, el diámetro de la barra debe incrementarse para asegurar que la barra tenga suficiente resistencia mecánica-particularmente en los puntos de unión. Al doblar el diámetro de la barra de 12 mm a 24 mm, aumenta la resistencia mecánica para impacto en más de tres veces. Cuando las barras tienen que ser muy profundas, normalmente son soldadas o acopladas mecánicamente. El acoplamiento debe ser tal que el diámetro de la barra no se incremente significativamente, de otro modo la instalación se dificultará y al penetrar la unión se producirá un espacio con un diámetro mayor que el de la barra. El acoplamiento debiera también apantallar la sección tratada para ayudar a prevenir la corrosión.

Las barras de acero recubiertas de cobre son significativamente más resistentes que las barras de cobre sólido, las cuales se doblan muy fácilmente y pueden quebrarse cuando se intenta introducirlas en el suelo rocoso.

Cuando se requiere barras más profundas o en condiciones de suelo difícil donde hay roca subyacente la forma más efectiva es taladrar una perforación estrecha en la cual se instala el electrodo de barra con material de relleno adecuado. Este método es a menudo sorprendentemente económico, ya que puede realizarse un número significativo de perforaciones profundas en un día usando equipo de bajo costo. Las barras pueden instalarse en forma rutinaria a profundidades de hasta 20 metros y con equipo más especializado a una profundidad significativamente mayor. Además de las ventajas de obtener una gran profundidad y una trayectoria más controlada del electrodo, otro beneficio es que de esta manera puede instalarse electrodos de cobre sólido relativamente delgados.

Debido a que la barra de cobre sólido tiene una mejor conductividad que la barra recubierta de cobre, esto mejora aún más el beneficio obtenido por el uso de barras largas. Si se entierran mecánicamente a dicha profundidad, las barras necesitarían ser de mayor diámetro y puede ser necesaria una barra de acero recubierta de cobre para proveer la resistencia mecánica adecuada. En el pasado se usaron varias formas diferentes de sección, tales como sección transversal en forma de estrella, para incrementar la resistencia de la barra y hacer menos probable que se doblara en suelo

rocoso. Sin embargo, no están disponibles ahora. La forma diferente sólo tiene un efecto marginal sobre la resistencia eléctrica obtenida, pero podría requerir menos material para la misma área superficial. Las barras verticales largas pueden proporcionar una solución económica en muchas situaciones.

Existe también equipo disponible que usa conductor de cobre retorcido enterrado en profundidad para provocar un efecto similar al de una barra convencional, pero evita uniones mecánicas. Una barra de acero se entierra, arrastrando el conductor retorcido detrás de ella. Con el tiempo, el acero probablemente se corroa, dejando sólo al conductor de cobre como electrodo permanente.

#### **d.3.3.2. Planchas.**

Originalmente, a comienzos de siglo, las planchas eran tan comunes que a todos los electrodos de tierra se les llamaba planchas de tierra. Cuando se incrementó el uso de la electricidad, las planchas debieron manejar corrientes mayores, lo cual significó aumentar las dimensiones de la plancha. Su uso continuó por un tiempo considerable, principalmente debido a la costumbre y la práctica, a pesar de que tenían algunas desventajas. Por ejemplo, generalmente requieren excavación manual o mecánica y, por lo tanto, el costo de instalación puede ser muy alto. Para reducir la magnitud de la excavación requerida, las planchas se instalan normalmente en un plano vertical, desde aproximadamente 0,5 metros bajo la superficie. Es fácil compactar el terreno contra la plancha cuando se rellena, si está instalada verticalmente. Otra desventaja se debe a la ubicación escogida para las planchas de tierra. A menudo se ubicaban demasiado próximas entre sí y sus zonas de influencia se traslapaban. Esto aumenta la resistencia combinada a un valor mayor que el esperado. Si las planchas tienen que llevar una cantidad importante de corriente entonces su resistencia necesita ser de bajo valor. En la práctica, las resistencias combinadas no eran aún lo suficientemente bajas y las corrientes de falla generalmente seguían otras rutas. Por lo tanto, en esta situación no se cumplía la mejor densidad de corriente, señalada como una ventaja para las planchas. Usualmente podía lograrse un arreglo mejor usando barras y electrodos horizontales.

Debido al costo de instalación relativamente alto, poco se justifica usar planchas ahora y las existentes, cuando se detecta deterioro, son reemplazadas normalmente por una agrupación de barras.



#### **d.3.3.3. Electrodo horizontales.**

Los electrodos horizontales pueden ser instalados en surcos directamente en el terreno o más frecuentemente en zanjas de hasta un metro de profundidad. El uso de equipo de excavación mecánica de pala angosta puede resultar en costos de instalación menores, en sitios donde esto es posible. La profundidad de instalación tiene normalmente un mínimo de 0,5 metros y más si es necesario pasar bajo nivel de cultivo o de escarcha en zonas heladas.

En muchos proyectos grandes toda el área puede ser excavada para permitir obras civiles. Esto presenta a menudo una buena oportunidad para minimizar costos tendiendo el conductor del electrodo de tierra en ese momento.

Debe tenerse cuidado de prevenir daño o robo del conductor, una vez tendido.

(\*) Nota: En algunos países está permitida la conexión de tuberías metálicas de agua a la puesta a tierra de la instalación, o más aún, estas tuberías constituyen el electrodo de puesta a tierra.

#### **d.3.3.4. Relleno.**

En todos los casos el material de relleno debe ser no-corrosivo, de un tamaño de partícula relativamente pequeño y si fuera posible, que ayude a retener la humedad. Muy a menudo, el material previamente excavado es apropiado como relleno, pero debiera ser arenado para remover piedras antes de rellenar, asegurándose de que quede bien compactado. La arcilla dura no es un material de relleno conveniente ya que si es fuertemente compactada, puede llegar a ser casi impermeable al agua y podría permanecer relativamente seca. También puede formar grandes terrones que no se afianzan alrededor del conductor.

Los materiales que no debieran ser usados como relleno incluyen arena, polvo de coque, ceniza, muchos de los cuales son ácidos y corrosivos. En algunas circunstancias, se requiere materiales de relleno especiales.

#### **d.3.4. Conexiones.**

Los electrodos de tierra tienen que ser conectados entre sí de alguna manera y es normal que sea vía cobre desnudo si es posible, ya que esto ayudará a reducir el valor de impedancia global. Las conexiones entre los diferentes componentes deben ser mecánicamente robustas, tener buena resistencia a la corrosión y baja resistividad eléctrica. Es prudente evitar uniones y conexiones innecesarias. Debe considerarse el valor de corriente de falla y la duración de la falla que se espera que soporte el sistema de tierra. Varios estándares indican especificaciones para los materiales que son

mínimos aceptables, por ejemplo, establecen que las coplas para barras de cobre necesitan un contenido mínimo de cobre de 80%. A continuación se explican en más detalle los métodos de unión que se emplean, incluyendo métodos mecánicos, bronceados (soldadura en fuerte), soldadura exotérmica y soldados por fusión autógena.

#### **d.3.4.1. Conexiones mecánicas.**

Se usan comúnmente y pueden ser mecánicas (conexión apernada) o hidráulicas (compresión). Los conectores deben satisfacer los requerimientos de los estándares aplicables. El proceso de probar el cumplimiento de las normas involucra habitualmente una serie de pruebas de vida durante las cuales el conector es sometido a impactos mecánicos, eléctricos y térmicos. En consecuencia son factores importantes el diseño, tamaño y material usado –particularmente ya que tales conectores pueden permanecer invisibles en el terreno por cierto número de años, antes de que sean solicitados para operar. Es esencial una conexión eléctrica de baja resistencia, especialmente en sistemas de electrodos del tipo radial. Durante la mantención, se han descubierto conexiones con resistencia de más de 20 ohms, claramente esto perjudica el comportamiento del sistema de electrodos.

Cuando se apernan entre sí cintas de cobre, debe tenerse cuidado con el tamaño de las perforaciones efectuadas para acomodar el perno. Si son demasiado grandes, la capacidad de transporte de corriente de la cinta se perjudicará.

Por esta razón, los estándares y reglamentos de práctica normalmente limitan el diámetro de la perforación a un tercio del ancho de la cinta o menos.

Cuando se apernan metales diferentes (por ejemplo cintas de cobre y aluminio), las superficies deben ser minuciosamente limpiadas y protegidas por un inhibidor de óxido. Una vez efectuada la conexión, el exterior debe ser cubierto por pintura bituminosa u algún otro medio para proteger contra el ingreso de humedad. Cuando se une cobre y aluminio, el cobre primero debe ser estañado. Una unión apernada de este tipo es actualmente el método recomendado preferentemente en los estándares para conectar metales diferentes, en el caso de instalaciones exteriores y en subestaciones eléctricas. Estas conexiones deben estar a una mínima distancia sobre tierra y no pueden ser enterradas.

Para unir distintos tipos de conductores, por ejemplo, barras de tierra a cinta o a cable, se dispone de abrazaderas apropiadas. Estas deben tener un alto contenido de cobre. No deben usarse bandas metálicas.

En alguna oportunidad se usó uniones de tipo estañado y remachado. La cinta de cobre se perforaba, luego era estañada y remachada. Sin embargo, los remaches algunas veces se rompen y sueltan debido a vibración, etc. Este método de unión claramente no es recomendado para tratar los altos valores de corriente de falla encontrados ahora.

#### **d.3.4.2. Conexiones bronceadas (soldadas en fuerte).**

La conexión bronceada se aplica ampliamente al cobre y aleaciones de cobre. Este método tiene la ventaja de proporcionar una baja resistencia de unión la cual no se corroe. Actualmente, es el método preferido descrito por los estándares para conectar cintas de cobre en el interior de subestaciones. Sin embargo, es esencial que el bronceado sea efectivo. Puede ser difícil hacer una buena unión en terreno, particularmente donde están involucradas grandes áreas de sección transversal. Son esenciales las superficies planas limpias pues los materiales de bronceado generalmente no fluyen como la soldadura. Existe así la posibilidad de conexiones adecuadas sólo en los puntos de contacto, pero con vacíos importantes que quedan sin llenar. Para este trabajo es esencial una buena fuente de calor, particularmente para conectores grandes.

#### **d.3.4.3. Uniones exotérmicas.**

Estas uniones se realizan mediante un molde de grafito que se diseña para ajustar el tipo específico de unión y el tamaño de los conductores. Usando una pistola con pedernal se enciende una mezcla de polvo de aluminio y de óxido de cobre y la reacción que se crea forma una unión de cobre virtualmente puro en torno a los conductores. La reacción de alta temperatura se produce en el interior del molde de grafito. Si se ocupa y mantiene adecuadamente, cada molde puede usarse para realizar entre 50 y 70 uniones. Este tipo de unión asegura los siguientes beneficios:

- Proporciona una unión permanente, de baja resistencia eléctrica y resistente a la corrosión.
- La técnica empleada no requiere adiestramiento, relativamente.
- Puede operar a alta temperatura, permitiendo eventualmente reducir el calibre del conductor.

Este tipo de unión actualmente no es siempre permitida para conectar cobre y aluminio en subestaciones. Los metales que pueden conectarse son acero inoxidable, bronce, cobre, acero con recubierta de cobre, acero galvanizado, bronce y riel de acero. Hay algunos aspectos de seguridad involucrados con este tipo de unión, pero la técnica se ha desarrollado rápidamente para controlarlos, por ejemplo, reduciendo la emisión de gas.

#### **d.3.4.4. Conexiones soldadas en forma autógena.**

El cobre puede unirse por soldadura de bronce o soldadura al arco en presencia de gas. La técnica de unión por soldadura de bronce es efectiva y de bajo costo, empleada primariamente para realizar uniones en terreno (por ejemplo en trabajos con tuberías de cobre). En esta técnica clásica, se usa bronce como metal de relleno para formar un enlace superficial entre las partes de cobre. La técnica emplea alta temperatura y un material de relleno que es el que más se ajusta al cobre. A pesar de que la soldadura de bronce puede usarse para conectar cobre a metales ferrosos, esto normalmente no se cumple para puestas a tierra.

Cuando necesita unirse componentes de cobre de mayor medida, entonces se usa soldadura autógena en ambiente gaseoso. El arco eléctrico proporciona el calor, mientras que el área en torno al electrodo y la soldadura es envuelta por un gas tal como argón, helio o nitrógeno. Esto reduce la oxidación que toma lugar durante el proceso de soldadura.

El nitrógeno se usa ampliamente como el «gas inerte» cuando se suelda cobre. Se requieren materiales de relleno especialmente desarrollados, que son reconocidos por su buen comportamiento al soldar cobre. El aluminio puede ser soldado vía arco de gas inerte de tungsteno o arco de gas inerte de metal. La soldadura en frío a presión se usa algunas veces para unión entre aluminio.

(Villacres, 2011)

#### **d.3.5. COMPORTAMIENTO DE ELECTRODOS DE TIERRA**

El diseñador de un sistema de puesta a tierra se enfrenta normalmente con dos tareas:

- Lograr un valor requerido de impedancia.
- Asegurar que los voltajes de paso y contacto sean satisfactorios.

En la mayoría de los casos habrá necesidad de reducir estos valores. Inicialmente, el diseñador debe concentrarse en obtener un cierto valor de impedancia. Este valor puede

haber sido definido por consideraciones de protección. Los factores que influyen en la impedancia son:

- Las dimensiones físicas y atributos del sistema de electrodos de tierra.
- Las condiciones del suelo (composición, contenido de agua, etc.).

El sistema de puesta a tierra consiste en un material conductor fuera del terreno (conductores de conexión, etc.), electrodos metálicos enterrados y el terreno mismo. Cada uno de estos componentes contribuye al valor de impedancia total. Nos referiremos en primer lugar a las componentes metálicas del sistema de puesta a tierra y al final del capítulo se discutirá la situación del terreno. Sin embargo, es importante reconocer que las características del terreno afectan fuertemente el comportamiento del sistema de puesta a tierra. La característica más importante del terreno es su resistividad, que se mide en ohm-metro.

El capítulo previo trata de las conexiones. Las resistencias de contacto en las conexiones y en las interfaces entre materiales claramente deben mantenerse prácticamente en un mínimo. Además, el metal usado para las conexiones sobre tierra debe tener buena conductividad eléctrica y la propiedad superior del cobre determina su uso en la mayoría de las instalaciones. El sistema de electrodos metálicos presentará una impedancia al flujo de corriente que consiste de tres partes principales. Estas son la resistividad del material del electrodo, la resistividad de contacto entre el electrodo y el terreno y finalmente una resistividad dependiente de las características del terreno mismo.

La impedancia metálica del electrodo es usualmente pequeña y consiste de la impedancia lineal de las barras y/o conductores horizontales. Influyen sobre ella las propiedades del metal usado y la sección transversal. En términos eléctricos, el cobre es superior al acero y por tanto ha sido tradicionalmente el material preferido.

#### **d.3.5.1. Efecto de la forma, tamaño y posición del electrodo.**

Una parte dominante de la impedancia se debe a la orientación física de los electrodos de tierra. Los gráficos de la Figura 5 a la Figura 10 ilustran el efecto que pueden tener los cambios en estas dimensiones sobre la impedancia y capacita al diseñador para estimar el mérito relativo de cada opción. Esto se discute con más detalle a continuación:

#### d.3.5.1.1. Incremento de la profundidad de enterramiento de una barra vertical en suelo uniforme.

La Figura 5 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando la longitud de la barra enterrada. También muestra que el mejoramiento por unidad de longitud disminuye a medida que la barra aumenta. Sin embargo, el gráfico que ilustra el comportamiento en suelo uniforme no cuenta la historia completa. El decrecimiento en resistencia obtenido mediante una barra larga puede ser particularmente deseable en condiciones de suelo no uniforme. La Figura 6 demuestra el mejoramiento posible en la resistencia de electrodo cuando se incrementa la longitud de una barra en un suelo que consiste de tres capas. Las capas superiores son de resistividad relativamente alta hasta una profundidad de seis metros. La resistencia de la barra es alta hasta que su longitud supera estas capas, debido a la alta resistividad del suelo que la rodea.

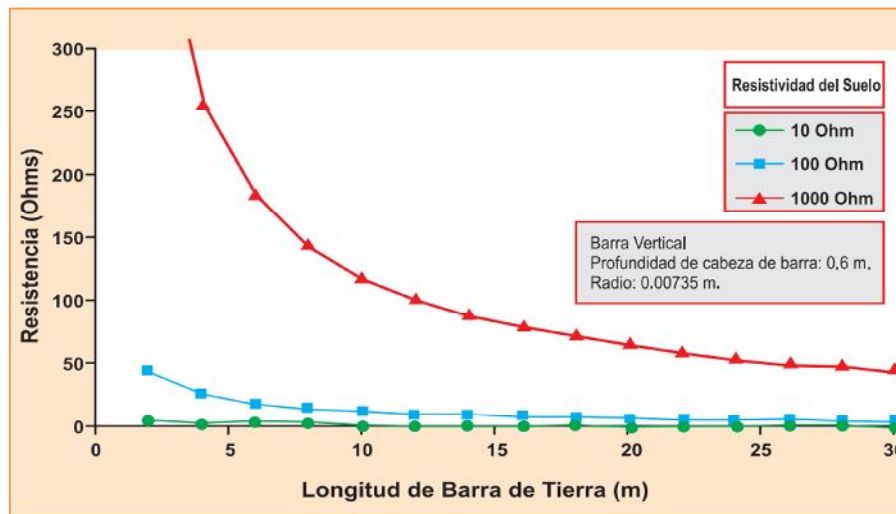


Figura .5: Resistencia vs Longitud de barra. (Gómez, 2010)

A medida que la longitud de la barra aumenta, la resistencia total baja más rápido. Esto se debe a la capa más profunda con mejores propiedades eléctricas. En este caso es clara la mejoría de comportamiento con cada metro adicional de barra instalada, mucho mayor a esta profundidad que para barra en suelo uniforme. Una vez que la barra alcanza aproximadamente 15 metros de longitud, hay poca diferencia en la resistencia de una barra en esta estructura de suelo, comparada con otra en un suelo uniforme de 50 ohm- metro de resistividad. Sin embargo, el mejoramiento por unidad

con cada metro adicional instalado comienza a reducirse rápidamente en el caso de que se tenga un suelo uniforme. En condiciones de suelo como los que se ilustra en la Figura 6, es importante que la sección superior de la barra tenga baja resistencia longitudinal ya que esta sección proporciona la conexión a la parte inferior del electrodo que lo mejora. Esto puede realizarse ya sea usando un sector superior de cobre sólido o plateado (con recubrimiento metálico) con una sección transversal incrementada. En algunas condiciones de terreno, particularmente donde existe un área disponible limitada, el empleo de barras verticales puede ser la opción más efectiva, pero depende de la estructura del terreno.

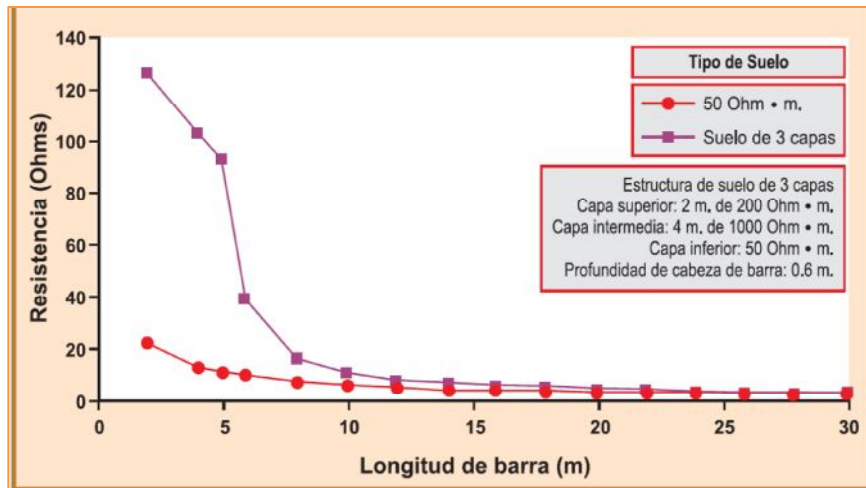


Figura .6: Resistencia vs Longitud de barra en suelo estratificado. (Gómez, 2010)

Es importante notar que las barras verticales otorgan un grado de estabilidad a la impedancia del sistema de puesta a tierra. Normalmente deben ser de longitud suficiente de modo que estén en o cerca de capas de agua (si existen a profundidad razonable en el lugar) y bajo la línea de congelamiento. Esto significa que la impedancia sería menos influenciada por variaciones estacionales en el contenido de humedad y en la temperatura del suelo.

#### d.3.5.1.2. Incremento de longitud de un conductor horizontal.

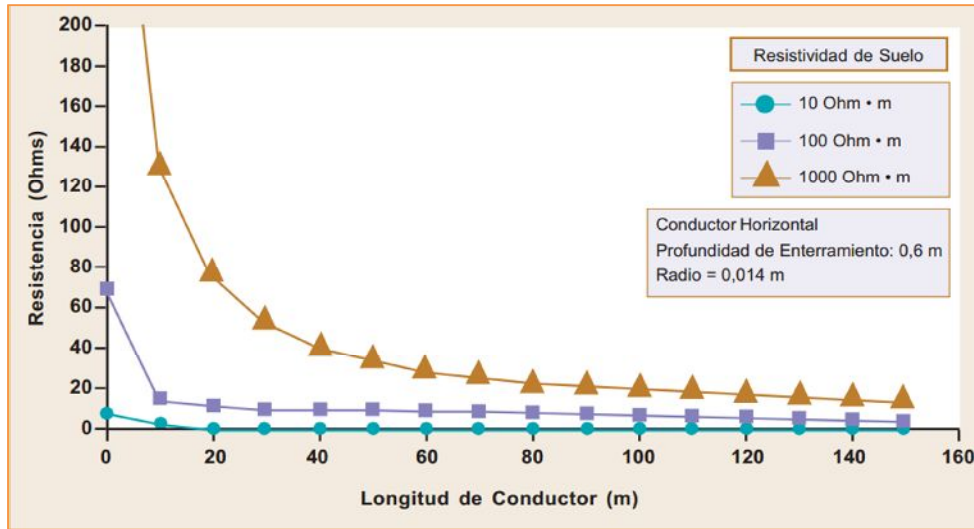


Figura .7: Resistencia vs Longitud del conductor horizontal. (Gómez, 2010)

En la Figura 7 se muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad, incrementando la longitud de un electrodo de tierra tendido horizontalmente a una profundidad de 0,6 metros.

Debe notarse que el cálculo en este ejemplo no considera la impedancia lineal del conductor, de modo que los valores son optimistas en el caso de grandes longitudes. Normalmente, el mejoramiento por unidad de longitud disminuye a medida que la longitud del electrodo aumenta. Una cinta tendida horizontalmente se considera generalmente una buena opción, particularmente cuando es posible encaminarla en diferentes direcciones. Esto incrementa aún más la posible reducción, pero sin lograr superar un 50% para aplicaciones en alta frecuencia, incrementar de esta manera el número de caminos disponibles reduce significativamente la impedancia de onda.



**d.3.5.1.3. Incremento de la longitud del lado de una plancha o malla de tierra cuadrada.**

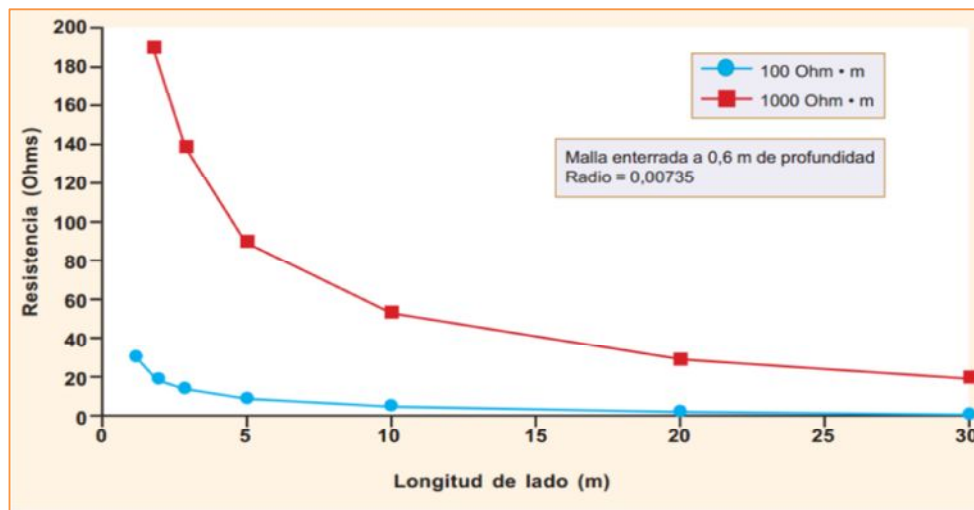


Figura .8: Resistencia vs Longitud del lado de malla cuadrada. (Gómez, 2010)

Se puede observar en la Figura 8 el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando el área abarcada por un electrodo cuadrado.

A pesar de mostrar que el mejoramiento por unidad de área disminuye, la reducción en resistencia resulta aún significativa. En realidad ésta es frecuentemente la forma más efectiva para reducir la resistencia de un electrodo de tierra.

**d.3.5.1.4. Incremento del radio de una barra de tierra.**

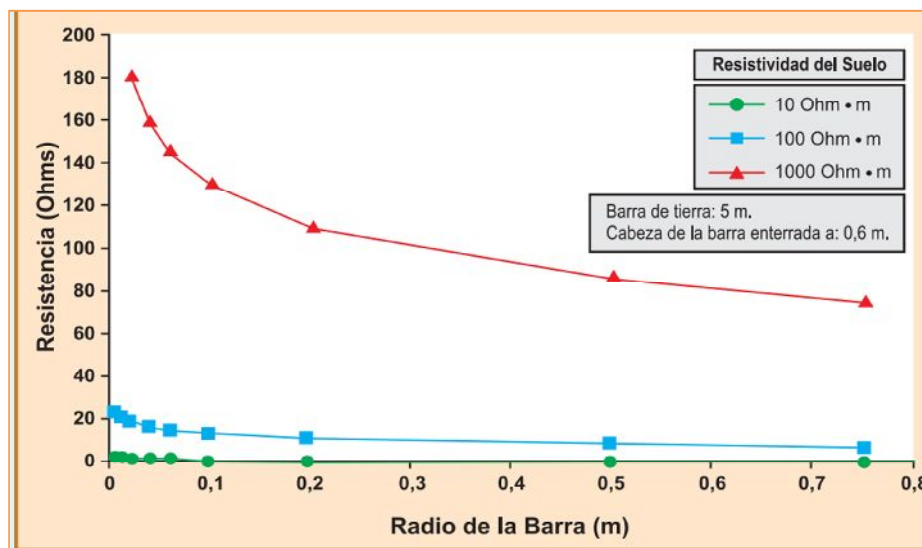


Figura .9: Resistencia vs Radio de la Barra. (Gómez, 2010)

La Figura 9 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementado el radio de la barra. Hay una rápida reducción en el beneficio por unidad de incremento en el diámetro, una vez que éste excede 0,05 metros, excepto en suelos de alta resistividad, donde el mismo efecto se aprecia a un diámetro de 0,2 metros.

Normalmente, hay poco que ganar aumentando el radio de electrodos de tierra por sobre lo necesario de acuerdo a los requisitos mecánicos y por corrosión. Puede usarse tubos en vez de conductores sólidos para aumentar el área superficial externa, con un aumento moderado en el volumen del metal empleado.

En condiciones de suelo rocoso puede ser ventajoso aumentar el diámetro efectivo del electrodo rodeándolo con material de menor resistividad que la roca.

#### **d.3.5.1.5. Profundidad de enterramiento.**

Se puede indicar que este efecto proporciona sólo una reducción marginal en la impedancia, pero a un costo relativamente alto, de modo que normalmente no es considerado. Debe recordarse sin embargo, que mientras mayor sea la profundidad de enterramiento, menores son los gradientes de voltaje en la superficie del suelo. En el interior de una subestación, se requiere un voltaje alto sobre la posición del electrodo, para minimizar los voltajes de contacto. Sin embargo, si un electrodo de tierra se extiende fuera de la subestación, entonces se requiere un voltaje bajo en la superficie del suelo para reducir los potenciales de paso.

En algunos casos es ventajoso incrementar la profundidad de los electrodos para reducir el riesgo de electrocución. En el caso de barras, esto puede obtenerse instalando una envoltura plástica alrededor de uno o dos metros en el extremo superior de cada barra.

#### **d.3.5.1.6. Efecto de proximidad.**

Si en algún caso dos electrodos de tierra se instalan juntos, entonces sus zonas de influencia se traslapan y no se logra el máximo beneficio posible. Si dos barras o electrodos horizontales están muy próximos, la impedancia a tierra combinada de ambos puede ser virtualmente la misma que de uno solo, lo cual significa que el segundo es redundante. El espaciamiento, la ubicación y las características del terreno son los factores dominantes en esto.

En la Figura 10 se muestra cómo la resistencia total de dos barras verticales por

ejemplo de 5 metros de longitud, cambia a medida que la distancia entre ellas aumenta. De esta manera en la figura puede verse que las barras debieran estar separadas una distancia superior a 4 metros en suelo uniforme. Los cálculos de este tipo son la base para establecer la práctica de instalar electrodos al menos con una separación equivalente a su longitud.

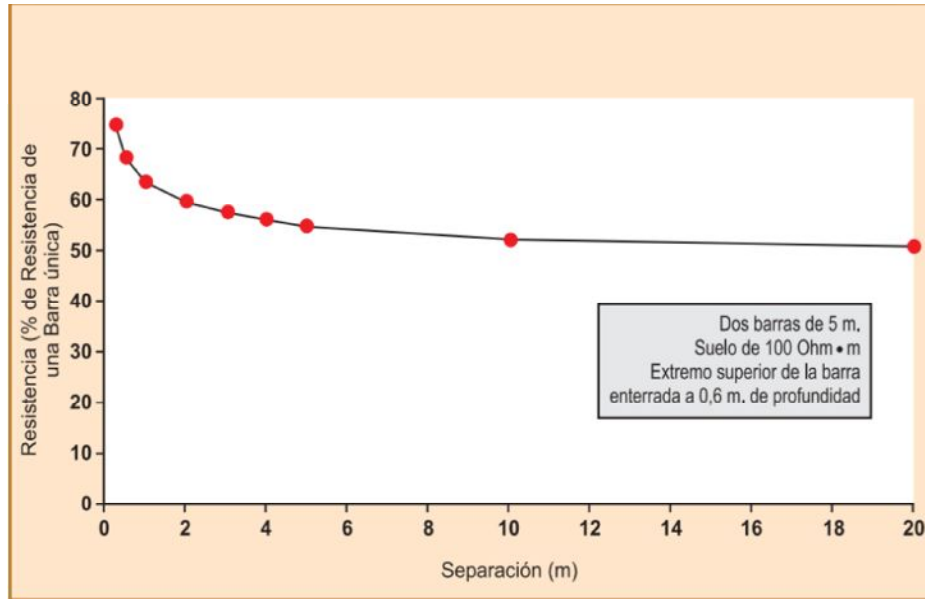


Figura .10: Resistencia combinada de dos Barras verticales en función de la separación entre ellas. (Gómez, 2010)

#### d.3.5.2. Arreglos complejos de electrodos.

En el caso de arreglos más complejos de electrodos, se requiere un análisis más detallado para tomar en consideración todos los factores anteriores.

Las figuras anteriores, excepto la Figura 6, ilustran el comportamiento en condiciones de suelo uniforme.

Desafortunadamente, en la práctica no es usual encontrar condiciones de suelo uniforme. Un suelo multiestratificado es más frecuente. Por ejemplo, puede existir una capa superficial de tierra de moldeo (marga) o turba sobre arena, grava o arcilla. Más abajo aún el material puede cambiar a roca. Esto puede representarse como una estructura de suelo de tres capas, donde la resistividad de las capas aumenta con la profundidad. En otro lado puede haber sedimento (cieno) o arena/ gravilla y luego una capa de agua a pocos metros bajo la superficie. Esto puede formar una estructura de dos capas, con la resistividad de la capa de agua significativamente menor que aquella de la

capa, superficial. La estructura real del suelo y las propiedades eléctricas de cada capa afectarán el valor de resistencia a tierra del electrodo y puede ser importante apreciar esto anticipadamente. Debe destacarse que distintos estándares utilizan formulación diferente y a pesar que a menudo estas proporcionan estimaciones de valores similares, esto no significa que se descuide el hecho de asegurar que se usa la formulación y el modelo correcto, dependiendo de las especificaciones de diseño y del estándar en que se basa.

En el caso de una barra o electrodo vertical (pica), la fórmula es:

$$R = \frac{\rho e}{2 l} \left[ \ln \left( \frac{4l}{a} \right) - 1 \right] \Omega \quad [1]$$

Donde:

R: resistencia de puesta a tierra (ohm).

e: resistividad del suelo (  $\Omega \cdot m$  ).

l: longitud de la barra (m).

a: radio de la barra (m).

Para un conductor corto, enterrado horizontalmente, la fórmula es:

$$R = \frac{\rho e}{2 l} \left[ \ln \left( \frac{4l^2}{dh} \right) - Q \right] \quad [2]$$

En donde:

R: resistencia de puesta a tierra (  $\Omega$  ).

l: longitud del conductor (m).

d: diámetro del conductor (m).

e: resistividad del suelo (  $\Omega \cdot m$  ).

h: profundidad de enterramiento (m).

Q: 1,3 para conductores circulares (de sección).

Q: 1,0 para conductores tipo cinta.

(Gómez, 2010).

#### **d.4. CAPÍTULO IV. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PUESTA A TIERRA**

El sistema de puesta a tierra está influenciado tanto por las condiciones del suelo por las características del conductor y electrodo, así como de la forma como se conectan los elementos entre sí, de ello se desprenden los siguientes factores:

##### **d.4.1. RESISTIVIDAD DEL TERRENO**

La resistividad del terreno se define como la resistencia que presenta 1 m<sup>3</sup> de tierra, y resulta de un interés importante para determinar en donde se puede construir un sistema de puesta a tierra.

**Tabla 2: Resistividad del Terreno.**

<b>NATURALEZA DEL TERRENO</b>	<b>RESISTIVIDAD EN .m</b>
Terrenos Pantanosos	1 a 30
Limus	20 a 120
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Marga y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceo	200 a 1000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de Alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos.	50
Terrenos cultivables poco fértiles, Terraplenes	500

Fuente: OSPINA, Germán, et al. Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas.

#### **d.4.1.1. FACTORES DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD**

##### **d.4.1.2. Temperatura.**

La resistividad del terreno no varía significativamente hasta que las temperaturas alcanzan las condiciones de congelamiento (0° C). A medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrólitos, elevándose la resistividad del terreno. Esto quiere decir que a temperaturas bajas mayor resistividad.

El calor afectará el valor de la resistividad de un terreno ya que en una estación calurosa como lo es el verano, el terreno estará más seco que si se tuviera una estación con muchas lluvias y por esto los valores cambiarían según la estación del año en que nos encontremos es por esto que se recomienda hacer varias mediciones en diferentes estaciones del año para determinar la resistividad promedio, esto en casos de condiciones climáticas severas.

##### **d.4.1.3. Humedad.**

La resistividad varía según la humedad del terreno, mientras más húmedo sea éste, más baja será la resistividad del terreno y mientras más seco esté el terreno, mayor será la resistividad de éste, esto es porque el agua es el mejor disolvente de las sales que hay en la corteza terrestre.

##### **d.4.1.4. Estratigrafía.**

La estratigrafía estudia los estratos o capas del terreno, sus características y los relieves entre los mismos.

Según las capas que forma el terreno, la resistividad varía de manera significativa en algunos casos alcanzando zonas de agua o el nivel freático donde la resistividad es tan baja que la influencia de las demás es imperceptible, o capas donde el exceso de rocas y piedras de tamaño considerable provocan una mayor resistividad en el terreno.

##### **d.4.1.5. Compactación.**

La resistividad disminuye mientras más compactado este un terreno ya que cuando no está bien compacto hay pequeños espacios de aire los cuales impiden que la corriente eléctrica se pueda esparcir por el terreno.

##### **d.4.1.6. Naturaleza del Terreno.**

Esta se refiere a que la resistividad varía según el tipo de terreno, es decir se tiene una resistividad más elevada en un terreno rocoso que en uno donde haya arena.

La conductividad del terreno depende principalmente de la naturaleza electrolítica, esto quiere decir, que la conducción de corriente se realiza a través del electrolito formado por las sales y el agua habitualmente contenida en el terreno.

#### **d.4.1.7. Variaciones estacionales.**

Las estaciones también intervienen en el valor de la resistividad de un terreno ya que en una estación calurosa como lo es primavera el terreno estará más seco que si se tuviera una estación con muchas lluvias y por esto los valores cambiarían según la estación del año en que nos encontremos es por esto que se recomienda hacer varias mediciones en diferentes estaciones del año para determinar la resistividad promedio.

Debido a la uniformidad del terreno, cuando se mide la resistividad del terreno en un punto, por cualquier método, el valor que se obtiene es llamado resistividad media o aparente. Por esto se recomienda hacer varias mediciones en el terreno en diferentes posiciones y después sacar un promedio de estas para obtener un valor de resistividad más exacto.

#### **d.4.1.8. Salinidad.**

Como se sabe el agua por sí sola no conduce la electricidad pero con sales se convierte en un excelente conductor, es por esto que mientras más sales contengan el terreno y este húmedo, más bajo serán los valores de resistividad.

Las sales más comunes que se encuentran en el suelo son cloruro de sodio o sal común y cloruro de potasio.

(Ospina, 2007).

### **d.4.2. MEJORAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO**

En la actualidad existen variadas formas de mejorar el terreno, con el fin de reducir el valor de resistividad del mismo. Es conveniente emplear los métodos actuales que aseguran una larga duración de vida útil de la puesta a tierra, a continuación se presentan dos métodos apropiados para realizar el mejoramiento de la resistividad.

#### **d.4.2.1. Cambio del Terreno.**

Los terrenos pueden ser cambiados en su totalidad, por terreno rico en sales naturales; cuando ellos son rocosos, pedregosos, calizas, granito, etc., que son terrenos de muy alta resistividad y pueden cambiarse parcialmente cuando el terreno está conformado por componentes de alta y baja resistividad; de modo que se supriman las partes de alta

resistividad y se reemplacen por otros de baja resistividad; uno de estos procedimientos es el zarandeo del terreno donde se desechan las piedras contenidas en el terreno.

El cambio total o parcial del terreno deberá ser lo suficiente para que el electrodo tenga un radio de buen terreno que sea de 0 a 0.50 m en todo su contorno así como en su fondo.

Para lugares de alta resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma total, el porcentaje puede estar entre 50 a 70 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de media resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma parcial o total, el porcentaje de reducción puede estar como sigue:

- Cambio parcial de 20 a 40 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.
- Cambio total de 40 a 60 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de baja resistividad donde se cambiará el terreno de los pozos en forma parcial, el porcentaje de reducción puede estar entre 20 a 40 % de la resistividad natural del terreno.

La saturación en este caso se dará si se cambia mayor volumen de tierra que la indicada, los resultados serán casi los mismos y el costo será mucho mayor, lo cual no se justifica.

#### **d.4.2.2. Tratamiento Químico del Suelo.**

El tratamiento químico del suelo surge como un medio de mejorar y disminuir la resistencia eléctrica del SPAT sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos.

Para elegir el tratamiento químico de un SPAT se deben considerar los siguientes factores:

- Alto % de reducción inicial.
- Facilidad para su aplicación.
- Tiempo de vida útil (del tratamiento y de los elementos del SPAT).
- Facilidad en su reactivación.
- Estabilidad (mantener la misma resistencia durante varios años).

Las sustancias que se usan para un eficiente tratamiento químico deben tener las siguientes características:

- Higroscopicidad -Alta capacidad de Gelificación.
- No ser corrosivas -Alta conductividad eléctrica.
- Químicamente estable en el suelo -No ser tóxico.



- Inofensivo para la naturaleza.

#### **d.4.2.2.1. Tipos de tratamiento químico del terreno.**

Existen diversos tipos de tratamiento químico para reducir la resistencia de un sistema de puesta a tierra, entre los más usuales se encuentra el Cloruro de sodio + carbón vegetal, bentonita, Thor-Gel, Terra-Líquido, Progas, Ion-Forte, Quibacsol, San-Earth (Cemento Conductivo).

#### **d.4.2.2.2. Bentonita.**



**Figura. 11: Bentonita. (SEIN S.R.L, 2014)**

Las bentonitas constituyen un grupo de sustancias minerales arcillosas que no tienen composición mineralógica definida y deben su nombre al hecho de haberse descubierto el primer yacimiento cerca de Fort Benton, en los estratos cretáceos de Wyoming en 1848. Aun cuando las distintas variedades de bentonitas difieren mucho entre sí, en lo que respecta a sus propiedades respectivas, es posible clasificarlas en dos grandes grupos la bentonita sódica y la bentonita cálcica.

La bentonita sódica tiene la característica que el ion sodio es permutable y cuya característica más importante es una marcada tumefacción o hinchamiento que puede alcanzar en algunas variedades hasta 15 veces su volumen y 5 veces su peso. Por otro lado, la bentonita cálcica es la que el ion calcio es permutable, tiene menor capacidad para absorber agua y por consiguiente solo se hinchan en la misma proporción que las demás arcillas.

Las bentonitas molidas retienen las moléculas del agua, pero la pierden con mayor velocidad con la que la absorben debido a la sinéresis provocada por un exiguo aumento en la temperatura ambiente, al perder el agua pierden conductividad y restan toda

compactación lo que deriva en la pérdida de contacto entre el electrodo y el medio, elevándose la resistencia del pozo ostensiblemente, una vez que la bentonita se ha armado, su capacidad de absorber nuevamente agua es casi nula.

#### **d.4.2.2.3. Compuesto THOR-GEL.**



**Figura .12: Thor-Gel. (COESA PERU, 2014)**

Es un compuesto químico complejo que se forma cuando se mezclan en el terreno las soluciones acuosas de sus 2 componentes. El compuesto químico resultante tiene naturaleza coloidal y es especial para el tratamiento químico electrolítico de las puestas a tierra, este componente viene usándose mayormente por sus buenos resultados, debido a que posee sales concentradas de metales que neutralizan la corrosión de las sales incorporadas así como aditivos para regular el Ph y acidez de los suelos.

Cuando se utiliza este compuesto, la mezcla va formando una capa de material de baja resistividad, que facilita el movimiento de iones dentro de la malla a tierra, de modo que la aplicación del compuesto se puede utilizar de forma horizontal y vertical, en uno u en otro sentido; convirtiéndose en un excelente conductor eléctrico. Este compuesto posee la ventaja de que al unirse en el terreno se forma un compuesto gelatinoso que le permite mantener una estabilidad química y eléctrica, por aproximadamente 4 años.

Adicionalmente, presenta una gran atracción por el agua, de modo que puede aprisionarla manteniendo un equilibrio con el agua superficial que la rodea; esto lo convierte en una especie de reservorio acuífero. Rellena los espacios intersticiales dentro del pozo constituyendo una excelente conexión eléctrica entre el terreno (reemplazado) y el electrodo, asegurando una conductividad permanente.

El método de aplicación consiste en incorporar al pozo los electrolitos que aglutinados bajo la forma de un gel mejoren la conductibilidad de la tierra, y retengan la humedad en el pozo por un período prolongado. De esta manera se garantiza una efectiva reducción de la resistencia eléctrica y una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones del clima. La aplicación del THORGEL es de 1 a 3 dosis por metro cúbico, según sea la resistividad natural del terreno y la resistencia final deseada, ver la Tabla 3 (Cango, 2009)

**Tabla .3: Dosis de THOR-GEL a ser aplicada para distintos tipos de terreno.**

<b>Naturaleza del terreno</b>	<b>Resistividad (Ohm - m)</b>	<b>Dosis THOR-GEL por m<sup>3</sup></b>
Terrenos cultivables y fértiles	50	1
Terraplenes compactos y húmedos	50	1
Terrenos cultivables poco fértiles	500	de 1 a 2
Suelos pedregoso desnudos arena seca, permeable	3000	2
Suelos rocosos fraccionados	6000	de 2 a 3
Suelos rocosos compactos	14000	3

Fuente: BOWLES, Joseph. Propiedades geofísicas de los suelos. Bogotá: McGraw-Hill, 1982. 490 p.

#### **d.4.2.2.4. Compuesto TERRAL-LÍQUIDO.**



**Figura .13: Terral-Líquido. (COMEX, 2015)**

Este es un activador que aumenta la conductividad del terreno en el que están instalados los electrodos de toma de tierra, consiguiendo con ello bruscos descansos de la resistencia de tierra. Sus características importantes son: facilidad en el uso, no peligroso ni contaminante, no tiene caducidad, su peso bruto 25 kilogramos (apilable aplicable a un electrodo), no requiere ninguna condición especial de almacenamiento. Su aplicación a perforaciones como pozos se realiza al proceder alternando los 25

kilogramos de TERRAL-LÍQUIDO cada 50 kilogramos de material de relleno sólido o en papilla, (por ejemplo: bentonita, carbón en polvo, grafito, tierra de labor o la propia tierra extraída de perforación sin pérdidas) y así sucesivamente.

En la zona más superficial siempre añadir (le toque o no) 25 kilogramos de terral-líquido, rellenar y compactar cuidadosamente sin dejar huecos en la perforación; si el sistema de aterrizaje es de varios electrodos tener en cuenta que deben de estar espaciados entre cada uno de 7 a 9 metros ya que a esta distancia se maximiza el rendimiento efectivo de los tratamientos, y a menores distancias los tratamientos serían en sí mismo igualmente efectivos pero al unirlos al circuito se vería descensos inferiores a lo esperado.

Hay 3 situaciones especiales que hay que controlar, una es la presencia de cuevas y/o grandes oquedades, presencia de corrientes de agua, presencia de roca totalmente compactada ya que estas condiciones pueden afectar la efectividad de la aplicación y el funcionamiento de terral-líquido. Para mayor perdurabilidad de los tratamientos, añadir 2 contenedores de terral-líquido en cada electrodo en vez de uno que se usa habitualmente.

#### **d.4.2.2.5. Compuesto PROGAS.**



**Figura .14: Progas. (COMEX, 2015)**

El activador PROGAS está desarrollado para resolver los inconvenientes de resistencia de las tomas de tierra, cuando además se tiene un entorno corrosivo, o las características de las instalaciones y estructuras adjuntas a las tomas de tierra requieran una protección especial frente a la corrosión (gasolineras, instalaciones de gas, petróleo, etc.). Este tratamiento consigue resolver las dos dificultades; así, por una parte, se obtiene una fuerte disminución de la resistencia de tierra y además actúa como potente

anticorrosivo. Hasta tal punto es efectivo como anticorrosivo que evita incluso la corrosión galvánica. Se puede utilizar como apoyo para evitar el deterioro en el electrodo o partes metálicas del SPT, combinado con otro de mejor resultado para el tratamiento o relleno de pozos.

#### **d.4.2.2.6. Compuesto ION – FORTE.**



**Figura .15: Ion-Forte. (COMEX, 2015)**

Este producto está diseñado para instalaciones con un único electrodo y para activación de electrodos profundos (pozos), su capacidad de descenso de la resistencia de tierra, es superior al de terral-líquido su perdurabilidad es plurianual. Ion-forte actuará insertándose en el terreno que hay en contacto con los electrodos y generando estructuras intensamente higroscópicas. Estas estructuras son capaces de retener la humedad y aportar altas concentraciones iónicas que dan grandes incrementos de conductividad.

Sus especiales propiedades higroscópicas le confieren una capacidad de retención de agua que es superior a la de los geles y esto conlleva a que se minimice el problema recurrente de la variación por estacionalidad de las resistencias de tierra. Puede aplicarse en cualquier tipo de temas de tierra, independiente del uso al que se destine, (alta, media, y baja tensión, informática, antenas, pararrayos, etc.). Su aplicación más idónea es para instalaciones con una sola pica y para activación de pozos. También es aplicable a instalaciones con múltiples electrodos siguiendo las recomendaciones que se detallan en las instrucciones de uso.

Para aplicación en pozos se realiza una combinación de 25 litros de ionforte y 40 litros de material de relleno como bentonita carbón o tierra tratada o la misma tierra de perforación, si se utiliza bentonita la mezcla debe de ser una papilla conformada por

cada 1 kilogramo de bentonita sódica se debe agregar 8 litros de agua y aumentar la cantidad de agua si así lo necesitase la calidad de bentonita adquirida. Las dimensiones acostumbradas para estos pozos son de 20 metros de profundidad y 20 centímetros de diámetro, aunque estas medidas pueden variar para distinta aplicación, pero se deberán realizar los cálculos de los litros necesarios tomando como base el pozo en mención.

#### **d.4.2.2.7. Compuesto QUIBACSOL.**



**Figura .16: Quibacsol. (INGESCO, 2014)**

Es un compuesto mejorador de la conductividad del terreno. El aumento de conductividad es particularmente notable en terrenos de mayor resistividad como los formados por masas de gran porosidad y pobreza de sales. Incluso terrenos formados por rocas compactas e impermeables, pueden ser mejorados debido a que normalmente existen grietas por las que pueden penetrar el producto.

Optimiza el número de perforaciones realizadas para obtener el valor de resistencia de paso a tierra buscado. Se puede utilizar en viviendas, maquinaria e instrumentación electrónica, estaciones de transformación como subestaciones eléctricas, ordenadores, antenas, pararrayos, edificios. Quibacsol mejora los resultados obtenidos en puestas a tierra de nueva ejecución y en el mantenimiento de puestas a tierra ya instaladas.

El uso de este químico en todo tipo de puestas a tierra reduce las diferencias de valores obtenido debidos a cambios climáticos propios de cada estación.

Cuando se utiliza Quibacsol en una instalación de puesta a tierra de electrodo de pica se debe introducir químico diluido en agua a través de un tubo de humidificación expresamente ubicado para esta función; o bien directamente en la perforación efectuada para la introducción de la pica. La proporción recomendada para la disolución en agua del Quibacsol es de 10,1 litros de agua por cada 1,0 kilogramos de químico.

#### d.4.2.2.8. SAN-EARTH (cemento conductivo).



Figura. 17: SAN-EARTH. (Sankosha Corporation, 2014)

Es un polvo fino empacado en bolsas de 25 kilogramos que provee una solución a largo plazo ambientalmente segura para obtener bajas resistencias de puestas a tierra. Los electrodos son instalados rociando el polvo seco por encima y alrededor de un conductor en una zanja que lo circunda y lo endurece hasta formar parte del electrodo de tierra.

Este producto fue desarrollado en los años 70 para ayudar a reducir la resistencia de los SPT, tanto de líneas de transmisión de energía eléctrica en áreas montañosas con suelos rocosos. Pruebas independientes han mostrado que san-earth es ambientalmente seguro y se ha probado que electrodos de cobre cubiertos con este material duran diez veces más tiempo que electrodos de cobre desnudos sin tratamiento.

Características del producto SAN-EARTH

- Excelente calidad de conexión a tierra.
- Resistencia a la corrosión electrolítica.
- Conexión a tierra con excelente relación costo-beneficio.
- Seguro para el medio ambiente.

(Córdova, 2011)

#### d.5. RESISTENCIA DE TIERRA

Es la resistencia eléctrica del terreno al flujo de la corriente AC y DC. La unidad

de medida es el ohmio. Teóricamente, la resistencia de un sistema aterrizado R puede ser calculada usando la fórmula general de resistencia.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad [3]$$

Donde:

$\rho$  = resistividad del terreno (  $\Omega \cdot m$  ).

**L** = longitud del tramo conductor (m).

**A** = sección transversal ( $m^2$ ).

Tanto la temperatura como la humedad del terreno pueden variar significativamente el valor de la resistencia del terreno. La acumulación de sales en el terreno también influye su resistencia por lo que entre mayor cantidad de sales o electrolitos contenga el terreno, menor será su resistencia.

En forma aproximada pueden fijarse valores de resistencia de tierra para los tipos más usuales de electrodos:

- Conductor enterrado horizontalmente  $R = \frac{2\rho}{L}$  [4]

- Pica.  $R = \frac{\rho}{L}$  [5]

- n Picas  $Rt = \frac{P/L}{n}$  [6]

- Placa enterrada profundamente  $R = 0,8 \frac{\rho}{P}$  [7]

- Placa enterrada verticalmente  $R = 1,6 \frac{\rho}{P}$  [8]

- Malla de tierra  $R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$  [9]

Donde:

$\rho$  = resistividad del suelo (  $\Omega \cdot m$  ).

**L** = longitud del electrodo (m).

**P** = perímetro de la malla (m).

**r** = radio (m) de un círculo de la misma superficie del área cubierta por la malla.

**A** = superficie ( $m^2$ ) limitada por el electrodo en anillo.

**d** = diámetro (m) de la superficie inscrita por el cable que forma el anillo.



Debe tenerse en cuenta que la proximidad entre electrodos aumenta la resistencia de tierra reduciéndose la efectividad de cada uno. Esto por la influencia del campo magnético generado en cada electrodo.

#### **d.5.1. MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO Y LA RESISTENCIA A TIERRA**

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación, sistemas electrónicos, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia. Así mismo puede ser empleada para indicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas. En general, los lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión.

En este punto es necesario aclarar que la medición de la resistividad del terreno no es requisito para hacer una malla de puesta a tierra. Aunque para diseñar un sistema de tierras de gran tamaño es aconsejable encontrar el área de más baja resistividad para lograr la instalación más económica.

El perfil de la resistividad del suelo determinará el valor de la resistencia a tierra y la profundidad de nuestro sistema de puesta a tierra.

(Mogollón, 2006).

#### **d.5.2. MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD DE PUESTA A TIERRA**

##### **d.5.2.1. Método de Wenner o de los 4 puntos.**

Para efectuar la medición de resistividad del suelo es necesario hacer circular una corriente por el mismo, el método más usual es el de Frank-Wenner denominado también método de los 4 electrodos, el equipo de medición utilizado es el medidor de Resistencia de Tierras 4630.

El método de los 4 puntos de Wenner, es la técnica más utilizada comúnmente para medir la resistividad del suelo. Consiste básicamente en 4 picas enterradas dentro de la tierra a lo largo de una línea recta, a igual distancia  $A$  de separación, enterradas a una

profundidad B. El voltaje entre los dos electrodos interiores de potencial es medido y dividido entre la corriente que fluye a través de los otros dos electrodos externos para dar un valor de resistencia mutua R en  $\Omega$ .

Existen 2 variaciones de este método:

#### d.5.2.2. Electrodo igualmente espaciados o arreglo de Wenner:

Con este arreglo, los electrodos están igualmente espaciados como se muestra:

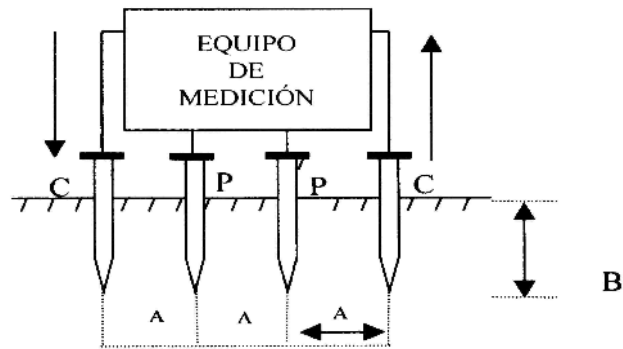


Figura .18: Método de Wenner para la medición de la resistividad. (CFE MÉXICO, 2004)

Donde:

A = Separación entre varillas adyacentes en m.

B = Profundidad de los electrodos en m.

C = Electrodo de corriente.

P = Electrodo de potencial.

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

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad [10]$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad en  $\Omega$ -m.

A = Separación entre electrodos adyacentes en m o bien en cm.

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

R = Lectura del medidor en M.

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

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

$$\rho = 2\pi AR \quad [11]$$

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

Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamento indicándonos en donde existen capas de diferente tipo de suelo con sus resistividades y profundidades respectivas.

#### **d.5.2.3. Electrodo no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger – Palmer.**

Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los 2 electrodos interiores cuando su espaciamento se incrementa a valores muy grandes. Para medir la resistividad con espaciamentos muy grandes entre los electrodos de corriente, puede utilizarse el arreglo mostrado:

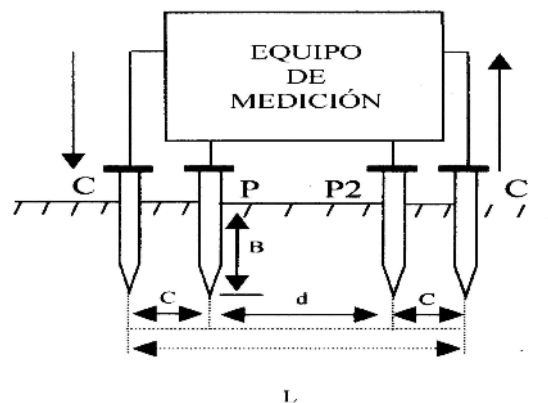


Figura .19: Electrodo no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger – Palmer. (CFE MÉXICO, 2004)

La corriente tiende a fluir cerca de la superficie para pequeños espaciamentos entre los electrodos, considerando que la mayor parte de la corriente que penetra depende del espaciamento entre los electrodos. Así se asume que la resistividad medida para un espaciamento entre electrodos “A” representa la resistividad aparente del suelo a una

profundidad “B”. La información de las mediciones de resistividad puede incluir datos de temperatura e información sobre las condiciones de humedad del suelo en el tiempo en que se realizó la medición. Todos los datos válidos sobre los conductores enterrados que ya se conocen o se suponen para el estudio del área deberán anotarse.

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

Sin embargo no es necesario hacer dichas consideraciones dentro de la malla, tales anotaciones pueden ser utilizadas por medio de una aproximación, especialmente si hay una razón para creer que el suelo en la totalidad del área es razonablemente homogéneo. Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido.

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

$$\rho = \frac{\pi c (c + d) R}{d} \quad [12]$$

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

(CFE MÉXICO, 2014).

#### **d.5.2.4. Método de caída de potencial.**

El método de caída de potencial es el más empleado para la medición de la resistividad de sistemas de tierra. Este método también es conocido por algunos autores como:

- Método de las dos piquetas.  
Método de los 3 puntos.
- Método del 62%.

Para efectuar la medición de resistividad del sistema de tierra se hace circular una corriente ( $I$ ) conocida a través de la tierra, entrando por el electrodo E y saliendo por el electrodo C. La medida de potencial entre los electrodos E y P se toma como el voltaje  $V$  para hallar la resistencia desconocida por medio de la relación  $V/I$ . La razón por la cual este método es conocido como del 62% es porque el electrodo P se entierra a una distancia del 62% de la distancia total del electrodo C y E; E es el electrodo de tierra con resistencia desconocida; P y C son los electrodos auxiliares colocados a una distancia adecuada.

(\*)NOTA: Se aconseja, una distancia “a”  $> 25$  m, esta distancia será tanto más grande cuanto que la toma de tierra sea profunda (zona de influencia más amplia).

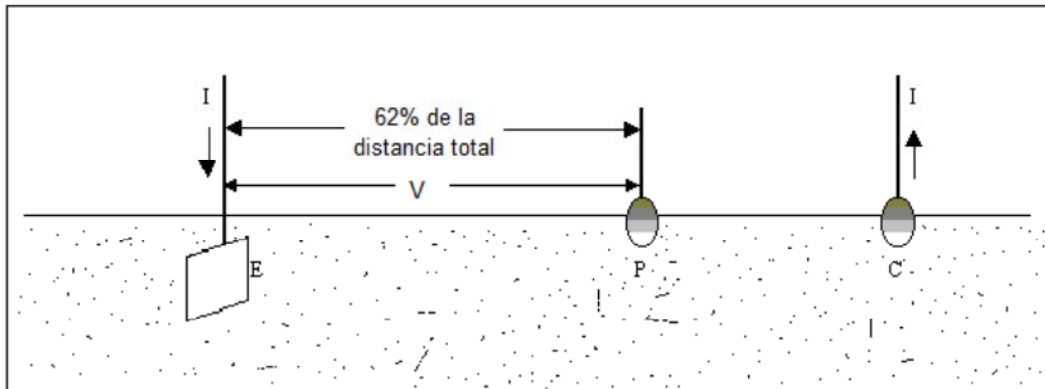


Figura .20: Método de caída de potencial. (Miño, 2011)

La resistencia de los electrodos auxiliares se desprecia, porque la resistencia del electrodo C no tiene determinación de la caída de potencial  $V$ . La corriente  $I$  una vez determinada se comporta como constante. La resistencia del electrodo P, hace parte de un circuito de alta impedancia y su efecto se puede despreciar.

#### **d.5.2.5. Método de los dos Puntos o dos Polos.**

En este método se mide el total de la resistencia del electrodo en estudio más la resistencia de un electrodo auxiliar. La resistencia del electrodo auxiliar se considera muy pequeña comparada con la del electrodo en estudio y por tanto el resultado de la medición es tomado como la resistencia del electrodo en estudio.

Normalmente este método se utiliza para determinar la resistencia de un electrodo simple en un área residencial donde se tiene además un sistema de suministro de agua que utiliza tuberías metálicas sin conexiones o aislantes plásticos (electrodo auxiliar). La resistencia del sistema de suministro de agua en el área se asume muy pequeña

(alrededor de 1 Ohm) en comparación con la resistencia máxima permitida para un electrodo simple (alrededor de 25 Ohm).

Este método tiene algunos inconvenientes, como el hecho de que cada vez más los sistemas de suministro de agua utilizan tuberías plásticas; con lo que se hace más difícil conseguir una tierra auxiliar. Por otra parte no siempre se conoce el recorrido de las tuberías de agua, por lo que las áreas de resistencia del electrodo en estudio y las del electrodo auxiliar podrían solaparse; dando como resultado errores en la lectura. Además, el método de los dos polos puede llevar a grandes errores cuando se intenta medir la resistencia de un electrodo simple de pocos Ohmios; pero al menos puede dar una idea de la resistencia del sistema en estudio.

En la Figura 21, (a) y (b) se ilustra esta técnica. Obsérvese que los terminales C1 y P1 y los terminales C2 y P2 son unidos mediante un puente para realizar esta medición. En equipos modernos el puente es realizado internamente por ellos al seleccionar el tipo de medición o método que se desea realizar.

(Agulleiro, 2014).

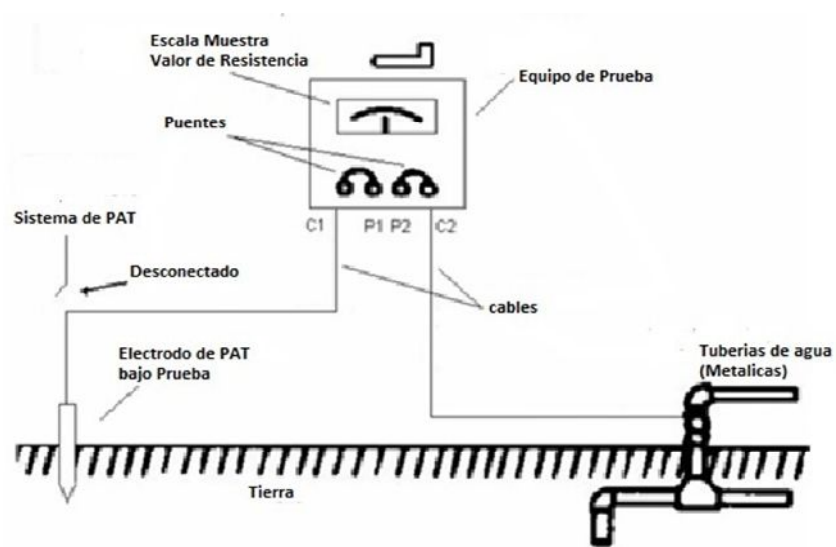


Figura .21: Método de los dos Puntos o dos Polos. (Agulleiro, 2014)

#### d.5.2.6. Método de Tres Puntos o de Triangulación.

Consiste en enterrar tres electrodos (A, B, X), se disponen en forma de triángulo, tal como se muestra en la figura 22 y medir la resistencia combinada de cada par: X+A,

$X+B$ ,  $A+B$ , siendo  $X$  la resistencia de puesta a tierra buscada y  $A$  y  $B$  las resistencias de los otros dos electrodos conocidas.

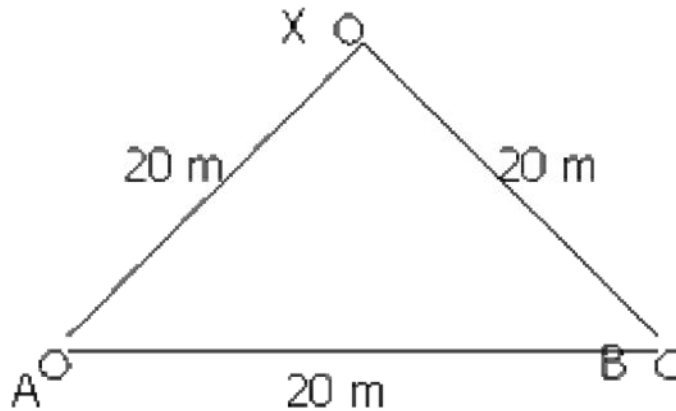


Figura .22: Método de Triangulación. (Sánchez, 2009)

Las resistencias en serie de cada par de puntos de la puesta a tierra en el triángulo serán determinadas por la medida de voltaje y corriente a través de la resistencia. Así quedan determinadas las siguientes ecuaciones:

$R1=X+A$ ; $R2=X+B$ ; $R3=A+B$	[13]
De donde:	
$X=(R1+R2-R3)/2$	[14]

Este método es conveniente para medidas de resistencias de las bases de las torres, tierras aisladas con varilla o puesta a tierra de pequeñas instalaciones. No es conveniente para medidas de resistencia bajas como las de mallas de puesta a tierra de subestaciones grandes. El principal problema de este método es que  $A$  y  $B$  pueden ser demasiado grandes comparadas con  $X$  ( $A$  y  $B$  no pueden superar a  $5X$ ), resultando poco confiable

#### d.5.2.7. Método de Dos Puntos.

Este método resulta de una simplificación del expuesto anteriormente. En este caso, se mide la resistencia total de la toma de tierra bajo ensayo (electrodo  $E$ , ver Figura 23) y

de otra toma auxiliar (electrodo Ea, ver Figura 23), cuya resistencia de tierra se presupone despreciable frente a la primera.

Como es de esperar, el valor de resistencia que se obtiene de esta manera está sujeto a grandes errores cuando se usa para medir resistencias pequeñas, pero en algunas ocasiones es muy práctico para los ensayos.

(Mogollón, 2006).

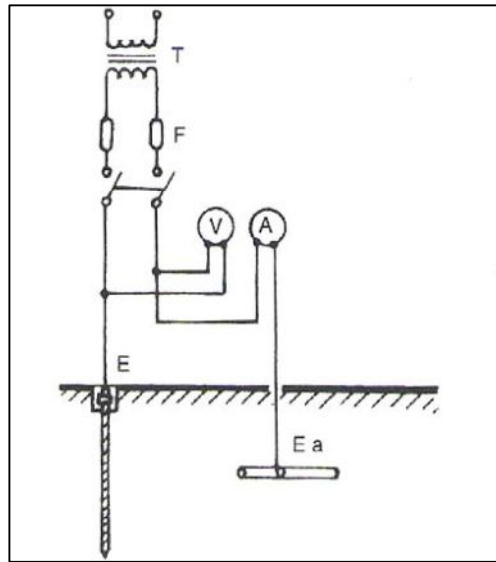


Figura .23: Representación del Método de dos Puntos. (Mogollón, 2006)

#### d.5.2.8. Método de medición de puesta a tierra de un electrodo vertical.

Este método se incluye en la norma ANSI/IEEE Std 81983 como el método de la variación de profundidad. Consiste en medir la resistencia a tierra de un electrodo tipo varilla y basados en la ecuación de resistencia a tierra de un electrodo vertical en un suelo homogéneo y en los datos geométricos del electrodo, derivar la resistencia del suelo. Considerando que el terreno es homogéneo:

$$\rho = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{2L}{r}\right)} \quad [15]$$

Donde:

= Resistividad del terreno.

L= Profundidad de enterramiento del electrodo.

r= Radio del electrodo.

R = valor de resistencia leído por el equipo.



El procedimiento comúnmente aplicado es el de disponer de un electrodo tipo varilla con marcaciones cada 20 o 30 cm, y cuya longitud debe ser la suficiente como para obtener la mayor información posible de como varia la resistencia de ida a medida que penetra el electrodo en la tierra (lo que originó el nombre de método de la variación de profundidad). Es decir, por cada marca se lee un valor de resistencia de puesta a tierra y con la fórmula anterior se calcula la resistividad del terreno en las cercanías del electrodo. Este método solo se debe aplicar cuando no se disponga del espacio suficiente para utilizar los métodos de Wenner o de Schlumberger, o en el caso de disponer solo de un telurómetro de 3 terminales, puesto que la medición es muy limitada y únicamente se obtiene información de las capas más superficiales del terreno. (Miño, 2011).

## **d.6. CAPÍTULO VI. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA**

### **d.6.1. Definición y objetivo de un sistema de puesta a tierra.**

La denominación "Puesta a Tierra", comprende toda la ligazón metálica directa, sin fusibles ni protección alguna de sección suficiente entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el terreno, con objeto de conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificio y superficie próxima al terreno, no existan diferencias de potencial peligrosas y que al mismo tiempo permita el paso a tierra de las corrientes de falla o de descarga de origen atmosférico.

Puesta a tierra significa el aterramiento físico o la conexión de un equipo a través de un conductor hacia tierra. La tierra está compuesta por muchos materiales, los cuales pueden ser buenos o malos conductores de la electricidad, pero, la tierra como un todo es considerada como un buen conductor. Por esta razón y como punto de referencia, al potencial de tierra se le asume cero. La resistencia de un electrodo de tierra medido en ohmios, determina que tan rápido y a que potencial, la energía se equipara. De esta manera, la puesta a tierra es necesaria para mantener el potencial de los objetos al mismo nivel de tierra.

Los sistemas se conectan a tierra para limitar las sobretensiones eléctricas debidas a descargas atmosféricas, transitorios en la red o contacto accidental con líneas de alta tensión, y para estabilizar la tensión eléctrica a tierra durante su funcionamiento normal.

Los equipos se conectan a tierra de modo que ofrezcan un camino de baja impedancia para las corrientes eléctricas de falla y que faciliten el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en caso de falla a tierra.

#### **d.6.2. IMPORTANCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

Una puesta a tierra adecuada, permite que cualquier fuga de corriente que se produzca en un circuito eléctrico busque la tierra como destino en forma inmediata y se evitará así una descarga sobre quien, accidentalmente, entre en contacto con un equipo defectuoso, de ahí su importante instalación de manera correcta.

En realidad el planeta tierra es un conductor eléctrico pobre o malo, por lo que es importante la baja resistividad de los materiales utilizados como electrodos para una puesta a tierra. Por ejemplo la resistividad de un electrodo de cobre es:

$$\rho_{Cu(20)} = \frac{1}{58} \left( \frac{\Omega mm^2}{m} \right) = \frac{1}{58 \cdot 10^6} \left( \frac{\Omega m^2}{m} \right) \quad [16]$$

Mientras que para un terreno excelente, rara vez podrá alcanzarse una  $\rho_{terreno} = 1 \Omega^2/m$ , es decir que, en el mejor de los casos, el terreno posee una resistividad 58 millones de veces mayor que la del cobre, de ahí que el uso de elementos adecuados en un sistema de puesta a tierra es de gran importancia.

#### **d.6.3. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

Una instalación de puesta a tierra se compone esencialmente de electrodos, que son los elementos que están en íntimo contacto con el terreno (enterrados) y de conductores, utilizados para enlazar a los electrodos entre sí y a éstos con los equipos, sus gabinetes o carcasas y demás instalaciones expuestas a corrientes nocivas, manteniendo al mismo tiempo una superficie equipotencial a su alrededor.

Los sistemas de puesta a tierra cuentan con unas cuantas partes imprescindibles: las tomas de tierra, las líneas principales de tierra, las derivaciones de las líneas principales de tierra y los conductores de protección.

#### **d.6.4. Tomas de Tierra.**

Las tomas de tierra están constituidas por los siguientes elementos:

**d.6.4.1. Electrodo.**

Masa metálica permanentemente en contacto con el terreno, para facilitar el paso de las corrientes.

**d.6.4.2. Línea de enlace con tierra.**

La forman los conductores que unen el electrodo o conjunto de ellos con el punto de puesta a tierra.

**d.6.4.3. Punto de puesta a tierra.**

Un punto situado en lugar accesible (fuera del terreno, en arqueta, etc.), que sirve de unión entre la línea de enlace con tierra y la línea principal de tierra. El punto central de puesta a tierra estará provisto de un dispositivo de conexión (regleta o barra de equilibrio de potencial) que permita la unión entre las líneas de enlace y principal de tierra, de forma que se puedan separarse mediante herramientas apropiadas, con el fin de poder realizar la medida de la resistencia de tierra.

(Mogollón, 2006).

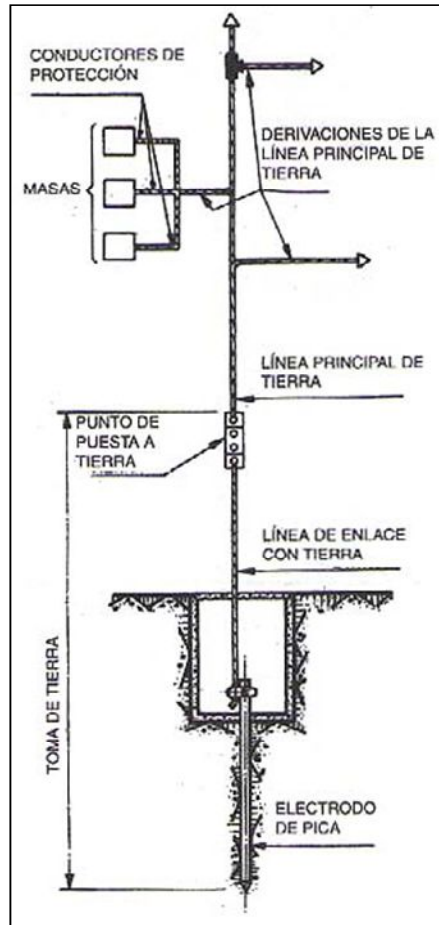


Figura. 24: Elementos de un sistema de puesta a tierra. (Mogollón, 2006)

#### d.7. CAPÍTULO VII. CONSTITUCIÓN DE UNA PUESTA A TIERRA

Para que un sistema de energía eléctrica opere correctamente con una apropiada continuidad de servicio, con un comportamiento seguro de los sistemas de protección y para garantizar los niveles de seguridad personal es necesario que el sistema eléctrico en su conjunto posea un sistema de puesta a tierra.

Cuando se trata de instalaciones eléctricas que darán servicio a una extensa gama de aparatos eléctricos y electrónicos ya sean fijos o móviles; con carcasas metálicas y no metálicas, susceptibles al deterioro desde el punto de vista eléctrico es fundamental la protección contra las fallas debido al deterioro del aislamiento que origina la aparición de tensiones por contactos indirectos.

## d.7.1. TENSIÓN DE PASO Y CONTACTO

### d.7.1.1. Tensión de paso.

Es la diferencia de potencial que podría experimentar una persona entre sus pies con una separación de 1 m, cuando se presenta una estructura cercana puesta a tierra pero no se tiene contacto con ella; su valor permisible está dado por:

$$Et = \frac{165 + \rho s}{\sqrt{t}} \quad [17]$$

Donde:

$Et$  = Tensión de Paso Permisible en voltios.

$\rho s$  = Resistividad de la superficie del terreno en ( $\Omega$ -m).

$t$  = Duración máxima de falla en segundos.

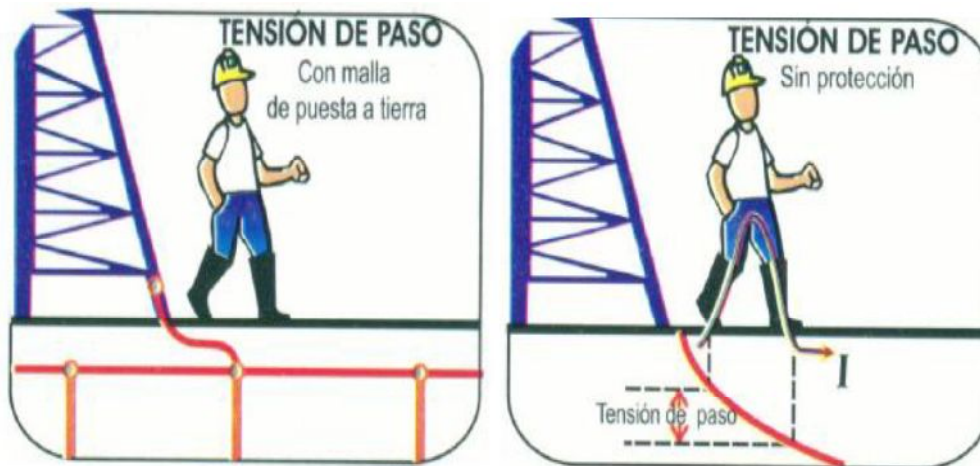


Figura .25: Tensión de paso (Mogollón, 2006)

#### d.7.1.1.1. Valor Límite para la Tensión de Paso.

La seguridad de una persona consiste en evitar que absorba una cantidad crítica de energía antes de que la falla sea despejada por los dispositivos de protección. Las máximas tensiones de cualquier circuito accidental no deberán exceder los límites que se establecen a continuación.

La corriente admisible soportada por el cuerpo humano es:

$$I_B = 0,116 / t_s^{1/2} \text{ (para una persona de 50 Kg)} \quad [18]$$

$$I_B = 0,157 / t_s^{1/2} \text{ (para una persona de 70 Kg)} \quad [19]$$

También ha sido determinado que la resistencia de los dos pies en serie es

$$R_{2Fs} = 6 (\rho) \quad [20]$$

y que la resistencia de los pies en paralelo es

$$R_{2Fp} = 1,5 (\rho) \quad [21]$$

Para la tensión de paso el límite es

$$E_{step} = (R_b + R_{2Fs}) \cdot I_B \quad [22]$$

Consecuentemente resulta

$$E_{step} = (1000 + 6 \rho) \cdot 0,157 / t_s^{1/2}. \quad [23]$$

En donde:

$t_s$  = Duración de shock (0,5 segundos).

$I_B$  = Corriente admisible soportada por el cuerpo humano.

$E_{step}$  = Máxima tensión de paso tolerable.

$R_b$  = Resistencia del cuerpo humano .

$R_{2Fs}$  = Resistencia de los pies en paralelo.

$\rho$  = Resistividad del suelo en ( $\Omega$ -m).

La tensión de paso real deberá ser menor que la máxima tensión de paso tolerable  $E_{step}$  para asegurar la seguridad de las personas.

(López, 2013).

#### **d.7.1.2. Tensión de contacto.**

Diferencia de potencial que durante un defecto puede resultar aplicada entre la mano y el pie de la persona, que toque con aquella una masa o elemento metálico, normalmente sin tensión. Su valor permisible está dado por:

$$E_t = \frac{165 + 0,25\rho s}{\sqrt{t}} \quad [24]$$

En donde:

$E_t$  = Tensión de contacto permisible en voltios.

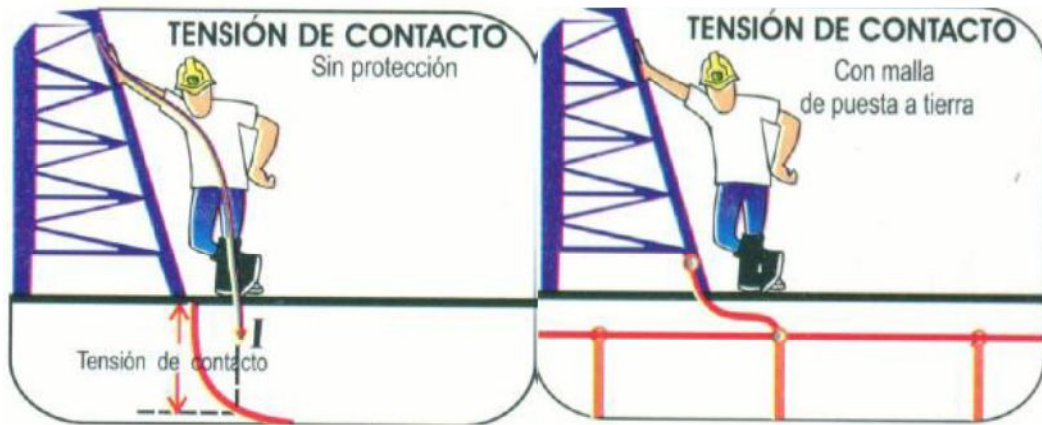


Figura .26: Tensión de Contacto. (Mogollón, 2006)

#### d.7.1.2.1. Valor Límite para la Tensión de Contacto.

Análogamente, la tensión de contacto límite es:

$$E_{\text{touch}} = (R_b + R_{2Fp}) I_B \text{ , resultando:} \quad [25]$$

$$E_{\text{touch}} = (1000 + 1,5\rho) \cdot 0,157 / t_s^{1/2} = (157 + 0,235\rho) / t_s^{1/2}, \quad [26]$$

Donde:

$\rho$ = Resistividad del suelo. Si se trata de una capa de material artificial como por ejemplo. Piedra partida, corresponde aplicar  $\rho_s$  (resistividad superficial).

$t_s$ = duración del shock (seg).

Las tensiones reales de contacto de malla o de transferencia deben ser menores que la máxima tensión de contacto tolerable, para asegurar la seguridad de las personas.

Los valores límites para las tensiones de paso y de contacto están implícitas en el cálculo de la longitud total de conductores indicado más abajo.

#### d.7.2. Selección del conductor de la Malla.

Para calcular la sección del conductor se aplica la siguiente ecuación:

$$A_c = I \left( \frac{33t}{\log \left( \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)} \right)^{1/2} \quad [27]$$

En donde:

Ac = Sección del conductor (CM).

I = Corriente máxima de falla (Amp.)

Tm = Temperatura máxima en los nodos de la malla (450°C con soldadura y 250°C con amarre pernada).

Ta = Temperatura ambiente (°C).

t = Tiempo máximo de despeje de la falla (seg).

De acuerdo con la NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2050 en su sección {250}, puesta a tierra, el tamaño nominal de los conductores de puesta a tierra de equipos, de cobre o aluminio no debe ser inferior a lo especificado en la Tabla 9.

### d.7.3. Cálculo Aproximado de Resistencia de Malla.

Para calcular la resistencia de la malla formada por el conductor y las varillas se aplica la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho}{6L} \left( \frac{2L}{d(0,86)} + \left( \ln \frac{4L}{a} \right) - 1 \right) \quad [28]$$

Donde:

R= Resistencia en ohmios.

p = Resistividad del terreno ( -m).




L = Longitud de la varilla.

d= Diámetro del circulo en la cual la malla queda circunscrita (m).

a=Diámetro de la varilla (mm).

(ASDRÚBAL HERRERA, y otros, 2003).

La figura 27 resume según la configuración deseable las fórmulas para el cálculo de la resistencia a tierra, esta tabla es tomada del libro verde IEEE Std 142-1991.

	Varilla de longitud L y de radio r	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$
	Dos varillas donde el espaciamiento a es mayor que el L	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi a} \left( 1 - \frac{L^2}{3a^2} - \frac{2L^4}{3a^4} \right)$
	Alambre horizontal enterrado Longitud 2L, profundidad a/2	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} + \ln + \frac{4L}{a} - 2 + \frac{a}{2L} - \frac{a^2}{16L} \right)$






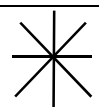
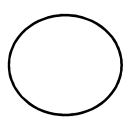



	Varilla de alambre en ángulo recto, longitud de brazo L, profundidad a/2	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} + \ln + \frac{2L}{a} - 0,2373 + 0,2146 \frac{a}{2L} + 0,1035 \frac{a^4}{L^2} \right)$
	Estrella de tres puntas, longitud de brazo L, profundidad de a/2	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} + \ln + \frac{2L}{a} - 1,071 - 0,209 \frac{a}{L} - 0,238 \frac{a^2}{L^2} \right)$
	Estrella de cuatro puntas, longitud de brazo L, profundidad de a/2	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} + \ln + \frac{2L}{a} + 2,912 - 1,071 \frac{a}{L} + 0,645 \frac{a^2}{L^2} \right)$
	Estrella de seis puntas, longitud de brazo L, profundidad de a/2	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} + \ln + \frac{2L}{a} + 6,851 - 3,128 \frac{a}{L} + 1,758 \frac{a^2}{L^2} \right)$
	Anillo de alambre, de diámetro del anillo D, diámetro de alambre d, profundidad a/2	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left( \ln \frac{8D}{d} + \ln + \frac{4D}{a} \right)$
	Tira Horizontal enterrada, longitud 2L, sección r*b, profundidad a/2, r>b	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} + \ln + \frac{4L}{a} + \frac{r^2 - \pi r b}{2(r+b)^2} - 1 \frac{a}{2L} \right)$
	Placa redonda horizontal enterrada de radio r, profundidad a/2	$R = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{4\pi a} \left( 1 - \frac{7r^2}{12a^2} + \frac{33r^4}{10a^4} \right)$
	Placa redonda vertical enterrada de radio r, profundidad de a/2	$R = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{4\pi a} \left( 1 - \frac{7r^2}{24a^2} + \frac{99r^4}{320a^4} \right)$

Figura 27. Fórmulas para calcular la Resistencia de puesta a tierra (Rodríguez, 2013)

Para suelos de dos capas uniforme se utiliza la primera ecuación de la figura 22, para un electrodo, pero si se requiere bajar la resistencia a tierra del terreno se podrá utilizar la tabla de la figura 28, esto utilizando más varillas, para el diseño del enmallado.


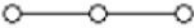

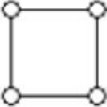
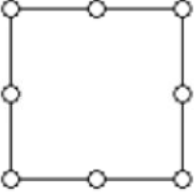
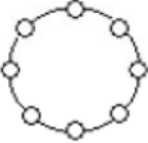
Configuración	Descripción	Porcentaje de reducción de la resistencia de la malla
	2 electrodos en paralelo	Reducción al 55%
	3 electrodos en línea recta	Reducción al 35%
	3 electrodos en delta	Reducción al 38%
	4 electrodos en cuadro	Reducción al 28%
	8 electrodos en cuadro	Reducción al 17%
	8 electrodos en círculo	Reducción al 16%

Figura 28. Porcentaje de reducción de resistencia(Rodríguez, 2013)

#### d.7.4. Recorrido de las corrientes de falla (IF).

La corriente de falla en vez de regresar a la fuente por el conductor mellizo lo hará necesariamente por el suelo (tierra), para lo cual pasa por la falla hacia la masa y continúa por las partes más conductoras que están en contacto con ella, hasta que llega tierra. (Fig. 29).

Cuando no hay conexión entre la masa y tierra una de esas partes más conductoras puede ser la persona que está utilizando el aparato, tocándolo o agarrándolo, en cuyo caso, su salud o vida estarían en peligro.

Para minimizar la corriente peligrosa que podría pasar a través de la persona, la norma recomienda conectar la masa del artefacto con la tierra, con lo cual se reduce drásticamente la resistencia del trayecto para la circulación de la corriente de falla.



Figura .29: Corriente de falla retornando a la fuente. (Pozo, 2011)

#### d.7.5. Corrientes admisibles por el cuerpo humano – Ik.

Las corrientes susceptibles de circular por el cuerpo humano comprometiendo el corazón y sin peligro para la salud, se denominan corrientes admisibles y se han establecido (Dalziel) para intervalos de hasta 3,0 segundos según el peso medio de la persona (70 kg asignado para los hombres y 50 kg. Para las mujeres.) Son relativamente pequeñas y según su intensidad, producen diferentes sensaciones.

Tabla. 4: Corrientes admisibles por el cuerpo humano – Ik.

IK (60 HZ)			SENSACIÓN
Menor a 1,0 mA			Límites de Percepción
De 6,0	a	1,0 mA	Fastidio, hormigueo
De 8,0	a	25 mA	Malestar, Calambres
De 25	a	50 mA	Asfixia, Descontrol

(Pozo, 2011)

Las normas adoptan como límite de corriente admisible, 50 mA, en intervalos de hasta 3,0 segundos, dado que por encima de dicha magnitud hasta los 100 mA, la corriente puede producir fibrilación ventricular y mayores corrientes de electrocución y muerte.

(Pozo, 2011).

## **d.8. CAPÍTULO VIII. NORMAS**

### **d.8.1. INTRODUCCIÓN**

Los estándares internacionales son basados en teorías científicamente probadas y experimentos técnicos alrededor del mundo teniendo en cuenta la experiencia internacional en la materia. Estos estándares ponen los requerimientos mínimos para el diseño e instalación de los Sistemas de Protección contra Relámpagos (LPS: Lightning Protection Systems) y de los Sistemas de Protección de Puesta a Tierra, entre otros.

Para efectos de evaluar las condiciones actuales del sistema de puesta a tierra es necesario tomar como base teórica de referencia, normativas y reglamentos actualizados que gocen de credibilidad y rijan procedimientos aceptados a nivel internacional.

Por este motivo se ha considerado como principales referencias las siguientes publicaciones:

- ANSI/IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
- Normas IEC (International Electrotechnical Commission).
- Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-10. PARTE 9-1.
- INSTALACIONES ELECTROMECAÑICAS.
- INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN BAJO VOLTAJE.
- Código Empresa Eléctrica.
- Otras publicaciones.

A continuación se resumirá las partes más importantes de cada documento, haciendo énfasis en los criterios adoptados para el diseño del sistema de puesta a tierra.

### **d.8.2. INSTITUTO DE INGENIEROS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (IEEE)**

#### **d.8.2.1. IEEE STD 80-2000. GUÍA PARA CONEXIONES SEGURAS A TIERRA EN SUBESTACIONES**

En el capítulo 16 de la norma IEEE Std 80-2000 referente a “diseño de sistemas de tierra” establece dos criterios principales para el diseño del sistema de puesta a tierra lo cuales son bajo condiciones de operación normal y condición de falla.

Los objetivos para el diseño de la puesta a tierra son:

- Proporcionar un medio para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder ningún límite en el equipo y su operación.

- Asegurar que una persona cercana a una instalación eléctrica no se exponga al peligro de un choque eléctrico.
- Establecer límites de seguridad bajo condiciones de falla en la estación eléctrica.

Bajo este criterio la norma aborda cálculos de parámetros críticos como son:

- Máxima corriente de malla.
- Tiempo de despeje de falla.
- Resistividad del suelo.
- Resistividad de la capa superficial.
- Geometría de la malla.

(Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2000).

### **d.8.3. NEC 10, NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN**

Este artículo cubre los requisitos generales para la puesta a tierra y sus puentes de unión en las instalaciones eléctricas y además, los requisitos específicos que se indican a continuación:

En sistemas, circuitos y equipos en los que se exige que estén puestos a tierra.

- El conductor del circuito que es puesto a tierra en sistemas puestos a tierra.
- Ubicación de las conexiones a tierra.
- Tipos y tamaños nominales de los conductores, puentes de unión y electrodos de conexión para puesta a tierra.
- Métodos de puesta a tierra y puentes de unión.
- Condiciones en las que se puede sustituir a los resguardos, separaciones o aislamiento por la puesta a tierra.

#### **d.8.3.1. LITERAL 10.0. CONCEPTOS GENERALES**

**Literal 10.0.1.** En un sistema eléctrico existe la denominada "tierra", que identifica el POTENCIAL "0" (Cero) VOLTAJE QUE SERVIRÁ COMO EL NIVEL REFERENCIAL BÁSICO respecto al cual normalmente se medirán o se considerarán los correspondientes a los otros niveles, dispositivos, equipos, puntos, etc., del sistema.

**Literal 10.0.2.** Todos los equipos eléctricos, electrónicos, carcazas, gabinetes, racks y cualquier otro componente metálico de estos sistemas deben ser apropiadamente aterrizados de acuerdo a la norma ANSI/NFPA 70-250 (NEC), ANSI/TIA-607.

**Literal 10.0.6.** Se debe tener presente que el criterio fundamental para garantizar la seguridad de los seres humanos, es la máxima energía eléctrica que pueden soportar, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas y no el valor de resistencia de puesta a tierra tomado aisladamente. Sin embargo, un bajo valor de la resistencia de puesta a tierra es siempre deseable para disminuir la máxima elevación de potencial (GPR por sus siglas en inglés).

La máxima tensión de contacto aplicada al ser humano que se acepta, está dada en función del tiempo de despeje de la falla a tierra, de la resistividad del suelo y de la corriente de falla. Para efectos del presente Código, la tensión máxima de contacto o de toque no debe superar los valores dados en la Tabla 10.1, tomados de la figura 44A de la IEC 60364-4-44.

**Tabla .5: valores máximos de tensión de contacto aplicada a un ser humano.**

<b>Tiempo de despeje de la falla</b>	<b>Máxima tensión de contacto admisible (valores en rms c.a.)</b>
Mayor a dos segundos	50 voltios
750 milisegundos	67 voltios
500 milisegundos	80 voltios
400 milisegundos	100 voltios
300 milisegundos	125 voltios
200 milisegundos	200 voltios
150 milisegundos	240 voltios
100 milisegundos	320 voltios
40 milisegundos	500 voltios

(Código Ecuatoriano de la Construcción, 2010)

Los valores de la Tabla 5, se refieren a tensión de contacto aplicada a un ser humano en caso de falla a tierra, corresponden a valores máximos de soportabilidad del ser humano a la circulación de corriente y considera la resistencia promedio neta del cuerpo humano entre mano y pié, es decir, no considera el efecto de las resistencias externas adicionalmente involucradas entre la persona y la estructura puesta a tierra o entre la persona y la superficie del terreno natural.

**Literal 10.0.7.** Un sistema de puesta a tierra deberá garantizar que los valores máximos de las tensiones de paso, de contacto y transferidas a que puedan estar sometidos los seres humanos, no superen los umbrales de soportabilidad.

Para efectos del diseño de una puesta a tierra, se deben calcular las tensiones máximas admisibles de paso, de contacto y transferidas, las cuales deben tomar como base una resistencia del cuerpo de 1000 a 2000  $\Omega$  y cada pié como una placa de 200cm<sup>2</sup> aplicando una fuerza de 250N.

El cálculo de un sistema de puesta a tierra debe considerar los siguientes parámetros:

- Características del suelo, especialmente la resistividad.
- Corriente máxima de falla a tierra, que debe ser entregada por el operador de Red para cada caso particular.
- Tiempo máximo de despeje de la falla para efectos de simulación.
- Tipo de carga.

#### **d.8.3.2. LITERAL 10.2. MATERIALES**

##### **Literal 10.2.1. Electrodo de puesta a tierra.**

Para efectos del presente Código serán de obligatorio cumplimiento que los electrodos de puesta a tierra, cumplan los siguientes requisitos adoptados de las normas IEC 60364-5-54, BS 7430, AS 1768, UL 467 y UNESA 6501F (ver Tabla 10.2).

**Literal 10.2.1.1.** La puesta a tierra debe estar constituida por uno o varios de los siguientes tipos de electrodos: Varillas, tubos, placas, flejes o cables.

**Literal 10.2.1.3.** Los fabricantes de electrodos de puesta a tierra deben garantizar que la resistencia a la corrosión de cada electrodo, sea de mínimo 15 años contados a partir de la fecha de instalación, e informar al usuario si existe algún procedimiento específico que debe ser tenido en cuenta para su instalación. Para certificar este requisito se podrá utilizar el método de la inmersión en cámara salina durante 1000 horas tomando como referente las normas ASTM B117 Y ASTM G1 o el ensayo de corrosión por reproducción del perfil de electrolito del suelo, según criterio de las normas ASTM G162-99 y ASTM G8-90 u otro método técnicamente aceptado que asegure el cumplimiento del requisito.

Tabla .6: Requisitos para electrodos de puesta a tierra.

Tipo de Electrodo	Materiales	Dimensiones Mínimas			
		Diámetro mm	Área mm <sup>2</sup>	Espesor en Mm	Recubrimiento μm
Varilla	Cobre	12,7			
	Acero inoxidable	10			
	Acero galvanizado en caliente	16			70
	Acero con recubrimiento electrodeposado de	14			100
	Acero con recubrimiento total en cobre	15			2000
Tubo	Cobre	20		2	
	Acero inoxidable	25		2	55
	Acero galvanizado en caliente	25		2	
Fleje	Cobre		50	2	
	Acero inoxidable		90	3	
	Cobre cincado		50	2	40
Cable	Cobre	1,8 para cada hilo	25		
	Cobre estañado	1,8 para cada hilo	25		
Placa	Cobre		20000	1,5	
	Acero inoxidable		20000	6	

(Código Ecuatoriano de la Construcción, 2010)

**Literal 10.2.1.4.** El electrodo tipo varilla o tubo debe tener mínimo 1,8 m de longitud; además debe estar identificado con la razón social o marca registrada del fabricante y sus dimensiones; esto debe hacerse dentro los primeros 30 cm desde la parte superior.

**Literal 10.2.3. Conductor de puesta a tierra de equipos.**

**Literal 10.2.3.1.** Los conductores del sistema de puesta a tierra deben ser continuos, sin interruptores o medios de desconexión y cuando se empalmen se deben emplear técnicas comúnmente aceptadas como la soldadura exotérmica.

**Literal 10.2.3.3.** Los conductores de los cableados de puesta a tierra que, por disposición de la instalación se requieran aislar, deben ser de aislamiento color verde, verde con rayas amarillas o identificadas con marcas verdes en los puntos de inspección y extremos.

**Literal 10.2.4. Valores de resistencia de puesta a tierra.**



Un buen diseño de puesta a tierra debe reflejarse en el control de las tensiones de paso, de contacto; sin embargo, la limitación de las tensiones transferidas principalmente en centros de transformación de media y alta tensión es igualmente importante. En razón a que la resistencia de puesta a tierra es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial y controla las tensiones transferidas, pueden tomarse los siguientes valores máximos de resistencia de puesta a tierra adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80:

Tabla.7: valores máximos de resistencia de puesta a tierra.

APLICACIÓN	VALORES MÁXIMOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
Estructuras de líneas de transmisión	20 OHMS
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1 OHMS
Subestaciones de media tensión	10 OHMS
Protección contra rayos	10 OHMS
Neutro de acometida en baja tensión	10 OHMS

Se debe buscar que las tensiones de paso, de contacto y transferidas en caso de una falla a tierra no superen las máximas permitidas.

### Literal 10.2.6. Sistemas que deben ser puestos a tierra según NEC.

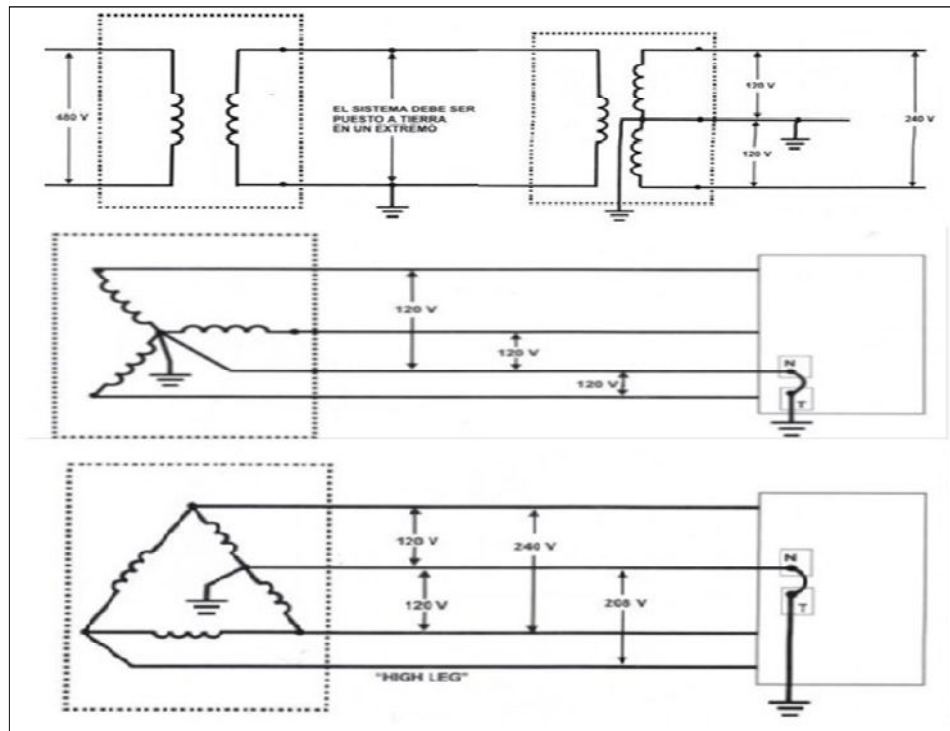


Figura .30: Sistemas que deben ser puestos a tierra según NEC. (Código Ecuatoriano de la Construcción, 1996)

### d.8.3.3. Requisitos para conexiones a tierra y uniones para telecomunicaciones en edificios comerciales.

La norma J-STD-607-A especifica métodos de diseño y distribución para conexiones a tierra y uniones para edificios comerciales. Una adecuada conexión a tierra y cableado en la estructura del edificio es un requisito del Código Eléctrico Nacional (NEC, por sus siglas en inglés). La unión de todos los equipos eléctricos y de telecomunicaciones al conductor del electrodo de conexión a tierra (GEC) primario resulta esencial para optimizar el desempeño y la seguridad.

Nota: La unión a tubería de agua es una violación al código.

La unión del equipo de telecomunicaciones, instalaciones y cableado al electrodo primario de conexión a tierra se logra usando los siguientes elementos principales:

- Conductor del electrodo de conexión a tierra (GEC).
- Conductor de unión (BC).
- Barra de bus principal de conexión a tierra para telecomunicaciones (TMGB).
- Cable primario de unión para telecomunicaciones aislado (TBB).
- Barra de bus de conexión a tierra para telecomunicaciones (TGB).

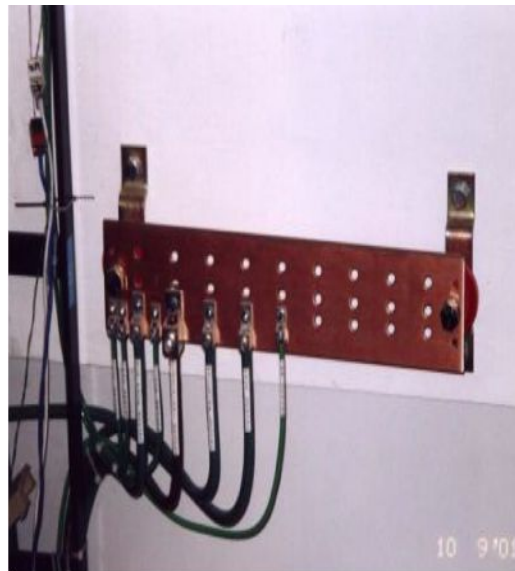
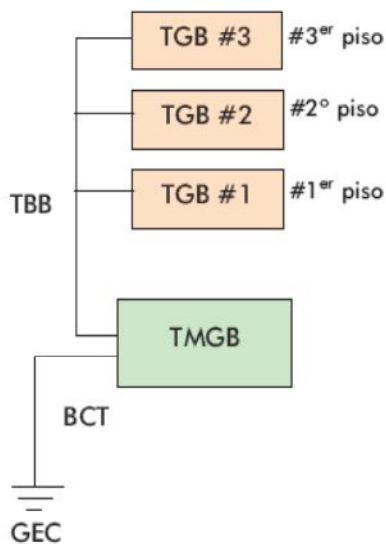


Figura .31: Requisitos para conexiones a tierra y uniones para telecomunicaciones en edificios comerciales. .  
(Código Ecuatoriano de la Construcción, 1996)

La norma J-STD-607-A especifica el TMGB y el TGB como una barra de cobre sólido pretaladrada que extiende el GEC para conectar el TBB. El TBB por lo general es un conductor de cobre trenzado 6AWG que une los TGB de cobre en cada piso del edificio. Hay un TGB en cada TR y ER del edificio. La norma J-STD-607-A también recomienda tener dispositivos de protección de picos tipo TVSS para equipo activo de telecomunicaciones.

El GEC es el conductor de conexión a tierra más grande (malla de tierra), y se extiende hacia la tierra hasta una profundidad especificada.

- El TBB deberá ser continuo y no tener empalmes.
- Las conexiones al TBB deben usar los dispositivos de compresión autorizados.

**En todos los edificios comerciales se debe prever una instalación de puesta a tierra expresa, como la indicada en la norma JSTD 607-A, independiente de la instalación de tierra general, cuyo único punto común es el electrodo de conexión a tierra (GEC).**

(Código Ecuatoriano de la Construcción, 1996).

#### **d.8.4. NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2050 NTC 2050**

##### **d.8.4.1. SECCIÓN 250. PUESTA A TIERRA**

##### **d.8.4.2. Disposiciones generales**

**Líteral 250-1. Alcance.** Esta Sección trata de los requisitos generales de puesta a tierra y de conexiones equipotenciales de las instalaciones eléctricas y de los requisitos específicos a, a f, que se indican a continuación:

- a) Sistemas, circuitos y equipos que se exige, se permite o no se permite que estén puestos a tierra.
- b) El conductor del circuito que debe ser puesto a tierra en los sistemas puestos a tierra.
- c) Ubicación de las conexiones de puesta a tierra.

- d) Tipos y calibres de los conductores de puesta a tierra, de los conductores de conexión equipotencial y de los electrodos de puesta a tierra.
- e) Métodos de puesta a tierra y de conexión equipotencial.
- f) Condiciones en las cuales los encerramientos de protección, distancias de seguridad eléctrica o aislamiento hacen que no se requiera puesta a tierra.

**Notas:**

- 1) **Requisitos de un sistema de puesta a tierra :**
  - a) **Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.**
  - b) **Presentar mínima variación de la resistencia debida a cambios ambientales.**
  - c) **Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.**
  - d) **Tener suficiente capacidad de conducción y disipación de corrientes de falla.**
  - e) **Evitar ruidos eléctricos.**
  - f) **Ser resistente a la corrosión.**
  - g) **Tener facilidad de mantenimiento.**
  - h) **Se deben tener en cuenta las normas técnicas NTC relacionadas con el tema.**
  
- 2) **Los conductores de las instalaciones y circuitos se ponen a tierra para limitar las tensiones debidas a rayos, subidas de tensión en la red o contacto accidental con líneas de alta tensión y para estabilizar la tensión a tierra durante su funcionamiento normal. Los conductores de puesta a tierra de los equipos se conectan equipotencialmente al conductor del sistema puesto a tierra de modo que ofrezcan un camino de baja impedancia para las corrientes de falla, que facilite el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en caso de falla a tierra.**
  
- 3) **Los materiales conductores que rodean a conductores o equipos eléctricos o forman parte de dichos equipos, se conectan a tierra para limitar la tensión a tierra de esos materiales y se conectan equipotencialmente para**

**facilitar el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en caso de falla a tierra. Véase el Artículo 110-10.**

**Literal 250-58. Equipos que se consideran puestos eficazmente a tierra.** En las condiciones especificadas en los siguientes apartados a) y b), se considera que las partes metálicas no portadoras de corriente de los equipos están puestas eficazmente a tierra.

- a) **Equipos sujetos a soportes metálicos puestos a tierra.-** El equipo eléctrico sujeto y en contacto eléctrico con un armazón o estructura metálica diseñado para su soporte y puesto a tierra por uno de los medios indicados en el Artículo 250-57. No se debe usar la estructura metálica de un edificio como conductor de puesta a tierra de equipos de c.a.
- b) **Estructura metálica de cabinas.-** Las estructuras metálicas de cabinas sujetas a cables metálicos que los elevan, y que están unidos o que circulan sobre carretes o tambores metálicos de la maquinaria de los ascensores puesta a tierra por alguno de los métodos indicados en el Artículo 250-57.

**Literal 250-59. Equipos conectados con cordón y clavija.-** Cuando haya que conectarlas a tierra, las partes metálicas no portadoras de corriente de los equipos conectados con cordón y clavija se deben poner a tierra por alguno de los siguientes métodos a), b) o c).

- a) **A través del encerramiento metálico.-** A través del encerramiento metálico de los conductores que alimentan a dichos equipos, si van conectados mediante una clavija con polo a tierra fijo que se utiliza para poner a tierra el encerramiento metálico y si el encerramiento metálico de los conductores se sujeta a la clavija y al equipo mediante conectares aprobados.

*Excepción. Se permite un contacto de puesta a tierra auto armable en clavijas con polo a tierra utilizados en el extremo del cordón de herramientas o artefactos eléctricos portátiles, accionados o guiados a mano.*

- b) **A través del conductor de puesta a tierra de los equipos.-** A través de un conductor de puesta a tierra de equipos instalado junto con los conductores de suministro en un cable o cordón flexible debidamente terminado en una clavija con polo a tierra, con el contacto del polo a tierra fijo. Se permite que haya un

conductor de puesta a tierra sin aislar, pero, si se aísla por separado, el forro debe tener un acabado exterior continuo de color verde o verde con una o más rayas amarillas.

*Excepción. Se permite un contacto de puesta a tierra auto armable en clavijas con polo a tierra utilizados en el extremo del cordón de herramientas o artefactos eléctricos portátiles, accionados o guiados a mano.*

- c) **A través de alambre o banda flexible independiente.**- A través de un alambre o banda flexible independiente, desnudo o aislado, protegido en la medida de lo posible contra daños físicos, cuando forme parte del equipo.

#### **d.8.5. Conductores de puesta a tierra.**

**Líteral 250-91. Materiales.** Los materiales de los conductores de puesta a tierra se especifican en los siguientes apartados .a), b) y c).

- a) **Conductor del electrodo de puesta a tierra.**- El conductor del electrodo de puesta a tierra debe ser de cobre, aluminio o aluminio recubierto de cobre. El material elegido debe ser resistente a la corrosión que se pueda producir en la instalación o debe estar adecuadamente protegido contra ella. El conductor debe ser macizo o trenzado, aislado, forrado o desnudo y debe ser de un solo tramo continuo, sin empalmes ni uniones.

Excepciones:

- 1) Se permiten los empalmes en los conjuntos de barras.
- 2) Cuando haya una acometida con más de un encerramiento, como se permite en el Artículo 230-40 Excepción No. 2, está permitido conectar terminales o derivaciones al conductor del electrodo de puesta a tierra. Cada una de estas derivaciones debe llegar hasta el interior del encerramiento metálico. El calibre del conductor del electrodo de puesta a tierra se debe dimensionar de acuerdo con el Artículo 250-94, pero los conductores de la derivación pueden tener una sección transversal de acuerdo con los conductores del electrodo de puesta a tierra especificados en el Artículo 250-94, para el conductor de mayor sección transversal que entre en los respectivos encerramientos. Los conductores de las

derivaciones se deben conectar al conductor del electrodo de puesta a tierra de modo que este conductor no contenga ningún empalme o unión.

- 3) Se permite empalmar el conductor del electrodo de puesta a tierra por medio de conectores irreversibles de presión certificados para ese fin o mediante un proceso de soldadura exotérmica.
- b) Tipos de conductores para la puesta a tierra de equipos.-** El conductor de puesta a tierra de equipos instalado con los conductores del circuito o encerrado con ellos, debe ser de uno de los siguientes tipos o una combinación de varios de ellos: 1) un conductor de cobre u otro material resistente a la corrosión. Este conductor debe ser macizo o trenzado, aislado, forrado o desnudo y formar un alambre o barra de cualquier forma; 2) un tubo conduit de metal rígido; 3) un tubo conduit metálico intermedio; 4) una tubería metálica eléctrica; 5) un tubo conduit de metal flexible, si tanto el tubo como sus accesorios están certificados para puesta a tierra; 6) la armadura de un cable de tipo AC; 7) el blindaje de cobre de un cable con recubrimiento metálico y aislamiento mineral; 8) el blindaje metálico o la combinación de blindaje metálico y conductores de puesta a tierra en cables de tipo MC; 9) las bandejas portacables, tal como se permiten en los Artículos 318-3.c) y 318-7; 10) las armaduras de los buses de cables tal como permite el Artículo 365-2.a); 11) otras canalizaciones metálicas con continuidad eléctrica, certificadas para puesta a tierra.

Excepciones:

- 1) Cuando los conductores de un circuito contenidos en él estén protegidos por dispositivos de protección contra sobrecorriente de 20 A nominales o menos, se permiten como medios de puesta a tierra de esos circuitos los tubos metálicos flexibles certificados como canalizaciones pero no para servir como puesta a tierra y la tubería metálica flexible certificada y los tubos metálicos flexibles herméticos a los líquidos certificados de secciones comerciales entre 9,5 mm (3/8 de pulgada) y 31,8 mm (1 1/4 de pulgada), siempre que se cumplan todas las condiciones siguientes:

- a. Que la longitud combinada de tubo metálico flexible, tubería metálica flexible y tubo metálico flexible y hermético a los líquidos en el mismo tramo de retomo de puesta a tierra, no sea superior a 1,80 m.
  - b. Que los tubos conduit o tuberías terminen en accesorios certificados para puesta a tierra.
- 2) Cuando los conductores de un circuito contenidos en él estén protegidos por dispositivos de protección contra sobrecorriente de más de 20 A nominales pero que no superen los 60 A, se permite utilizar como medios de puesta a tierra de esos circuitos los tubos metálicos flexibles y herméticos a los líquidos certificados de secciones comerciales entre 19 mm (3/ 4 de pulgada) y 31,8 mm (1 % pulgadas), siempre que se cumplan todas las condiciones siguientes:
- a. Que la longitud total del tubo metálico flexible y hermético a los líquidos certificado en el mismo tramo de retomo de puesta a tierra no sea superior a 1,80 m.
  - b. Que no haya otro tubo metálico flexible, tubería metálica flexible o tubo metálico flexible y hermético a los líquidos de secciones comerciales entre 9,5 mm (3/8 de pulgada) a 12,5 mm que sirva como conductor de puesta a tierra de equipos en el mismo tramo de retorno de puesta a tierra.
  - c. Que el tubo termine en accesorios certificados para puesta a tierra.
- c) **Puesta a tierra complementaria.**- Se permiten electrodos complementarios de puesta a tierra para aumentar los conductores de puesta a tierra de los equipos especificados en el Artículo 250-91 .b), pero la tierra no se debe utilizar como el único conductor de puesta a tierra de los equipos.

**Literal 250-94. Calibre del conductor del electrodo de puesta a tierra en instalaciones de corriente alterna.** El calibre del conductor del electrodo de puesta a tierra de una instalación de c.a. puesta o no a tierra, no debe ser menor a los especificados en la Tabla 8.

**Nota. Para el calibre del conductor puesto a tierra de una instalación de c.a. conectado con el equipo de la acometida, véase el Artículo 250-23.b).**



*Excepción:*

- a. Cuando esté conectado a electrodos fabricados como se indica en el Artículo 250-83.C) o d), no es necesario que la parte del conductor del electrodo de puesta a tierra que constituya la única conexión con dicho electrodo sea superior a 13,29 mm<sup>2</sup> (6 AWG) de cobre o 21,14 mm<sup>2</sup> (4 AWG) de aluminio.
- b. Cuando esté conectado a un electrodo embebido en concreto, como en el Artículo 250-81. c), no es necesario que la parte del conductor del electrodo de puesta a tierra que constituya la única conexión con dicho electrodo sea superior a 13,29 mm<sup>2</sup> (6 AWG) de cobre o 21,14 mm<sup>2</sup> (4 AWG) de aluminio.
- c. Cuando esté conectado a un anillo de puesta a tierra como en el Artículo 250-81.d), no es necesario que la parte del conductor del electrodo de puesta a tierra que constituya la única conexión con dicho electrodo sea de mayor calibre que el conductor utilizado en el anillo de puesta a tierra.

**Tabla.8: Conductor del electrodo de puesta a tierra para sistemas de c.a.**

Sección transversal del mayor conductor de acometida o su equivalente para conductor en paralelo				Sección transversal (calibre) del conductor al electrodo de puesta a tierra			
Cobre		Aluminio o aluminio recubierto de cobre		Cobre		Aluminio o aluminio revestido de cobre	
mm <sup>2</sup>	AWG o Kcmil	mm <sup>2</sup>	AWG o Kcmils	mm <sup>2</sup>	AWG o Kcmils	mm <sup>2</sup>	AWG o Kcmils
33,62 o menor	2 o menor	53,5 o menor	1/0 o menor	8,36	8	13,29	6
42,2 o 63,6	1 o 1/0	67,44 o 85,02	2/0 o 3/0	13,29	6	21,14	4
67,44 o 85,02	2/0 o 3/0	107,21 o 126,67	2,0 o 3/0	21,14	4	33,62	2
107,21 hasta 177,04	4/0 hasta 350 kcmil	152,01 a 253,35	4/0 a 250 kcmil	33,02	2	53,60	1/0
202,68 a 304,02	400 a 600 kcmil	278,68 a 456,03	550 a 900 kcmil	53,50	1/0	85,02	3/0
329,35 a 557,37	650 a 1100 kcmil	506,70 a 996,73	1000 a 1750 kcmil	67,44	2/0	107,21	4/0
609,04 y mas	1200 Kcmils y mas	912,06 y mas	1800 y más kcmil	85,02	3/0	126,67	250 kcmil

(Norma Técnica Colombiana, 1998)

**Literal 250-95. Calibre de los conductores de puesta a tierra de los equipos.**

El calibre de los conductores de puesta a tierra de los equipos, de cobre, aluminio o aluminio recubierto de cobre, no debe ser menor al especificado en la Tabla 9. Cuando haya conductores en paralelo en varios conductos o cables, como lo permite el Artículo 310-4, el conductor de puesta a tierra de los equipos cuando exista, debe estar instalado en paralelo. Cada conductor de puesta a tierra de equipos instalado en paralelo debe tener un calibre determinado sobre la base de la corriente nominal del dispositivo de protección contra sobrecorriente que proteja los conductores del circuito en el conducto o cable, según la Tabla 9.

Cuando se instalen conductores de varios calibres para compensar caídas de tensión, los conductores de puesta a tierra de los equipos, cuando deban instalarse, se deberán ajustar proporcionalmente según su sección transversal. Cuando un conductor sencillo de puesta a tierra de equipos vaya con circuitos múltiples en el mismo conducto o cable, su calibre se debe determinar de acuerdo con el mayor dispositivo de protección contra sobrecorriente que proteja a los conductores del mismo conducto o cable.

**Tabla .9: Calibre mínimo de los conductores de puesta a tierra de equipos para puesta a tierra de canalizaciones y equipos.**

Corriente nominal o ajuste máximo del dispositivo	Sección mínima en cobre	
	mm	AWG
Automático de protección contra sobretensiones		
Amperios	□	□
15	2,08	14
20	3,30	12
30	5,25	10
40	5,25	10
60	5,25	10
100	8,36	8
200	13,29	6
300	21,14	4
400	26,66	3
500	33,62	2
600	42,20	1
800	53,50	1/0
1000	67,44	2/0
1200	85,02	3/0
1600	107,21	4/0
2000	126,67	250 kcmil
2500	177,34	350 kcmil
3000	202,68	400 kcmil
4000	253,25	500 kcmil
5000	354,69	700 kcmil
6000	405,36	800 kcmil

**Nota.** Para cumplir lo establecido en el Artículo 250-51, los conductores de puesta a tierra de los equipos podrían ser de mayor calibre que el especificado en esta Tabla.

Si el dispositivo de protección contra sobrecorriente consiste en un interruptor automático de circuitos con disparo instantáneo o un protector de un motor contra cortocircuitos, como permite el Artículo 1430-52, el calibre del conductor de puesta a tierra de los equipos se puede calcular de acuerdo con la corriente nominal del dispositivo de protección del motor contra sobrecarga, pero no debe ser menor al especificado en la Tabla 9.

*Excepciones:*

- 1) Un conductor de puesta a tierra de equipos no menor a 0,82 mm<sup>2</sup> (18 AWG) de cobre ni menor que los conductores del circuito y que forme parte de cables o cordones de artefactos, según establece el Artículo 240-4.
- 2) No es necesario que el conductor de puesta a tierra de los equipos sea de mayor sección transversal que los conductores de los circuitos de suministro de los equipos.
- 3) Cuando se use como conductor de puesta a tierra de los equipos un conducto o armadura o blindaje de cable, como establecen los Artículos 250-51, 250-57.a) y 250-91 .b).

**Literal 250-112. Con el electrodo de puesta a tierra.** La conexión de un conductor del electrodo de puesta a tierra con el electrodo de puesta a tierra debe ser accesible y estar hecha de tal manera que garantice una puesta a tierra eficaz y permanente. Cuando sea necesario garantizar estas condiciones en una instalación de tuberías metálicas utilizadas como electrodo de puesta a tierra, se debe hacer una conexión equipotencial eficaz alrededor de las juntas y de las secciones aisladas y alrededor de cualquier equipo que se pueda desconectar para su reparación y sustitución. Los conductores de la conexión equipotencial deben ser lo suficientemente largos como para permitir el desmontaje de dichos equipos manteniendo la integridad de la conexión.

*Excepción.* No es necesario que sea accesible una conexión hecha a un electrodo de puesta a tierra que esté empotrado, hundido o enterrado en concreto.

**Literal 250-113. Con los conductores y equipos.** Los conductores de puesta a tierra y los cables de conexiones equipotenciales se deben conectar mediante soldadura exotérmica, conectores a presión certificados, abrazaderas u otros medios también certificados. No se deben utilizar dispositivos o accesorios de conexión que dependan exclusivamente de soldadura. Para conectar los conductores de puesta a tierra a los armarios o encerramientos no se deben usar tornillos para lámina metálica (golosos o autorroscantes).

**Literal 250-114. Continuidad y conexión de los conectores de puesta a tierra de los equipos a las cajas.**

Cuando entren en una caja dos o más conductores de puesta a tierra de equipos, todos esos conductores se deben empalmar o unir dentro de la caja o unir a la caja con herrajes adecuados para ese uso. No se deben hacer conexiones que dependan únicamente de soldadura. Los empalmes se deben hacer según el Artículo 110-14.b), excepto que no se requiera de aislamiento. La instalación de las conexiones de puesta a tierra se debe hacer de tal modo que la desconexión o desmontaje de un tomacorriente, accesorio u otro dispositivo alimentado desde la caja, no impida ni interrumpa la continuidad de la puesta a tierra.

*Excepción. No es necesario que el conductor de puesta a tierra de los equipos, tal como permite el Artículo 250- 74 Excepción No. 4, esté conectado a otros conductores de puesta a tierra de los equipos ni a la caja.*

**a) Cajas metálicas.** Se debe hacer una conexión entre el conductor o conductores de puesta a tierra de equipos y la caja metálica por medio de un tornillo de puesta a tierra, al que no se debe dar ningún otro uso, o de un dispositivo de puesta a tierra certificado.

**b) Cajas no metálicas.** Cuando uno o más conductores de puesta a tierra de equipos lleguen a una caja de salida no metálica, se deben instalar de manera que se puedan conectar a cualquier herraje o dispositivo dentro de la caja que se deba poner a tierra.

**Literal 250-115. Conexión con los electrodos.** El conductor de puesta a tierra se debe conectar al electrodo de puesta a tierra mediante soldadura exotérmica, lengüetas

certificadas, conectores a presión certificados, abrazaderas u otros medios certificados. No se deben usar conexiones que dependan únicamente de la soldadura. Las abrazaderas de puesta a tierra deben estar certificadas para el material del electrodo de puesta a tierra y del conductor del electrodo de puesta a tierra y, cuando se usen en tuberías, barras u otros electrodos enterrados, deben estar también certificadas para su uso enterradas directamente en el suelo. Al electrodo de puesta a tierra no se debe conectar más de un conductor con la misma abrazadera o herraje, excepto si la abrazadera o herraje están certificados para usarlos con varios conductores. La conexión se debe hacer por uno de los métodos explicados en los siguientes apartados a), b), c) o d).

- a. **Abrazadera sujeta con pernos.** Abrazadera certificada de latón o bronce fundido o hierro dulce o maleable.
- b. **Herrajes y abrazaderas para tuberías.** Un herraje, abrazadera u otro mecanismo aprobado, sujeto con pernos a la tubería o a sus herrajes.
- c. **Abrazadera de puesta a tierra de tipo de banda metálica.** Una abrazadera de puesta a tierra certificada de tipo de banda metálica, con una base de metal rígido que encaje en el electrodo y con una banda de un material y dimensiones tales que no sea probable que se estire durante o después de la instalación.
- d. **Otros medios.** Otros medios equivalentes aprobados.

(Norma Técnica Colombiana, 1998).

## e. MATERIALES

### e.1. Materiales.

Los materiales para el avance de cada una las fases del proceso investigativo están descritos a continuación:

- **Materiales de oficina:**
  - Computadora.
  - Impresora.
  - Hojas de papel bond.
  - Calculadora.
  - Lápiz.
  - Borrador.
  
- **Material tecnológico:**
  - Software:
    - Microsoft Word.
    - Microsoft Excel.
    - Power Point.
  
- **Equipos de Medición:**
  - Telurómetro AECM 4620



Figura .32: Telurómetro AECM 4620.

Telurómetro AECM 4620. Este instrumento fue utilizado en la fase de verificación de resistividad del terreno. El Telurómetro Modelo 4620 realiza mediciones de resistencia de puesta a tierra y ensayos de resistividad de suelos. Estos instrumentos miden desde 0 hasta 2000  $\Omega$  y son del tipo auto-rango, es decir que en forma automática buscan la mejor escala de medición para el ensayo a realizar.

Muy sencillo de utilizar: conecte los cables, oprima el botón test y lea los resultados. Indica estado de batería baja, fuera de escala, cables de ensayo cortocircuitados e invertidos. Sobre el panel frontal dispone de tres LED indicadores que advierten al operador acerca de problemas en la medición para así asegurar que la prueba se realiza de manera precisa y confiable. El instrumento está protegido por fusible para  $>250Vca$  contra una eventual conexión a circuitos energizados. Si se produjese una falla en el sistema el equipo puede resistir impulsos de hasta 3000Vca o 1000Vcc. La robusta carcasa de protección es estanca al polvo y al agua cuando está cerrada. A su vez el instrumento está contenido en una caja interior que le brinda protección adicional ante agentes externos aumentando el aislamiento de protección (construcción de doble pared). El botón de operación es además estanco. El Modelo 4620 se alimenta mediante ocho baterías Alkaline tamaño C. El Telurómetro Modelo 4620 es instrumento robusto sencillo de utilizar, lo que lo convierte en el equipo.

Ideal para las cuadrillas de mantenimiento que deban realizar numerosas pruebas. Cumplen con exceso los ensayos previstos por las normas IEC en cuanto a resistencia mecánica y sus especificaciones de seguridad ante golpes, vibraciones y caídas. Están diseñados para rechazar ruidos eléctricos y perturbaciones, de manera que trabajan sin perder precisión aún en presencia de niveles importantes de corrientes erráticas.

- TES-1700 DIGITAL EARTH TESTER



Figura .33: Telurómetro TES-1700 Digital Earth Tester.

TES-1700 Digital Earth Tester. Este artefacto se utilizó en la última etapa para comprobar la resistencia de puesta a tierra. Entre otras cosas esta herramienta tiene las siguientes funcionalidades:

- Capaz de medir tensión de tierra.
- Retención de datos, la función MAX / MIN.
- La función de apagado automático: El temporizador funciona automáticamente cerca de 3 minutos cuando el "Interruptor de botón de prueba" son presionados para mantener el poder en el probador.
- 2 mA midiendo permisos actuales pruebas de resistencia de tierra sin disparar los interruptores de fuga a tierra de corriente en el circuito bajo prueba.
- Además de la instalación para la medición de precisión, cables de prueba para el sistema de medición de dos hilos simplificada también suministra como accesorio estándar. (Unidad puede ser colgado del cuello para la medición simplificada).
- Aviso automático cuando la resistencia de tierra auxiliar. Los picos son en exceso de la tolerancia.
- Diseñado para cumplir con IEC 1010-1 estándar de seguridad.

Especificaciones:



**Tabla.10: Especificaciones Telurómetro TES-1700 Digital Earth Tester.**

<b>Función</b>	<b>Rango de medida</b>	<b>Precisión</b>	<b>Protección de sobrecarga</b>
Voltaje de la Tierra	0 ~ 399.9V (50Hz, 60Hz)	+ / - (1% de la lectura 4 dígitos)	400Vrms / 1 minuto
Resistencia Tierra	0 ~ 39.99	+ / - (2% 0,2 l)	250Vrms / 10 segundos
	0 ~ 399.9	+ / - (2% de la lectura +3 dígitos)	

**Tabla.11: Consumo de corriente (valor típico con voltaje de la batería de 12V).**

<b>Alcance</b>	<b>EN</b>
40 W / 400 W / 4000 W	42 mA
Tierra V	22mA

**Tabla.12: Especificación General.**

<b>Norma de Seguridad</b>	IEC1010-1 categoría de sobretensión III, IEC 61557
<b>Visualización</b>	Pantalla de cristal líquido 3 3/4 dígitos con una lectura máxima de 3999.
<b>Resistencia de aislamiento</b>	Más de 5 M W entre el circuito y la caja de la cubierta cuando se mide con 500 VCC
<b>Voltaje de resistencia</b>	3700CV AC durante 1 minuto entre el circuito y el caso de la vivienda.
<b>Timer (apagado automático)</b>	Unos 3 minutos.
<b>Dimensiones</b>	190 (L) x 140 (W) x 77 (H) mm
<b>Peso</b>	Aprox. 800 (con la batería)
<b>Fuente de energía</b>	Ocho 01t 1.5V AA Tamaño de la batería.
<b>Por encima del rango de indicación</b>	"OL" se mostrará en la pantalla LCD Penal cuando está fuera del rango de medición que se haga.
<b>Temperatura y humedad de funcionamiento</b>	0 °C a 40 °C (32 °F a 104 °F), por debajo del 80% de humedad relativa
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-10 °C a 60 °C (14 °F a 140 °F)
<b>Accesorios</b>	Cables de prueba auxiliar -> 1 Set, picas de tierra auxiliares -> 2 Piezas, Correa para el cuello -> 1Piece, baterías, AA, R -

## **f. RESULTADOS OBTENIDOS**

### **f.1. Descripción de la zona de instalación y requerimiento del sistema.**

EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS EN LA BASE DE LA TORRE 2 DE LA RADIO UNIVERSITARIA 98.5 MHz ubicada en el cerro Huachichambo con una altura de 2656 msnm en un sector exclusivo y estratégico desde donde se realizan los radio-enlaces con la estación de la radio ubicada en la *Carrera de Comunicación Social del Área de la Educación, el Arte y la Comunicación de la Universidad Nacional de Loja*. El sitio de emplazamiento fue seleccionado y petitionado por las autoridades del A.E.A.C., por carecer de un sistema de puesta a tierra.



**Figura .34:** Estación Radio Universitaria 98.5 MHz, ubicada en el cerro Huachichambo y equipos a ser intervenidos.

### **f.2. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES.**

La principal razón para utilizar el cobre es su excelente conductividad eléctrica o, en otras palabras, su baja resistencia eléctrica. La resistencia es indeseable, pues produce pérdidas de calor cuando el flujo eléctrico circula a través del material. El cobre tiene la resistencia eléctrica más baja de todos los metales no preciosos.



Figura .35: Cable de cobre de 7 hilos.

### f.3. Selección del conductor de la malla.

Asumiendo:

$I=1000$  A.

$t=0.5$ seg.

$T_m=250$  °C y  $T_a=12$  °C

Utilizando la ecuación [27], entonces se tiene que:

$$A_c = 1000 \left( \frac{33 * 0,5}{\log \left( \frac{250-12}{234+12} + 1 \right)} \right)^{1/2} \text{ CM}$$

$$A_c = 74927 \text{ CM}$$

$$1 \text{ cm} = 5 \times 10^{-4} \text{ mm}^2, 74927 \text{ CM} = 37464 \text{ mm}^2$$

$$A = \pi r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{74927}{3.1416}} = 3.454 \text{ mm}$$

$$D = 2r = 6.908 \text{ mm}$$

La norma ANSI/IEE Std 80-1986 recomienda como calibre mínimo el #4/0 awg, el diámetro del conductor es= 6.908 mm. Aproximando al calibre mínimo permitido por la norma se elige el conductor 2 AWG que tiene un diámetro igual a 7,42 mm.

Tabla. 13: Características del cable de cobre.

Designación	Conductor de Cobre # 2 AWG	
Código	2000165	
<b>Norma</b>	Unidad	Pedido
		Ofrecido
<b>Características Constructivas</b>	ASTM B1, ASTM B8	
<b>Material</b>	Alambre de cobre duro	
<b>Características Dimensionales</b>		
Calibre	# 2 AWG	
Sección	mm <sup>2</sup>	33.63
Diametro	mm	7.42
Nº de alambres	7	
Diametro de alambres de cobre	mm	2.47
<b>Características Mecánicas</b>		
Peso alambre	Kg/m	0.0436
Peso Conductor	Kg/m	0.3049
Densidad a 20°C	g/cm <sup>3</sup>	8.89
<b>Características Eléctricas</b>		
Resistencia Eléctrica C.C. 20 °C	Ω/km	0.522

Fuente: <http://www.edenorte.com.do>

#### f.4. Medición de la resistividad del terreno en los diferentes puntos designados para la construcción de la puesta a tierra.

La medición de la resistividad del terreno es el punto de partida más importante para el diseño sistemas de puesta a tierra. La resistividad puede variar ampliamente en terrenos que tengan las mismas características, su valor cambia con las características de nuestro medio.

**f.4.1. Procedimiento utilizado para la medición de la resistividad del terreno en el Cerró Huachichambo.**

Para medir la resistividad del terreno se utilizó el método de Wenner (Fig. 18) y la ecuación (11).

Los valores que se obtengan una vez efectuadas las mediciones respectivas de resistencia, serán sustituidos en la ecuación (11), obteniéndose un valor promedio de resistividad aparente a una profundidad equivalente a la distancia " A " entre los electrodos.

Donde:

$\rho$  = Resistividad en  $\Omega \cdot m$ .

A = Separación entre electrodos adyacentes en m o bien en cm.

R = Lectura del medidor.

$$\rho = 2\pi AR$$

Medida numero	A(m)	Resistencia	Resistividad $\Omega \cdot m$ (2 AR)
1	1	38,6	242,53
2	2	25,9	325,46
3	3	17,8	223,68
4	4	13,4	336,7
5	5	8,9	279,6
$\Sigma =$			1407,97

$$\rho_{aprox} = \frac{1407,97}{5} = 281,6 \Omega \cdot m$$

**f.5. Cálculo de las tensiones permisibles de paso y contacto utilizando las ecuaciones (5) y (6).**

**f.5.1. Tensión de Paso.**

$$Et = \frac{165 + \rho s}{\sqrt{t}}$$

$$Et = \frac{165 + 1000}{\sqrt{0,5}}$$

$$Et = 1647V$$

La corriente admisible soportada por el cuerpo humano es:

$I_B = 0,116 / t_s^{1/2}$  (para una persona de 50 Kg).

$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{0,5}}$$

$$\mathbf{I_B = 0,164A}$$

$I_B = 0,157 / t_s^{1/2}$  (para una persona de 70 Kg).

$$I_B = \frac{0,157}{\sqrt{0,5}}$$

$$\mathbf{I_B = 0,222A}$$

Para la tensión de paso el límite es:

$$E_{\text{step}} = (R_b + R_{2Fs}) \cdot I_B$$

Consecuentemente resulta:

$$E_{\text{step}} = (1000 + 6 \rho) \cdot 0,157 / t_s^{1/2}$$

$$E_{\text{step}} = (1000 + 6 (281,6)) \cdot 0,157 / t_s^{1/2}$$

$$E_{\text{step}} = (2689,6) \cdot 0,157 / \sqrt{0,5}$$

$$\mathbf{E_{\text{step}} = 597,17V}$$

### f.5.2. Tensión de Contacto.

$$E_t = \frac{165 + 0,25\rho s}{\sqrt{t}}$$

$$E_t = \frac{415}{\sqrt{0,5}}$$

$$\mathbf{E_t = 586,9V}$$

### f.5.3. Valor Límite para la Tensión de Contacto.

Análogamente, la tensión de contacto límite es:

$$E_{\text{touch}} = (R_b + R_{2Fp}) I_B$$

$$E_{\text{touch}} = (1000 + 1,5\rho) \cdot 0,157 / t_s^{1/2} = (157 + 0,235\rho) / t_s^{1/2}$$

$$E_{\text{touch}} = (157 + (0,235 \cdot 281,6)) / t_s^{1/2}$$

$$E_{\text{touch}} = 157 + (235) / \sqrt{0,5}$$

$$E_{\text{touch}} = 315,6V$$

Para la puesta a tierra utilizaremos un conductor conectado a una configuración de tres varillas verticales con distancia entre ellas del doble del largo de la misma, según la norma NEC, sección 250-84 que pide una distancia mínima entre electrodos de 6 a 10 pies (1,82 – 3,04 metros). Longitud de la varilla  $L=1.8m.$ , y diámetro de la varilla  $a=16mm.$

Se utilizó una configuración de tres electrodos en delta (Fig. 28), que reduce la resistencia de la malla al 38%.

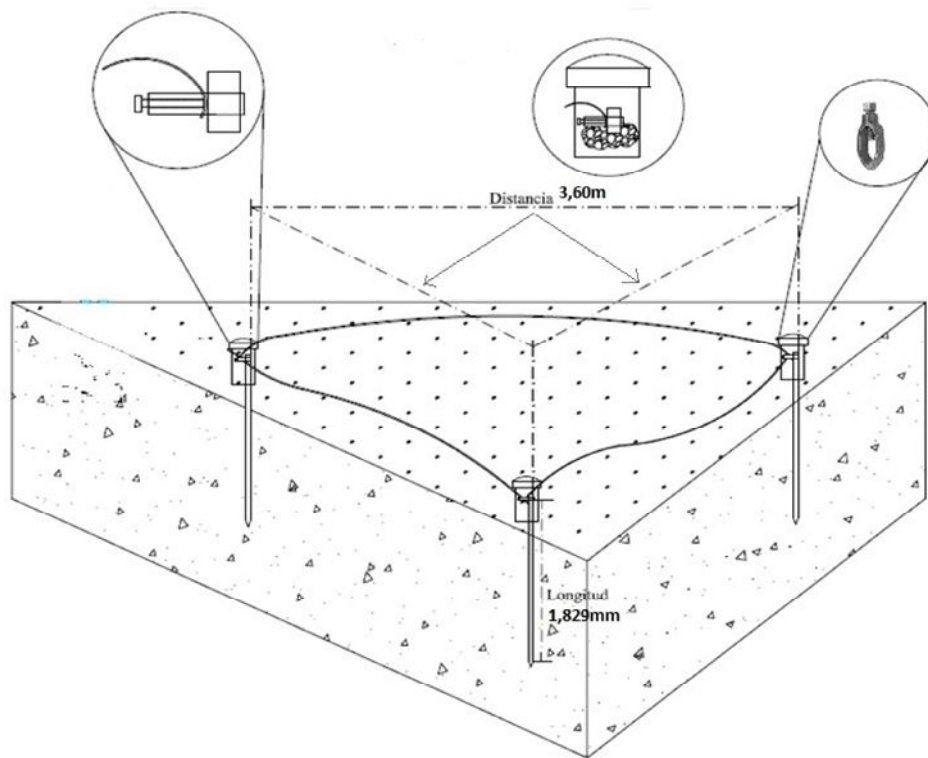


Figura .36: Diseño de la malla.

#### f.6. Cálculo Aproximado de Resistencia de Malla.

Para calcular la resistencia de la malla formada por el conductor y las varillas se aplica la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left( \frac{2L}{d(0,86)} + \left( \ln \frac{4L}{a} \right) - 1 \right)$$

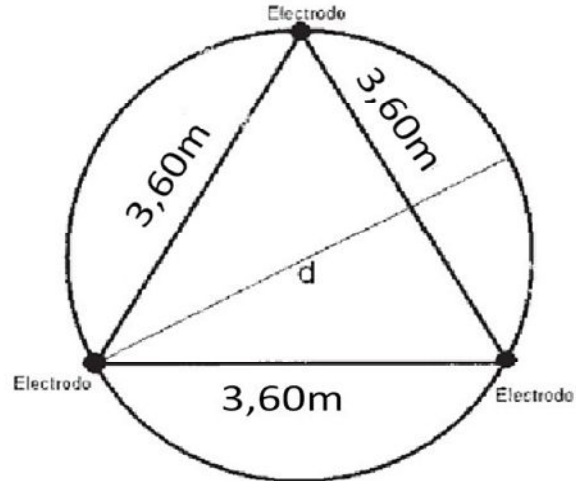


Figura .37: Configuración de la malla.

Donde:

$R$ = Resistencia en ohmios.

$\rho$  = Resistividad del terreno (  $\Omega$ -m).

$L$  = Longitud de la varilla.

$d$ = Diámetro del círculo en la cual la malla queda circunscrita (m).

$a$ =Diámetro de la varilla (mm).

(ASDRÚBAL HERRERA, y otros, 2003).

$$R = \frac{281,6}{6 \cdot 1,8} \left( \frac{2 \cdot 1,8}{4,16 (0,86)} + \left( \ln \frac{4 \cdot 1,8}{0,16} \right) - 1 \right)$$

$$R = \frac{281,6}{33,93} \left( \frac{3,6}{3,58} + (\ln 45) - 1 \right)$$

$$\mathbf{R = 11.1\Omega}$$



Para conseguir que la resistencia baje a un nivel aceptado por la NTC 4552 se deberá hacer un tratamiento al suelo, en este caso se utilizó cemento conductivo SAN-EARTH (Fig. 17).

**f.7. Resistencia de la malla.**

Una vez construido el sistema de puesta a tierra se utilizó el Método de Tres Puntos o de Triangulación para realizar la medición de la resistencia de la malla, el cual consiste en enterrar tres electrodos (A, B, X), se disponen en forma de triángulo, tal como se muestra en la (Fig. 22),y medir la resistencia combinada de cada par utilizando la ecuación (13), siendo X la resistencia de puesta a tierra buscada y A y B las resistencias de los otros dos electrodos conocidas.

$$R1=X+A$$

$$R2=X+B$$

$$R3=A+B$$

$$R1= 21.88 \text{ .m}$$

$$R2= 21.34 \text{ .m}$$

$$R3=20.16 \text{ .m}$$

$$X=(R1+R2-R3)/2$$

$$X = \frac{21.88 + 21.34 - 20.16}{2}$$

$$X = 11,53 \Omega .m$$

**f.8. Ensamblaje del Sistema.**



Fig. 38: Ubicación de Cuarto de Equipos Radio Universitaria (Cerro Huachichambo).



**Fig. 39: Cuarto de equipos Radio Universitaria.**



**Fig. 40: Preparando el terreno para el SPT.**



**Fig. 41: Zanja para enterrar el cable.**



**Fig.42: Agujero para la varilla.**



**Fig.43: Materiales a utilizarse en la malla de puesta a tierra (cable de cobre #2, cemento conductivo).**



**Fig. 44: Instalando cable y varillas en el SPT.**



**Fig. 45: Realizando las conexiones con conectores cooperworld.**



**Fig.46: Realizando el tratamiento del terreno con cemento conductivo SAN-EARTH.**



**Fig. 47: Malla lista con tratamiento de suelo.**



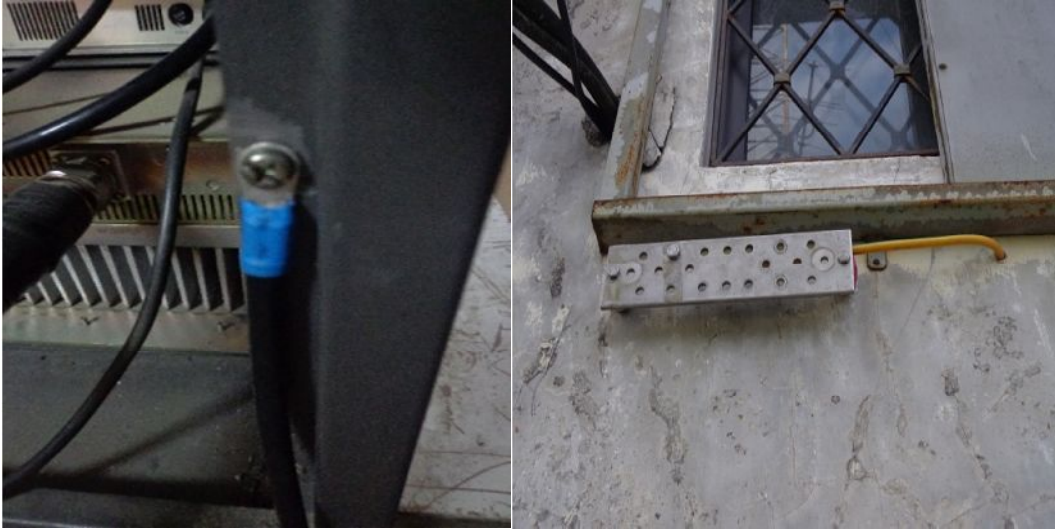
**Fig. 48: Equipos de Radio Universitaria, y su puesta tierra.**



**Fig. 49: Realizando la instalación de la barra.**



**Fig. 50: Barras de puesta a tierra perforadas**



**Fig. 51: Equipos, carcasas conectadas a tierra.**



**Fig. 52: Resultados obtenidos en la malla de puesta a tierra.**



## **g. CONCLUSIONES**

- El diseño de puesta a tierra se realizó para proteger los equipos que se encuentran en el lugar y que pueden verse afectados por condiciones como: sobrecargas atmosféricas, transitorios, interrupciones, en general cualquier acontecimiento que afecte la calidad de la energía.
- Se realizó un sistema de puesta a tierra con tres varillas copperwerld, con una separación entre ellas del doble del largo de la misma, esto con el fin de evitar que el área de resistencia de los electrodos interfieran.
- En la malla de puesta a tierra se escogió una configuración de electrodos en delta, ya que esta configuración disminuye la resistividad del terreno al 38%.
- Con la aplicación de las normas referentes a sistemas de puesta a tierra, se construyó el presente trabajo investigativo, en beneficio de la Universidad Nacional de Loja, en especial de la Radio Universitaria.

## **h. RECOMENDACIONES**

- La aplicación de tratamientos químicos para bajar la resistividad, por lo que si se considera utilizar este método será conveniente un análisis previo de suelos, humedad, para garantizar la buena aplicación del método a escoger en el sitio donde se va a implementar el SPT.
- En todas las edificaciones, pequeñas o grandes, donde exista la presencia de la energía eléctrica es necesario un sistema de puesta a tierra por razones de seguridad del personal y del equipo.

## **i. BIBLIOGRAFÍA**

### **i.1. Libros:**

- J. YAÑEZ, 1981. MALLAS DE TIERRA EN TERRENO ESTRATIFICADO. Memoria Universidad de Chile.
- TOLEDANO GASCA, José. MARTÍNEZ REQUENA, Juan. 1997 “PUESTA A TIERRA EN EDIFICIOS Y EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS”. Paraninfo 1997
- RAMÍREZ CASTAÑO, José. 2010. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: DISEÑADO CON IEE-80 Y EVALUADO CON MEF. Facultad De Ingeniería Y Arquitectura Universidad Nacional De Colombia.

### **i.2. Documentos Digitales:**

- AEMC Instruments. 2003. Entendiendo Pruebas de Resistencia de Tierra. [En línea] 2003. [Citado el: 12 de Mayo de 2012.]  
[http://www.aemc.com/techinfo/techworkbooks/ground\\_resistance\\_testers/950-WKBK-GROUND-SP.pdf](http://www.aemc.com/techinfo/techworkbooks/ground_resistance_testers/950-WKBK-GROUND-SP.pdf)
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. 2004. Norma Técnica Colombiana NTC-4552. [En línea] 13 de 12 de 2004. [Citado el: 12 de junio de 2012.] <http://destec-corp.com/download/49/>.
- CONEXWELD. 2007. BARRAS DE PUESTA A TIERRA. [En línea] 07 de mayo de 2007. [Citado el: 13 de noviembre de 2013.]  
[http://www.conexweld.net/cat\\_CWBCs.pdf](http://www.conexweld.net/cat_CWBCs.pdf).
- Chauvin Arnoux Ibérica, S.A. 2010. GUÍA DE LA MEDICIÓN A TIERRA. [ En Línea] 10 de 06 de 2010. [Citado el: 14 de octubre de 2013.]  
[https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/3681/CA\\_T\\_Guia\\_de\\_Medicion\\_de\\_tierra.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/3681/CA_T_Guia_de_Medicion_de_tierra.pdf)

- Indelec.2011.PROTECCIONES CONTRA SOBRETENSIONES. [ En Línea] 05 de 10 2011. [Citado el: 28 de marzo de 2014.]  
[http://www.indelec.com/doc.file?id=469&type=produit\\_FR](http://www.indelec.com/doc.file?id=469&type=produit_FR)
- ERITECH.2009. PROTECCIÓN ELÉCTRICA DE INSTALACIONES.[En Línea] febrero 2009.[ Citado el: 11 de mayo 2014.]  
<http://www.erico.com/public/library/fep/LT1051.pdf>
- Autoridad De Energía Eléctrica De Puerto Rico.2004. Manual Para El Diseño Y Construcción De Mallas Conectadas A Tierra Para Subestaciones Y Equipos.[En Línea] agosto de 2004. [Citado el: 15 mayo 2014.]  
<http://www.aeepr.com/docs/manuales/Manual%20dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20Mallas%20Conectadas%20Tierra.pdf>
- L. Vallejos. Universidad de Chile,2008. Proyecto de electrodo de puesta a tierra terrestre para sistema HVDC.[En Línea] abril 2008. [Citado el: 17 de mayo 2013.] [http://www.cigre.cl/archivos\\_biblioteca/Articulo.pdf](http://www.cigre.cl/archivos_biblioteca/Articulo.pdf)
- Universidad Nacional de Ingeniería.2008. “Protección de Sistemas de Potencia”.[En Línea] marzo 2008. [Citado el: 23 de agosto 2014.]  
<http://sistemamid.com/preview.php?a=78715>

### **i.3. Sitios Web:**

- Electricistas.cl.2011.LA PUESTA A TIERRA. [En Línea] 2011. [Citado el: 12 de abril 2013.] <http://www.electricistas.cl/images/Puestaatierra.pdf>
- SLIDESHARE.2010.Sistemas De Puesta A Tierra. [En Línea] octubre 2010.[Citado el: 11 de mayo 2013.] <http://es.slideshare.net/santos01/sistemas-puesta-a-tierra>
- Medición De Resistividad De Suelos Y Resistencia De Tierra En Subestaciones.2012.TÉCNICAS MODERNAS PARA LA MEDICIÓN DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN ZONAS URBANAS.[En Línea] 2012.[Citado el: 05 de julio 2014.]  
[https://docs.google.com/document/d/1sp\\_RpqPDpZZW43UXTe7WbK3Mq4OWk7TDe-Xx1QNoEIE/edit?hl=es&pli=1](https://docs.google.com/document/d/1sp_RpqPDpZZW43UXTe7WbK3Mq4OWk7TDe-Xx1QNoEIE/edit?hl=es&pli=1)
- CASA TOLZO.2008.Protección Contra Rayos Y Sobretensiones.[En Línea] 2008.[ Citado el: 19 de julio 2014.]  
<http://www.dehnargentina.com.ar/seccionesDeInteres/pdf/DM45-Reyna-Proteccion5.pdf>
- PROCOBRE, Mallas De Tierra.2007. MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO. [En Línea] 2007. [Citado el: 22 de julio 2014.]  
<http://es.scribd.com/doc/144333433/Mallas-de-Tierra-PROCOBRE-pdf>

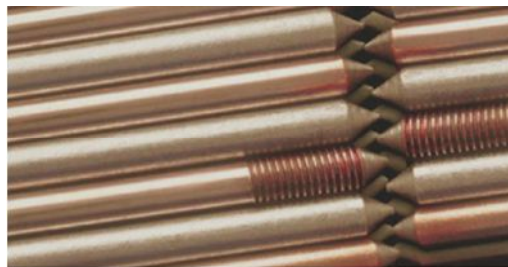
## j. ANEXOS

### Anexo 1. Cotización de Materiales Utilizados en la Implementación

ESPECIFICACIÓN	VALOR	CANTIDAD	TOTAL
Conductor de Cobre Desnudo #2	5,00	14	70,00
Varillas Cooperwerld de 1.80m x 16mm	7,00	3	21,00
Cemento conductivo san earth saco 25kg	49,64	2	99,28
Conector de bronce, varilla cooperwerld. 16mm	1,50	5	7,50
Barras de cobre perforadas	2	30	60
Canaletas	0,70	3	2,10
Pernos de expansión	0.60	4	2,40
Aislador barril 51mm para barra	3,00	4	12,00
			<b>274,28</b>

### Anexo 2. Accesorios complementarios del sistema de pararrayos

#### VARILLAS COOPERWELD



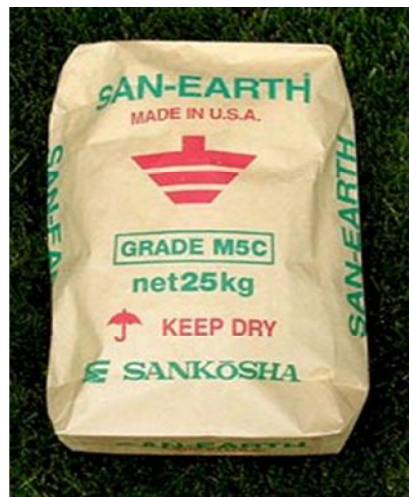
Las varillas cooperwerld de 5/8 (16mm) de diámetro nominal y 1.80 metros de longitud. Son las más comunes a emplearse en sistemas de descargas a tierra. Constan de un núcleo de acero al carbono SAE 1010/1020 trefilado con revestimiento de cobre electro brillante libre de imperfecciones, con un grado de pureza mayor al 95% y sin trazas de zinc. Revestimiento de cobre obtenido mediante electro deposito anódico consiguiendo una película de 0.254mm. La resistencia de tracción es mayor a 50Kgf/mm<sup>2</sup> y soporta un doblado de 60 grados sin dar muestras de fisuras o desprendimientos de la capa de cobre.

## **CONECTOR COOPERWELD**



Los conectores de conductores de puesta a tierra con los electrodos pueden ser del tipo de soldadura exotérmica, conectores a presión, abrazaderas u otros medios aprobados. Y no deben tener soldaduras con materiales de puntos de baja fusión (estaño, plomo, etc.). Las abrazaderas deben ser adecuadas para el número y tipo de conductores. Además, deben de ser compatibles con los materiales de los conductores y los electrodos de puesta a tierra, y cuando se usen enterradas, deben ser del tipo apropiado.

## **CEMENTO CONDUCTIVO SAN EARTH**



SAN-EARTH es un material conductivo granular en polvo que se produce a partir de sustancias químicamente estables. Desde que se introdujo al mercado en 1979, SAN-EARTH ha tenido una gran demanda entre muchos clientes y ha recibido elogios por su eficacia en la reducción de la resistencia de conexión a tierra. Se han presentado

aplicaciones para diez patentes distintas que cubren las distintas propiedades útiles de SAN-EARTH. SAN-EARTH se puede usar en una variedad de aplicaciones que incluyen: la prevención de la electricidad estática, la detección de ondas eléctricas y los elementos de calentamiento inter superficial, pero se ha utilizado con mayor frecuencia como material de conexión a tierra debido a que es práctico y eficaz.

SAN-EARTH está disponible en dos modalidades, como polvo que se puede esparcir sobre el terreno y en una mezcla que se puede usar en la construcción.



## **TABLA DE CONTENIDOS**

- a. TÍTULO.**
- b. RESUMEN.**
- c. INTRODUCCIÓN.**
- d. REVISIÓN DE LITERATURA.**
- e. MATERIALES**
- f. RESULTADOS OBTENIDOS**
- g. CONCLUSIONES**
- h. RECOMENDACIONES**
- i. BIBLIOGRAFÍA**