

**TUTORIAL DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA CON APLICACIÓN EN  
SUBESTACION ELECTRICA DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE**

**LEONARDO FABIO MENDOZA COVILLA  
CRISTIAN RAFAEL BLANCO VIDAL**

**DIRECTOR  
ING SALOMÓN ZARUR**

**Trabajo de investigación presentado como requisito para obtener el titulo de  
ingeniero electricista.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.  
2006.**

*Nota de aceptación*

---

---

---

---

*Jurado*

---

*Jurado*

---

Cartagena D. T. Y C., Diciembre de 2006.

Señores  
**COMITÉ CURRICULAR**  
**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**  
La ciudad.

Respetados señores:

Con toda atención me dirijo a ustedes con el fin de presentarles a su consideración, estudio y aprobación la investigación titulada: **TUTORIAL DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA CON APLICACIÓN EN SUBESTACION ELECTRICA DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE**, como requisito para obtener el título de Ingeniero Electricista.

Atentamente:

---

Leonardo Fabio Mendoza Covilla  
C.C 73'006.900 de Cartagena

Cartagena D. T. Y C., Diciembre de 2006.

Señores  
**COMITÉ CURRICULAR**  
**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**  
La ciudad.

Respetados señores:

Con toda atención me dirijo a ustedes con el fin de presentarles a su consideración, estudio y aprobación la investigación titulada: **TUTORIAL DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA CON APLICACIÓN EN SUBESTACION ELECTRICA DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE** como requisito para obtener el título de Ingeniero Electricista.

Atentamente:

---

Cristian Rafael Blanco Vidal  
C.C 73'210.746 de Cartagena

Cartagena de Indias D. T. y C., de Julio de 2007

Señores:

**COMITÉ CURRICULAR**

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

PROGRAMA DE ING. ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

La Ciudad

Respetados señores:

Por medio de la presente me permito informar que el Trabajo de Grado que lleva por nombre: **“TUTORIAL DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA CON APLICACIÓN EN SUBESTACION ELECTRICA DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE”**, realizada por los estudiantes Leonardo Mendoza Covilla y Cristian Blanco Vidal, ha sido desarrollado de acuerdo a los objetivos establecidos. Como director del proyecto considero que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

En espera de su positiva respuesta.

Cordialmente,

---

**SALOMÓN ZARUR.**

Ing. Electricista.

## **AUTORIZACION.**

Yo, CRISTIAN RAFAEL BLANCO VIDAL, identificado con la cédula de ciudadanía número 73'210.746 de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar, para hacer uso de mi trabajo de investigación y publicarlo en el catalogo on- line de la biblioteca.

---

CRISTIAN RAFAEL BLANCO VIDAL  
C.C 73'210.746 de Cartagena

## **AUTORIZACIÓN.**

Yo, LEONARDO FABIO MENDOZA COVILLA, identificado con la cédula de ciudadanía número 73'006.900 de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar, para hacer uso de mi trabajo de investigación y publicarlo en el catalogo on - line de la biblioteca.

---

LEONARDO FABIO MENDOZA COVILLA  
C.C 73'006.900 de Cartagena

## **AGRADECIMIENTOS.**

*A Dios por animarme en los momentos de debilidad haciéndome fuerte con su poder y gracia,*

*A mi Padre Martín, quien ha sido mi modelo, de quien he admirado su sacrificio, su responsabilidad, fuerza, su intachable personalidad y de quien sigo sus consejos de la vida,*

*A mi madre Leyda, por su amor, por enseñarme a estar siempre adelante, a ser perseverante y dedicado,*

*A mis hermanos David y Lemaris, quienes siempre han estado a mi lado, con quienes he pasado momentos difíciles y felices, y siempre me han apoyado para seguir adelante,*

*En general a todas las personas que han estado a mi lado en la vida, mis familiares, compañeros, amigos y que con el pasar de los años han hecho que sea una mejor persona.*

*Leonardo Fabio Mendoza Covilla*

## AGRADECIMIENTOS.

*A mis padres Heliodoro José Blanco García y Elcidia Vidal Chica; a todos mis familiares y a todas aquellas personas que siempre creyeron en mí, y cultivaron la humildad de trabajar para ayudar a los demás.*

*Desde que nací mi padre siempre aparecía para aplaudir mis logros. Desde que pase por la escuela siempre estaba a mi lado enseñándome la esencia de las cosas y el valor que todas tenían.*

*Cuando me iba haciendo mayor, era una figura que me enseñaba la diferencia entre lo mal y el bien. Durante mi adolescencia era la autoridad que me ponía límites a mis deseos. Ahora que soy adulto, es el mejor consejero y amigo que tengo.*

*En la vida de estudiante se vivieron muchos problemas, pero no son nada comparado con los problemas que tuvo que afrontarse mi padre para el salir adelante, como una persona llena de valores y de espiritualidad. Mi padre siempre fue en mí un gran sembrador de sus raíces. Comprendí que en la vida hay dos clases de padres: el padre empresario y el padre agricultor.*

*El padre empresario invierte y exige resultados. Si tiene éxito sus hijos serán máquinas perfectas.*

*El padre agricultor siembra con amor, riega con cariño, espera con ilusión, y disfruta viendo crecer la vida de sus hijos. Si tiene éxito sus hijos serán personas felices con raíces profundas". Gracias Dios por darme ese padre y espera de mí ser un gran sembrador.*

*Mama, Tus brazos siempre se abrieron cuando necesite un abrazo. Tu corazón siempre me supo comprender cuándo necesite una amiga. Tus ojos sensibles se endurecieron cuando necesite una lección. Tu fuerza y tu amor me han dirigido por la vida y me han dado las alas que necesitaba para volar.*

*Gracias padres por educarme y recuerden:*

*Es hora de empezar a cultivar lo que ustedes sembraron en mí pero tengan presente antes:*

*Cuando educas a tu hijo educas también a tu nieto y que el espíritu de la educación es el conocimiento, no de los hechos, sino de los valores.*

*Cristian Blanco Vidal*

## TABLA DE CONTENIDO.

	PAG
INTRODUCCION.	21
1. OBJETIVOS.	23
1.2 OBJETIVO GENERAL.	23
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	23
2. JUSTIFICACION.	25
3. MARCO REFERENCIAL.	26
3.1 ESTADO DEL ARTE.	26
3.2 MARCO CONCEPTUAL.	28
4. DESCRIPCION DEL TUTORIAL.	30
5. CAPITULO I: GENERALIDADES Y CONEXIONES DE SISTEMAS A TIERRA.	32
5.1 DEFINICIONES Y TERMINOS.	32
5.2 JUSTIFICACION Y OBJETIVO DE LAS PUESTAS A TIERRA.	38
5.3 CRITERIOS DE SEGURIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS.	41
5.3.1 EL CONTACTO DIRECTO.	41
5.3.2 EL CONTACTO INDIRECTO.	42
5.3.3 TENSIÓN DE PASO.	42
5.3.4 TENSIÓN DE CONTACTO.	43
5.3.5 TENSIÓN TRANSFERIDA.	45
5.3.6 TENSIONES MÁXIMAS APLICABLES AL CUERPO HUMANO.	45
5.4 CONEXIONES TÍPICAS DE ATERRIZAMIENTO DEL NEUTRO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.	48

5.4.1 SISTEMAS ELÉCTRICOS CON NEUTRO AISLADO IT.	48
5.4.2 SISTEMAS ELÉCTRICOS CON NEUTRO A TIERRA.	49
5.4.2.1 EL ESQUEMA TN.	50
5.4.2.1.1 ESQUEMA TN-C.	51
5.4.2.1.2 ESQUEMA TN-S.	51
5.4.2.1.3 ESQUEMA TN-C-S	52
5.4.2.2 ESQUEMA TT.	53
5.5 INTERCONEXIÓN O UNIÓN DE LOS SISTEMAS DE TIERRA.	54
5.5.1 UNIFICACION MEDIANTE BOBINA DE CHOQUE.	56
5.6 DETERMINACION DE CORRIENTES DE FALLA EN SISTEMAS CON NEUTRO PUESTO A TIERRA.	59
5.7 EQUIPOTENCIALIDAD.	62
5.7.1 MEDICION DE EQUIPOTENCIALIDAD.	62
5.8 ACCESORIOS DE CONEXIÓN Y MATERIALES.	63
5.8.1 CONEXIONES MECÁNICAS.	63
5.8.2 CONEXIONES EXOTÉRMICAS.	64
5.8.3 SELECCIÓN DE LAS UNIONES	65
5.9 NORMAS Y REGLAMENTOS DE REFERENCIA.	65
<u>6. CAPITULO II: METODOS PARA CALCULOS DE RESISTIVIDAD, MEDIDAS DE RESISTENCIA Y DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA.</u>	66
6.1 RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS.	66
6.1.1 COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE LOS SUELOS.	66
6.1.2 FACTORES QUE DETERMINAN LA RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS.	68
6.1.2.1 NATURALEZA DE LOS SUELOS.	68

6.1.2.2 HUMEDAD.	69
6.1.2.3 TEMPERATURA DEL TERRENO.	69
6.1.2.5 LA COMPACTACIÓN DEL TERRENO.	70
6.1.2.6 GRANULOMETRÍA.	71
6.1.2.7 ESTADO HIGROMÉTRICO.	72
6.1.2.8 ESTRATIFICACIÓN DEL TERRENO.	72
6.1.3 RESISTIVIDADES TÍPICAS DE TERRENOS.	74
6.1.4. EQUIPOS DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD.	74
6.1.4.1 PRECAUCIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA MEDICIÓN.	77
6.1.5 RESISTENCIA VS RESISTIVIDAD.	78
6.2 METODOS DE MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	79
6.2.1 MÉTODO DE LOS TRES ELECTRODOS. (MÉTODO PARA CÁLCULO DE RESISTIVIDAD).	79
6.2.2 MÉTODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS. (MÉTODO PARA CÁLCULO DE RESISTIVIDAD).	80
6.2.3 MÉTODO DE WENNER. (MÉTODO PARA CÁLCULO DE RESISTIVIDAD).	81
6.2.3.1 EJEMPLOS DE PERFILES DE RESISTIVIDAD.	83
6.2.4 MÉTODO DE SCHLUMBERGER. (MÉTODO PARA CÁLCULO DE RESISTIVIDAD).	85
6.3 CÁLCULOS Y MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA TIERRA.	86
6.3.1 GEOMETRÍA Y CONFIGURACION DE LOS ELECTRODOS PARA LOS DIFERENTES SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.	88
6.3.1.1 ELECTRODOS VERTICALES.	89
6.3.1.1.1 VARILLA ENTERRADA SOBRE LA SUPERFICIE.	89
6.3.1.1.2 VARILLA ENTERRADA A PARTIR DE UNA	

PROFUNDIDAD "T".	92
6.3.1.1.3 RESISTENCIA A TIERRA DE DOS O MÁS VARILLAS EN PARALELO.	92
6.3.1.1.4 INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN Y EL ESPACIAMIENTO DE ELECTRODOS (VARILLAS).	96
6.3.1.2 ELECTRODOS HORIZONTALES.	97
6.3.1.2.1 DOS CONDUCTORES EN ÁNGULO RECTO.	98
6.3.1.2.2 CONFIGURACION EN ESTRELLA.	98
6.3.1.3 CONFIGURACION EN MALLA.	98
6.3.1.3.1 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE MALLA.	98
6.4 METODOS DE MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.	99
6.4.1 VALORES DE RESISTENCIA RECOMENDADOS.	101
6.4.2 MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL. (MÉTODO DE MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA).	102
6.4.3 MÉTODO DEL 62%((MÉTODO DE MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA).	103
6.4.4 MÉTODO DE DOS PUNTOS O POLOS. (MÉTODO DE MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA).	105
6.4.5 UBICACIÓN DE LOS ELECTRODOS DE PRUEBA EN MALLA A TIERRA.	106
6.5 DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA (NORMA IEEE 80).	108
6.5.1 PASO 1: MEDIDAS EN CAMPO.	109
6.5.2 PASO 2: CÁLCULO DE LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR.	110
6.5.3 PASO 3. CALCULO DE LAS TENSIONES MAXIMAS PERMITIDAS.	111
6.5.4 PASO 4: DISEÑO PRELIMINAR.	112
6.5.5 PASO 5. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.	112
6.5.6 PASO 6. CALCULO DE MAXIMA CORRIENTE POR LA MALLA.	113

6.5.7 PASO 7. CALCULO DEL GPR.	113
6.5.8 PASO 8. CALCULO DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO ESTIMADAS EN LA SUBESTACIÓN.	114
6.5.9 PASO 9. TENSIÓN DE CONTACTO ESTIMADA VS TENSIÓN DE CONTACTO MÁXIMA PERMITIDA.	116
6.5.10 PASO 10. TENSIÓN DE PASO ESTIMADA VS TENSIÓN DE PASO MÁXIMA PERMITIDA.	116
6.5.11 PASO 11. REVISIÓN DEL DISEÑO PRELIMINAR.	116
7. CAPITULO III: RECOMENDACIONES PARA CALCULOS DE MALLAS A TIERRA EN BASE A DIFERENTES MEDIDAS TOMADAS DE DIVERSOS TERRENOS.	117
7.1 MEDIDAS GENERALES EN O.A.T SECTOR CRESPO.	117
7.2 MEDIDAS GENERALES EN HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE.	119
7.3 TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS OBTENIDOS.	121
7.4 RECOMENDACIONES GENERALES.	122
8. CAPITULO VI: PLAN DE SEGURIDAD, MANTENIMIENTO Y MEJORAMIENTO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.	123
8.1 GENERALIDADES.	123
8.2 TECNICAS DE MEJORAMIENTO DE PUESTAS A TIERRA.	124
8.3 MEJORAMIENTO DE RESISTIVIDAD DE UN TERRENO.	125
8.4 CARACTERISTICAS DE UN SUELO ARTIFICIAL.	126
8.5 SUELO ARTIFICIAL FAVIGEL DE COLOMBIA.	127
8.5.1 ¿QUE VENTAJAS OFRECE?	128
8.5.2 CUALES SON LAS PRINCIPALES CARACTERISTICAS FAVIGEL.	128
8.5.3 COMO REALIZA SU HIDRATACION?.	129
8.6 PLAN DE MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE	

PUESTA A TIERRA.	129
8.7 INSPECCIONES, CONSERVACIÓN Y RENOVACIÓN.	130
8.7.1 INSPECCIÓN DE LAS PUESTAS A TIERRA EN GENERAL.	131
8.8 SUELOS DE CONCRETO O MATERIAL EN EL CUAL NO SE PUEDEN INSERTAR LOS ELECTRODOS.	132
8.9 ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PUESTA A TIERRA.	133
<u>9. CAPITULO V: DISEÑO DE LA MALLA DE TIERRA PARA LA SUBESTACION ELECTRICA DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE.</u>	134
9.1 PASO 1. MEDIDAS EN CAMPO.	134
9.1.1 MEDIDAS DE RESISTIVIDAD.	134
9.2 PASO 2: CÁLCULO DE LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR.	138
9.3 PASO 3. CALCULO DE LAS TENSIONES MAXIMAS PERMITIDAS.	140
9.4 PASO 4: DISENO PRELIMINAR.	141
9.5 PASO 5. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.	142
9.6 PASO 6. CALCULO DE MAXIMA CORRIENTE POR LA MALLA.	142
9.7 PASO 7. CALCULO DEL GPR.	142
9.8 PASO 8. CALCULO DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO ESTIMADAS EN LA SUBESTACION DEL H.U.C.	143
9.9 PASO 9. TENSIÓN DE CONTACTO ESTIMADA VS TENSIÓN DE CONTACTO MÁXIMA PERMITIDA.	145
9.10 PASO 10. TENSIÓN DE PASO ESTIMADA VS TENSIÓN DE PASO MÁXIMA PERMITIDA.	145
9.11 PASO 11. REVISIÓN DEL DISEÑO PRELIMINAR.	146
9.12 NOTAS DE INSTALACIÓN DE SECCIONES DE CONDUCTOR CALCULADAS.	146
9.13 CALCULO DE BOBINA DE CHOQUE.	147

9.14 PROCEDIMIENTO E INSTALACION DE LA MALLA DE TIERRA.	147
9.15 LISTADO DE MATERIALES DE IMPLEMENTACION.	148
9.16 ACCESORIOS DE ACABADO EXTERIOR.	149
9.16.1 CAJA DE REGISTRO CONSTRUIDA.	149
9.17 ESQUEMA DE CONEXIÓN INTERNA PARA U.C.I EN HUC.	151
9.18 CONEXIONES A LA SUBESTACION Y LOS TABLEROS ELECTRICOS.	152
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	159
11. BIBLIOGRAFIA.	162
12 ANEXOS.	163

## LISTA DE FIGURAS.

	PAG
Figura1. Esquema de una instalación de puesta a tierra y partes que comprende.	33
Figura2. Contacto directo.	41
Figura3. Contacto indirecto.	42
Figura4. Perfil de potenciales en torno a un electrodo vertical de puesta a tierra.	43
Figura5. Perfil de potenciales en torno a un electrodo vertical de puesta a tierra antes de la presencia de una persona.	44
Figura6. Equivalente circuital de la impedancia del cuerpo humano.	46
Figura7. Conexión IT.	49
Figura8. Conexión TN.	50
Figura9. Conexión TN-C.	51
Figura10. Conexión TN-S.	51
Figura11. Conexión TN-C-S.	52
Figura12. Conexión TT.	53
Figura13. Bobina de choques para interconexión de tierras.	57
Figura14 Interconexión de puestas a tierra con bobina de choque.	58
Figura15. Sistemas con neutro puesto a tierra.	59
Figura16. Falla en circuito del usuario sin puesta a tierra.	60
Figura17. Falla en circuito del usuario con puesta a tierra.	61
Figura18. Conexiones mecánicas.	63
Figura19. Conexiones exotérmicas.	64

Figura20. Resistividad de un cubo de terreno de 1m de arista.	67
Figura21. Variación de la resistividad en función al porcentaje de humedad.	69
Figura22. Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura.	70
Figura23. Variación de la resistividad del terreno en función del % de sal.	70
Figura24. Variación de la resistividad del terreno en función de la compactación del terreno.	71
Figura25. Influencia de la estratificación del terreno.	73
Figura26. Equipo de medición: Telurómetro.	77
Figura27. Método de tres electrodos para la medición de resistividad.	80
Figura28. Medición de la resistividad por el método de los cuatro electrodos.	81
Figura29. Configuración de Wenner.	82
Figura30. Perfil de resistividad de terreno arcilloso y rocoso.	84
Figura31. Perfil de resistividad de terreno seco y arenoso.	84
Figura32. Perfil de resistividad de terreno seco y rocoso.	85
Figura33. Configuración de Schlumberger.	85
Figura34. Componentes de la resistencia de puesta a tierra.	88
Figura35. Electrodos de Puesta a tierra.	89
Figura36. Modelo de jabalina enterrada.	90
Figura37. Electrodo vertical enterrado a una profundidad t.	92
Figura38. Zonas de interferencia (traslape).	93
Figura39. Dos electrodos de puesta a tierra.	93

Figura40. Curva resistencia equivalente en función del número de electrodos en paralelo.	96
Figura41. Electrodo horizontal enterrado a una profundidad h.	97
Figura42. Configuraciones horizontales de conductores.	97
Figura43. Malla de puesta a tierra de 10 x 10 .	99
Figura44. Modelo matemático de conexión del electrodo.	100
Figura45. Método de caída de potencial.	103
Figura46. Método de 62%.	104
Figura47. Método de los dos Polos.	106
Figura48. Diagrama de flujo para calculo de sistema de puesta a tierra.	108
Figura 49. Factor de Reducción $C_S$ como una función. del factor de reflexión K y del espesor $h_s$ .	112
Figura50. Perfil de resistividad para OAT.	119
Figura51. Perfil de resistividad para HUC.	121
Figura52. perfiles de resistividades de ambas empresas.	122
Figura53. Curvas de resistividad típica de soluciones más comunes.	126
Figura54. Reducción de puesta a tierra con Favigel.	127
Figura55. Limpieza de conexiones de puesta a tierra.	132
Figura56 . Funcionamiento de una puesta a tierra.	133
Figura57. Esquema de malla a tierra H.U.C.	137
Figura58. Arreglo de camas de UCI.	150
Figura59. Diagrama esquemático de sistema de tierra en H.U.C.	151
Figura60. Diagrama unifilar de sistema eléctrico de H.U.C.	152
Figura61. Diagrama esquemático de subestación eléctrica.	153

## LISTA DE TABLAS.

	PAG
Tabla1. Valores máximos de tensión de contacto	47
Tabla2. Resistividades típicas según el tipo de suelo o agua.	68
Tabla3. Valores típicos de resistividades de acuerdo a la naturaleza del terreno.	74
Tabla4. Arreglos alternativos de los electrodos.	83
Tabla5. Resistencia de puesta a tierra de electrodos paralelos, alineados e igualmente espaciados (L=2,4m, $\varphi = 5/8$ pulg. $R_1 = 0,425\rho$ ).	94
Tabla6. Resistencia de puesta a tierra de electrodos paralelos, alineados e igualmente espaciados (L=2,4m, $\varphi = 3/4$ pulg y $R1 = 0,413\rho$ ).	95
Tabla7. Valores máximos de resistencia de puesta a tierra.	102
Tabla8. Duraciones de falla y factores de decremento.	109
Tabla9. comparacion de resistividades entre las 2 empresas.	121
Tabla10 . Mantenimiento de un SPT.	130
Tabla11 . Convenciones.	137
Tabla12. Tabla para cálculo de conductor de malla.	139
Tabla13. Tensiones de paso y contacto permitidas.	141
Tabla14. longitudes para cálculos de diseño.	141
Tabla15. GPR para H.U.C.	142
Tabla16. Tensiones estimadas en la subestación de H.U.C.	145
Tabla17. Tensiones de paso tolerables por el cuerpo humano.	145
Tabla18. Materiales básicos de implementación de un sistema de tierra.	149

## INTRODUCCIÓN.

Los procedimientos para diseñar un sistema de tierras se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja. Los conceptos son ciencia, pero la aplicación correcta es un arte, ya que cada instalación es única en su localización, tipo de suelo, y equipos a proteger. Se puede invertir tanto dinero como se desee en un sistema de tierras, pero si no se conoce del tema da lo mismo que no invertir, un mal diseño de un sistema de tierras puede ocasionar desastres tanto en equipos como en las personas.

En este tutorial se describen los aspectos genéricos que sustentan la realización de una conexión a tierra, tales como términos más usuales en la puesta a tierra, aspectos sobre los contactos y fallas, para precisar que existen diferentes tipos de puesta a tierra. Es muy importante conocer la resistividad del terreno ya que depende de ello para que la resistencia de puesta a tierra se conserve dentro del valor deseado. Esto se profundiza en su capítulo concerniente.

La finalidad de este Tutorial no está en resaltar el aspecto económico de los diseños, sino en preparar al lector en todo lo relacionado con los conceptos y argumentos de puestas a tierra, en los diferentes esquemas de medición, en los más apropiados, en los que en realidad estén a la mano cuando se les necesite; la finalidad de este Tutorial es nutrir al lector en todos esos conocimientos, en mostrarle todos los pasos para diseñar sistemas de puesta a tierra, en denotarle todas las normativas a tener en cuenta para cada tipo de conexión en diversas entidades, en todas topologías de terrenos y su influencia en los diseños, mostrarle argumentos prácticos tomados en el campo y que sirvan de base para diseños realizados en el sector empresarial y entidades hospitalarias.

Todo lo contemplado en una aplicación práctica, que le sirva al lector para entender y confrontar más de cerca todas las pautas de diseño, concerniente a ello se anexa y se explica el diseño del sistema de puesta a tierra del HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE.

En los capítulos concernientes al finalizar se detalla como las puestas a tierra se establecen con objeto, principalmente, de limitar la tensión que, con respecto a tierra, puedan presentar en un momento dado las masas metálicas , entre distintos lugares del suelo en las inmediaciones de la puesta a tierra , asegurar la actuación de las protecciones Las puestas a tierra, a las que nos referimos en este Tutorial se aplicarán a todo elemento, o parte de la instalación, que otras disposiciones prescriban como obligatoria su puesta a tierra, siguiendo como base el reglamento técnico de instalaciones eléctricas ( RETIE).

En este Tutorial se le informa al lector como tiene que hacerse La inspección, conservación y renovación de la puesta a tierra con el objetivo de controlar el valor de la resistencia de puesta a tierra, es decir un buen plan de mantenimiento.

## **1. OBJETIVOS.**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un Tutorial de sistemas de puestas a tierra , tomando como base la información del mismo para implementación en diseño en la subestación eléctrica del HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE y de la Organización de apoyo turístico de Cartagena, contando antes con el previo estudio, análisis teórico y técnico de los sistemas actuales de puesta a tierra en general, aplicando la normativa NTC2050 y el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE; con el propósito de optimizar las instalaciones eléctricas y reducir al mínimo los problemas que una mala instalación de una puesta a tierra acarrea para cualquier empresa en general.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Informar a todo el personal que lea el Tutorial sobre todos los conceptos básicos antes de diseñar sistemas de puesta a tierra.
- Implementar el método de Wenner como base para medir resistividad de terrenos en una entidad Hospitalaria.
- Comprender de manera clara todas las técnicas de medida de resistividad de terrenos.
- Aprender a manejar a la perfección los equipos de medida de resistencia de tierras como telurómetros.
- Aprender a construir físicamente sistemas de mallas a tierra u otras configuraciones.

- Aclarar todas las técnicas de mejoramiento de resistencia de suelos con implementación práctica del producto Favigel.
- Analizar y estudiar los ejes temáticos que serán la base para la evaluación del estado de los sistemas de puesta a tierra de las empresas y entidades Hospitalarias, que nos ayuden a plantear las mejores opciones en el diseño de la puesta a tierra, así como la mejor solución de los problemas de la misma y que serán implementados en el Tutorial.
- Diseñar e implementar un Tutorial completo de puestas a tierra tomando como base diferentes modelos de fuentes bibliográficas.
- Capacitar al lector del Tutorial, en cómo se deben hacer los planes de mantenimiento de sistemas de puesta a tierra en general.
- Informar al lector de todas las normas vigentes por el ministerio de salud de Colombia, como requisito de las instalaciones eléctricas a tierra para entidades hospitalarias.

## 2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

Este estudio y análisis de los sistemas de puesta a tierra, así como la posterior implementación del Tutorial para realizar diseños y guías para la solución de problemas, se realizó con el propósito de optimizar las instalaciones eléctricas para que trabajen con mayor eficiencia disminuyendo las pérdidas causadas por la ocurrencia de fallas relacionadas, de esta manera lograríamos que las dichas instalaciones sean más fáciles de manipular y se ajusten a todos los tipos de cargas concernientes, así como el brindarles a las empresas más seguridad en instalaciones eléctricas por medio esta guía y apoyo en cuanto a esta temática, que es muy importante en una instalación eléctrica ya sea industrial u Hospitalaria y para que tengan el mayor conocimiento de las normativas que deben seguir y que deben ser cumplidas, además los problemas que acarrea el violarlas al igual que los que conlleva una mala realización e instalación de la puesta a tierra.

Se plantearán innovaciones en cuanto a los métodos convencionales ya sea lo concerniente a reducción de resistencia de terrenos, ampliar los modelos de puestas a tierra buscando la mayor eficiencia y plantear nuevas recomendaciones para la unificación de los sistemas de tierra para redes primarias y secundarias.

Evaluaremos de igual forma las consideraciones que se tienen en cuenta para las medidas de resistencias de las mallas a tierra en subestaciones o en empresas que presenten equipos especiales con apoyos en programas de simulación y si es posible el plantear novedades en cuanto a los diseños de la malla a tierra, buscando así la mayor eficiencia de lo que las convencionales puedan entregar y minimizando sus pérdidas.

Haremos énfasis y sugerencias en cuanto requerimiento de mantenimientos y mejoramientos en los sistemas de puesta a tierra con recomendaciones para la protección de equipos selección de diferentes y la seguridad de las personas, creando así dentro del Tutorial, manuales de seguridad eléctricos de puesta a tierra y definiendo diferentes esquemas de puesta a tierra de acuerdo a los equipos que se manejan y el régimen de producción, buscando siempre la mayor

seguridad del personal y con la posibilidad de que cada empresa elija el modelo a tierra al cual se ajustan en cuanto a sus equipos y configuración de red.

La implementación de este tutorial ayudara a que la empresas y entidades Hospitalarias tengan un mayor respaldo en cuanto al diseño, seguridad y la posterior instalación de una puesta a tierra, garantizando su excelente realización y la disminución de las perdidas debido a las fallas que se presentan.

### **3. MARCO DE REFERENCIA.**

#### **3.1 MARCO TEÓRICO O ESTADO DEL ARTE.**

Un Tutorial que preste capacitación al sector empresarial como al sector Hospitalario y que sea base para enseñanza estudiantil, hace parte de un paquete didáctico que tiene varios modelos las puestas a tierra, permitiendo elegir estos y diseños que mas de ajusten a sus condiciones eléctricas y de producción, además de la corrección de los problemas que acarrear la mala realización e instalación de una puesta a tierra, así como brindarles los conocimientos de las normativas importantes que deben cumplirse en cuanto al diseño e instalación de un sistema de puesta a tierra y que no deben ser violadas por razones de economía y de ahorro en cuanto a la instalación, se innovará siempre con el norte de querer la mayor eficiencia en cuantos sea posible.

La Universidad Tecnológica de Bolívar se ha caracterizado por la lucha constante hacia el bienestar académico de los estudiantes, para que estos comprendan los temas tratados en las diferentes asignaturas, y así poder formar profesionales de éxito. Actualmente en nuestra Institución se han llevado a cabo varios Trabajos de Grado, cuyo objetivo principal es afianzar la metodología de aprendizaje de las diferentes áreas. Estas son:

- **DISEÑO Y APLICACIÓN DE UN CURSO TUTORIAL DE INGENIERÍA ECONÓMICA:** fue presentado por Silvia Jiménez Benedetti.

- TUTORIAL BÁSICO PARA PROGRAMACIÓN DE PLC: fue presentado por Robinsón Arrieta Arvilla.
- TUTORIAL DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL BASADO EN GENIE: fue presentado por Liliana Ortega Pérez.
- TUTORIAL BÁSICO DE LABVIEW 6.1: fue presentado por Edwin Payares Figueroa

De igual forma el estudio de la puesta a tierra existen 2 proyectos que son:

- DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTAS A TIERRA EN LA CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR: fue presentado por Arturo Pérez Pérez.
- ESTUDIO Y DISEÑO DE LAS PUESTAS A TIERRA EN LA EMPRESA TUBOCARIBE S.A. : fue presentado por Jorge José Cabrera Domínguez

De igual forma otro aspecto que no es el objetivo principal de este Tutorial pero que si podría tenerse en cuenta, es una referencia bibliografía para la biblioteca de la Universidad Tecnológica de Bolívar y que servirá de ayuda en los conocimientos para los estudiantes que cursen la materia instalaciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra, esta materia ha sido desplazada por el poco numero de estudiantes que existen en el programa de ingeniería eléctrica y que muchos estudiante no pueden cursar por disponibilidades de la universidad. En este aspecto queremos que el modulo permita a los estudiantes y profesores de estas asignaturas guiarse detalladamente del plan de curso, el cual puede reunir contenidos teórico-prácticos conforme a la estructura y enfoque establecido por la institución. Además esta herramienta permite que el estudiante sea mas activo dentro del proceso educativo, y que se vaya reemplazando la figura del profesor como un expositor de un tema, y que el mismo se convierta poco a poco en un

investigador, capaz de construir su propio conocimiento con la asesoría del profesor.

### **3.2. MARCO CONCEPTUAL.**

- **Que es un Tutorial y su historia?**

Un tutorial es una lección educacional que conduce al usuario a través de las características y funciones más importantes de cosas como aplicaciones de software, dispositivos de hardware, procesos, diseños de sistema y lenguajes de programación.

Un tutorial normalmente consiste en una serie de pasos que van aumentando el nivel de dificultad y entendimiento. Por este motivo, es mejor seguir los tutoriales en su secuencia lógica para que el usuario entienda todos los componentes.

El término se utiliza mucho en Internet, ya que hay muchos sitios web que ofrecen tutoriales, desde cómo codificar en html a cómo hacer que una tarjeta gráfica funcione más rápido (overclocking). Aunque un tutorial también puede presentarse en impreso en papel, el término se utiliza normalmente para referirse a los programas de aprendizaje online.

Puede definirse como un libro de instrucciones o programa que guía al usuario a través de una secuencia predeterminada de pasos con el fin de aprender un producto. Nótese la diferencia con documentación, la cual, aunque es de naturaleza instructiva, tiende a agrupar las características y las funciones por categoría.

Sus orígenes e historia se remota a los años 60, La primera especulación escrita sobre el tutorial se atribuye a un pionero científico informático con el inusual nombre de Vannevar Bush<sup>1</sup>, aunque él no usaba esta palabra y pasarían dos décadas hasta que alguien lo hiciera. En la edición de la revista The Atlantic Monthly<sup>2</sup> de julio de 1945, Bush sentó las bases de lo que se conocería después como tutorial en un artículo titulado "As We May Think". Lo que le preocupaba a

---

<sup>1</sup> Jeje del departamento de investigación y desarrollo científico de EE.UU en 1945

<sup>2</sup> Revista Americana de distintos tópicos(política, arte, ciencias).

Bush era la discrepancia entre el creciente almacén del saber humano y las inadecuadas herramientas para acceder a él. "Los métodos que utilizamos para orientarnos en el laberinto hacia el asunto que nos interesa", escribió, "son los mismos que utilizábamos en tiempos de los barcos de vela."

Bush empezó por mirar cómo funcionaba la mente, observando que "opera por asociación. Con un asunto entre manos, salta inmediatamente al siguiente que le sugiere la asociación de ideas". Un sistema de recuperación de información debería seguir un perfil similar, siendo capaz de conectar asuntos relacionados. Estos pensamientos llevaron a Bush a imaginar un invento (haciendo algo similar a lo que Einstein llamaba "un experimento del pensamiento"): "Consideremos un aparato futuro de uso individual que es una especie de archivo privado mecanizado y biblioteca. Necesita un nombre, por decir uno al azar, valdrá "tutux". Un tutux es un aparato en el que una persona almacena todos sus libros, archivos y comunicaciones y está mecanizado de modo que puede consultarse con excelente velocidad y flexibilidad. Es un suplemento aumentado íntimo de su memoria."

Lo que Bush veía mentalmente es en parte un PC contemporáneo y en parte un sofisticado programa de hipertexto. El modo en que describe el uso de su tutux es una descripción perfecta de cómo un lector contemporáneo se mueve por el tutorial: "...construye un camino a través del laberinto de materiales disponibles siguiendo su propio interés."

Conceptualmente al menos, estas aplicaciones ya estaban en la mente de Vannevar Bush cuando la Segunda Guerra Mundial estaba terminando. Pero aunque otros científicos estaban intrigados por las ideas de Bush, pasaron dos décadas hasta que Ted Nelson<sup>3</sup>, un joven que había dejado la escuela, dio con el término que permanecería. El hipertexto nació oficialmente en 1965.

---

<sup>3</sup> Estadounidense pionero de los tutoriales, lo definió en 1965.

A lo largo de los 60, Nelson experimentó con diversas formas de conectar fragmentos de información del mismo modo que describía el tutux de Bush.

Mientras Nelson desarrollaba en solitario sus ideas sobre el tutorial, se hizo popular el CAI (Computer Aided Instruction). Era un método de enseñanza en el que los estudiantes aprendían haciendo elecciones sobre una oferta de opciones.

A pesar de tener reglas más estrictas y más control profesoral del que Nelson quería, CAI sugería el modo en que después los lectores se moverían por el tutorial. Nelson se familiarizó con la metodología y aprendió de ella. Al final de la década, invitaron a Nelson a participar en un proyecto de la Brown University destinado a desarrollar un sistema rudimentario de edición tutorial.

Así que podemos darle a Vannevar Bush el premio "primero en publicar" y a Ted Nelson el de "primero en acuñar el término y conseguir extenderlo" en la historia del Tutorial.

Así que podemos darle a Vannevar Bush el premio "primero en publicar" y a Ted Nelson el de "primero en acuñar el término y conseguir extenderlo" en la historia del Tutorial.

#### **4. DESCRIPCIÓN DEL TUTORIAL.**

Un Tutorial es una lección educacional que conduce al usuario a través de las características y funciones más importantes de temas, con aplicaciones en particular. Normalmente consiste en una serie de pasos que van aumentando el nivel de dificultad y entendimiento. Por este motivo, es mejor crear y seguir los tutoriales en su secuencia lógica para que el usuario entienda todos los componentes. Se presenta un tutorial de sistemas de puesta a tierra para cualquiera persona relacionada con rama de la ingeniería eléctrica, personal técnico – tecnólogo u otra persona que desee aprender del tema.

El tutorial enseña al lector empezando desde la manera mas básica, con definiciones y teoría relacionada con sistemas de puesta a tierra, todos esos argumentos científicos e información detallada , nutren al lector de todos los

conocimientos básicos multidisciplinares antes de implementar un sistema de puesta tierra.

Una vez el lector ha comprendido en su totalidad todos los fundamentos de sistemas de puesta a tierra, maneja todas las definiciones y plantea hipótesis de la teoría planteada, puede inspeccionar todos los métodos existentes para la medición de resistencia y resistividad.

Concorde a esto, la primera parte del tutorial comprende todas esas definiciones y conceptos básicos a tener en cuenta en el diseño de una puesta a tierra.

La segunda parte le enseña al lector todos los métodos de medida de resistencia de terrenos y resistividad, muestra todos los factores que intervienen en la medición y en los cálculos finales, todos los planteamientos matemáticos ingenieriles con los que se pueden representar los sistemas de tierra, todas la configuraciones comunes, y le muestra al lector un antemano de los pasos de diseño.

Se busca un mayor entendimiento y manejo del tema del lector, a través de pruebas y diseños en diferentes tipos de terreno en diferentes entidades prestadoras de servicio en ciudad de Cartagena, la idea es que el lector se ubique mas, en la importancia de las topologías de suelos y se centre en los diferentes esquemas de conexión para aplicación en diferentes entidades (empresariales y hospitalarias), cuando valla a realizar un diseño concerniente.

Se le muestra al lector una serie de comparaciones en base a las medidas tomadas, para que confronte su teoría con datos prácticos y saque sus propias conclusiones al momento de diseñar.

Como fuente de aplicación del tutorial se realiza el diseño del sistema de puesta a tierra del HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE, detallando todos los pasos desarrollados, estos se resaltan en la quinta sección del documento.

Como normas complementarias a tener en cuenta al diseñar el sistema eléctrico de la entidad hospitalaria, se anexa en el tutorial un resumen de las normativas del ministerio de salud de la republica de Colombia en sistemas de puesta a tierra. El

diseño del Hospital se hace en base a estas normas y cumple a cavidad con todos los requisitos de conexión y operación.

El presente tutorial también pretende ser un documento que facilite el correcto uso y el adecuado mantenimiento de los sistemas de puesta a tierra, es por esto que en este tutorial con aplicación se anexa una sección pertinente a este tema.

El tutorial es el documento base del HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE y de la ORGANIZACIÓN DE APOYO TURISTICO (entidades donde se desarrollaron las pruebas y se aplica el tutorial), con el objeto de mantener a lo largo del tiempo las características funcionales y estéticas inherentes al sistema de puesta a tierra proyectado, recogiendo las instrucciones de uso y mantenimiento presentes en el tutorial.

Una vez leído en su totalidad el tutorial, el lector debe estar en la capacidad de diseñar sistemas de puesta a tierra para entidades hospitalarias en diferentes topologías de terreno, con su respectivo esquema de conexión y debe estar en capacidad de realizar programas de mantenimiento de sistemas de puesta a tierra en diferentes clases de suelos

## **5. CAPITULO I.**

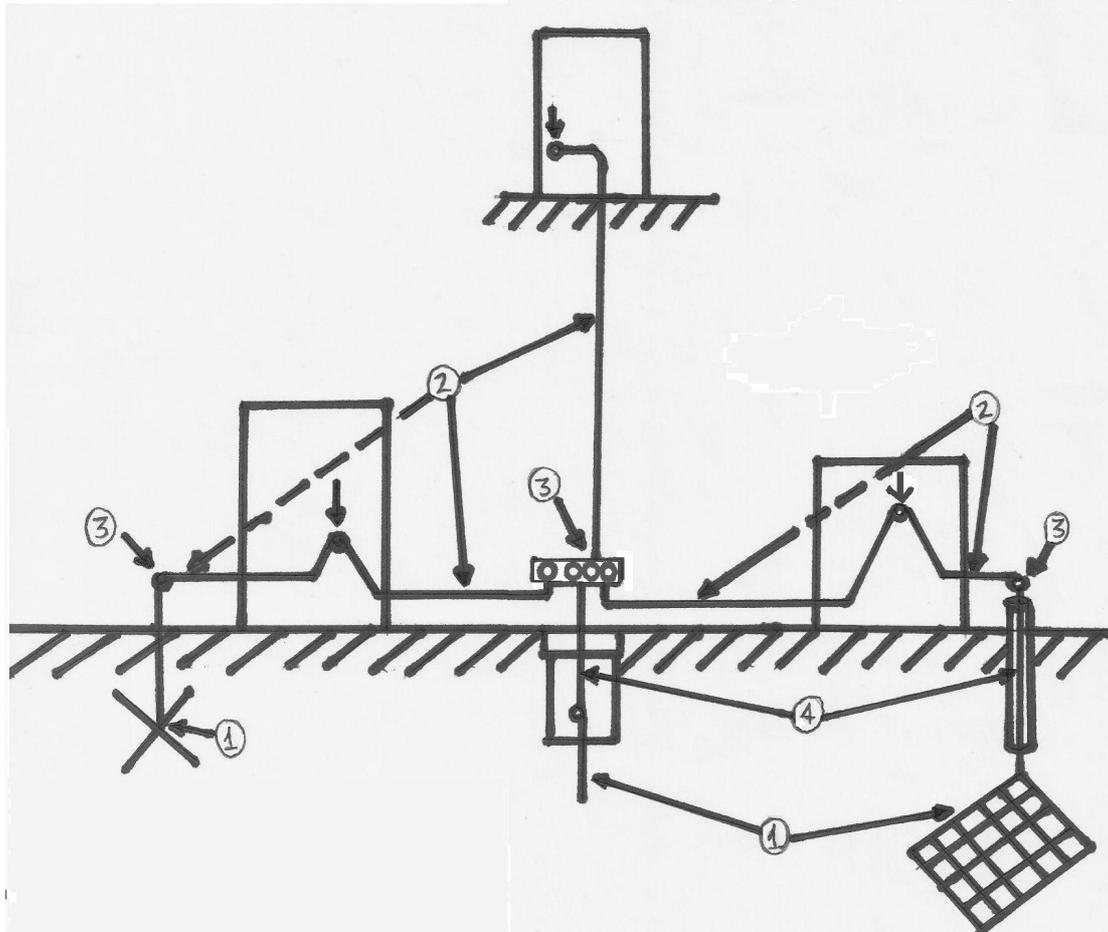
### **GENERALIDADES Y CONEXIONES DE SISTEMAS A TIERRA.**

#### **5.1 DEFINICIONES Y TERMINOS.**

Puesta a tierra: 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 que no existan diferencias

de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falta o la de descarga de origen atmosférico.

Figura1. Esquema de una instalación de puesta a tierra y partes que comprende.



Rogelio García Márquez. “La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el RAT”.p.13.

### 1. Electrodo de puesta a tierra.

Conductor o conjunto de conductores enterrados, que sirven para establecer una conexión con tierra. Los conductores no aislados, colocados en contacto con tierra, para la conexión al electrodo se consideran parte de este.

## **2. Línea de tierra.**

Es el conductor o conjunto de conductores que une(n) el electrodo de tierra con una parte de la instalación que se haya de poner a tierra, siempre y cuando los conductores estén fuera del terreno o colocados en el pero aislados del mismo.

## **3. Punto de puesta a tierra.**

Es un punto, situado generalmente fuera del terreno, que sirve de unión de las líneas de tierra con el electrodo, directamente o a través de líneas de enlace con el.

## **4. Línea de enlace con el electrodo de puesta a tierra.**

Cuando existiera punto de puesta a tierra, se denomina línea de enlace con el electrodo de tierra a la parte de la línea de tierra comprendida entre el punto de puesta a tierra y el electrodo, siempre que el conductor este fuera del terreno o colocado aislado del mismo.

### **▪ Términos :**

**Borne de tierra:** Terminal provisto en un material o dispositivo y destinado para conectarse eléctricamente a la instalación de puesta a tierra.

**Bobina de choque:** Elemento acoplador que puede utilizarse para interconectar los sistemas de puesta a tierra de potencia y de equipo sensible, o para reducir ruidos eléctricos en la alimentación de equipo sensible.

**Borne equipotencial:** Terminal provisto en un material o dispositivo y destinado para conectarse eléctricamente a la red de conexión equipotencial.

**Conexión a tierra:** Medio destinado a asegurar, por una conexión especialmente diseñada (soldadura exotérmica, conector de presión o de cuña certificado, abrazadera certificada), dos o más componentes de un sistema de puesta a tierra.

**Caída de potencial o tensión:** Es la diferencia entre las tensiones medidas en dos puntos diferentes de una línea en un momento dado.

**Cable de tierra aéreo:** Conductor intencionalmente puesto a tierra en algunos o en todos los soportes de una línea aérea, el cual está generalmente dispuesto sobre los conductores de línea, aunque no siempre es así.

**Contrapeso:** Conductor o sistema de conductores enterrado en el suelo y que interconecta eléctricamente las bases de los soportes de una línea aérea.

**Conductor de tierra de equipo:** Conductor utilizado para conectar las partes no portadoras de corriente (de tuberías, conductos y envolventes de equipos), al electrodo de puesta a tierra en el equipo de acometida (panel principal) o en el secundario de un sistema derivado.

**Conductor de protección:** Conductor previsto con fines de seguridad, por ejemplo, para la protección contra los choques eléctricos.

**Conductor de puesta a tierra:** Conductor que garantiza un camino conductor, o una parte del camino conductor, entre un punto dado de una red, de una instalación, o de un material y una toma (electrodo) de tierra.

**Electrodo de puesta a tierra:** Elemento o conjunto de elementos de un sistema de puesta a tierra que aseguran un contacto eléctrico directo con el suelo y dispersan en ella la corriente de la descarga atmosférica.

**Electrodos verticales o jabalinas:** Son simples varillas metálicas cilíndricas de pequeño diámetro que se instalan verticalmente en el suelo, ya sea por clavado directo o por embutimiento en el relleno de un pozo.

**Electrodos horizontales o pletinas o contrapesos:** Son simples pletinas o conductores cableados de mediano diámetro equivalente, que se instalan horizontalmente en el suelo, por embutimiento en el relleno de una zanja.

**Electrodos mixtos:** Son electrodos conformados por elementos verticales y horizontales sólidamente unidos entre sí, que se configuran según los requerimientos de dispersión o control de la corriente evacuada a tierra.

**Gradiente de potencial:** Es la pendiente del gráfico de perfil de potencial (tensión), cuya trayectoria intercepta en ángulo recto las líneas que se encuentran a igual potencial en un instante dado.

**Impedancia:** Una cantidad compleja cuyo coeficiente es el módulo de la impedancia, cuyo argumento es el ángulo de fase de la tensión menos el ángulo de fase de la corriente. También, se define como la oposición total a una corriente alterna. Se presenta por  $Z$  y se expresa en ohm. Puede consistir sólo en resistencia, reactancia, reactancia inductiva, reactancia capacitiva o una combinación de estos efectos.

**Impedancia de puesta a tierra:** Impedancia a una frecuencia dada entre un punto específico de una red, de una instalación o de un equipamiento y la tierra de referencia.

**Lazo de tierra:** Lazo potencialmente dañino que se forma cuando en un sistema eléctrico dos puntos, o más, que están nominalmente al potencial de tierra quedan conectados de tal forma por una trayectoria conductora que uno de ellos, o todos, ya no están al mismo potencial de tierra.

**Malla de tierra:** Sistema de electrodos de tierra horizontales consistente en un número de conductores desnudos interconectados y enterrados en el suelo, los

que proporcionan una tierra electrotécnica común para los dispositivos eléctricos o las estructuras metálicas, usualmente en un lugar específico.

**Puesta a tierra antiestática:** Sistema de puesta a tierra diseñado y construido para desviar hacia el suelo los potenciales originados por fenómenos de electricidad estática, por su gran riesgo de producir daños a equipos sensibles

**Puesta a tierra de resistencia baja:** Sistema puesto a tierra a través de una resistencia insertada intencionalmente que tiene un valor óhmico pequeño seleccionado para proporcionar la corriente deseada para los relés

**Puesta a tierra de resistencia alta:** Sistema puesto a tierra a través de una resistencia insertada intencionalmente que limita la corriente de falla a tierra, de manera que la corriente puede fluir durante un período prolongado sin incrementar el daño. Este nivel de corriente es comúnmente de 10 A o menos.

**Puesta a tierra reactiva:** Puesta a tierra a través de una impedancia, cuyo elemento principal es una reactancia inductiva.

**Puesta a tierra resistiva:** Puesta a tierra a través de una impedancia, cuyo elemento principal es una resistencia.

**Relleno de puesta a tierra:** Mezcla de tierra fina propia de la excavación y/o tierra fina de otra procedencia (no tierra de cultivo) con aglutinantes naturales y complemento localizado de sales inocuas, que permitan obtener bajas resistencias de dispersión.

**Resistencia a tierra:** Parte real de la impedancia a tierra.

**Resistividad del terreno:** Resistencia de una muestra característica de suelo.

**Resistencia total de puesta a tierra:** Resistencia entre el terminal principal de tierra y la Tierra.

**Red de tomas a tierra:** Parte de una instalación de puesta a tierra que incluye solamente las tomas de tierra y sus interconexiones.

**Retorno de tierra:** Camino conductor eléctrico formado por la Tierra entre instalaciones de puesta a tierra

**Tierra:** Conexión conductora, intencional o accidental, por la cual un circuito o material eléctrico se conecta a tierra, o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que sirve como tierra.

**Tierra local:** Parte de la Tierra que está en contacto eléctrico con un electrodo de tierra y cuyo potencial eléctrico no es necesariamente igual a cero.

**Tierra remota:** Sistema de puesta a tierra alejado del sistema considerado, para el cual se asume que su potencial es cero y que no presenta interferencia.

## **5.2 JUSTIFICACION Y OBJETIVO DE LAS PUESTAS A TIERRA.**

Las puestas a tierra se establecen con objeto, principalmente, de limitar la tensión que, con respecto a tierra, puedan presentar en un momento dado las masas metálicas, entre distintos lugares del suelo en las inmediaciones de la puesta a tierra y conducir a tierra todas las corrientes anormales que se originan como consecuencia de carcadas de los equipos eléctricos energizados. Otro objetivo importante es evitar que aparezcan tensiones peligrosas para la vida humana en las carcadas metálicas de los equipos eléctricos.

Un buen sistema de puesta a tierra es importante y necesario para mantener buenos niveles de seguridad del personal, operación de los equipos y desempeño de los mismos.

En sistemas de potencia la puesta a tierra mantiene la referencia necesaria. La forma en que el sistema se conecta a tierra puede tener un gran efecto en la magnitud de los voltajes de línea a tierra que deben ser mantenidos en condiciones normales y bajo condiciones transitorias. En sistemas no puestos a tierra, algunas tensiones pueden provocar fallas en el aislamiento de los equipos y sistemas. La puesta a tierra del neutro del sistema permite la operación de sistemas de protección basados en la detección de corrientes que circulan por la misma, despejándose así el circuito bajo falla.

La puesta a tierra de los equipos se refiere a la conexión intencional de las carcasas, estructuras metálicas no portadores o transmisores de corriente de los mismos, para lograr los siguientes propósitos:

- Mantener una diferencia de voltaje baja entre las diferentes estructuras metálicas con lo que se busca resguardar al personal de cualquier choque eléctrico.
- Contribuir a un mejor desempeño de los sistemas de protección.
- Evitar incendios provocados por materiales volátiles o la combustión de gases al proveer un camino efectivo y seguro para la circulación de corrientes de falla y descargas atmosféricas y estáticas y así eliminar los arcos y elevadas temperaturas en los equipos eléctricos, que pueden provocar tales incendios.

Estas son, entre otras, en general las razones que muestran la importancia que juega la debida instalación de las puestas a tierra así como la necesidad de un buen sistema de puesta a tierra como de su mantenimiento.

La conexión a tierra de las instalaciones es un hecho obligatorio según lo exige la normativa NTC 2050 y el RETIE, se deben cumplir con diversos requisitos para su instalación y óptimo funcionamiento, entre los que se mencionan:

#### **Requisitos de un sistema de puesta a tierra.**

- Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- Presentar mínima variación de la resistencia debida a cambios ambientales.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Tener suficiente capacidad de conducción y disipación de corrientes de falla.
- Ser resistente a la corrosión.
- Tener facilidad de mantenimiento.
- Se deben tener en cuenta las normas técnicas NTC relacionadas con el tema.

#### **Consecuencias de no tener puesta a tierra.**

En general el no poseer puestas a tierra trae como consecuencia:

- Discontinuidad en el servicio.
- Fallas múltiples a tierra (fase- tierra; fase- fase).
- Posibilidad de incendios por arcos.
- Hace más difícil la localización de fallas.
- Puede generar tensiones anormales.
- Sobretensiones del sistema de potencia.
- Incremento de costos.
- Inseguridad para las personas.

### 5.3 CRITERIOS DE SEGURIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS.

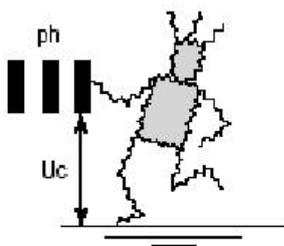
Para seguir una filosofía de seguridad es importante contar con todos los conceptos básicos y definiciones que se adoptan en las normativas y reglamentos relacionados con las instalaciones de puesta a tierra, conceptos como tensiones de paso y contacto existentes en la misma y los valores aplicados de esas tensiones al ser humano, facilitándose algunos ejemplos y expresiones sencillas que pueden tomarse como referencias.

El uso de bajas tensiones de seguridad " $< 25$  (v)" es la solución más eficiente y radical, puesto que elimina totalmente el riesgo eléctrico, pero sólo es posible aplicar en la distribución de pequeñas potencias. En el uso normal de la energía eléctrica, diversos han sido los estudios que han permitido distinguir los diversos fenómenos eléctricos según su origen para, así poder aplicar la solución correspondiente. Los contactos o choques eléctricos se originan de dos modos diferentes:

#### 5.3.1 EL CONTACTO DIRECTO.

Se trata del contacto accidental de personas con un conductor activo o con una pieza conductora que habitualmente está con tensión. Cuando el riesgo es muy importante, la solución sencilla consiste en distribuir la energía eléctrica a una tensión no peligrosa. En BT (220/440 V), las medidas de protección consisten en poner las partes activas fuera del alcance o aislarlas mediante aislantes, envolventes o barreras.

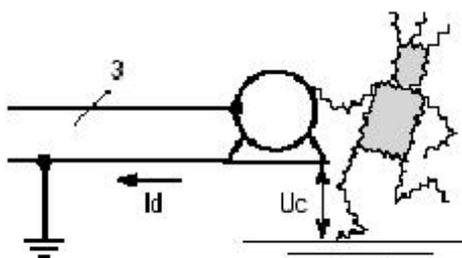
Fig2. Contacto directo



### 5.3.2 EL CONTACTO INDIRECTO.

El contacto de una persona con masas metálicas accidentalmente puestas bajo tensión se denomina contacto indirecto. Esta conexión accidental a la tensión es provocado por un defecto de aislamiento. Por lo cual, circula una corriente de defecto y provoca una elevación de la tensión entre la masa del receptor eléctrico y tierra, aparece una tensión de defecto que es peligrosa si es mayor a la tensión  $U_L$  "Tensión de contacto máxima admisible".

Fig3. Contacto indirecto



### 5.3.3 TENSIÓN DE PASO.

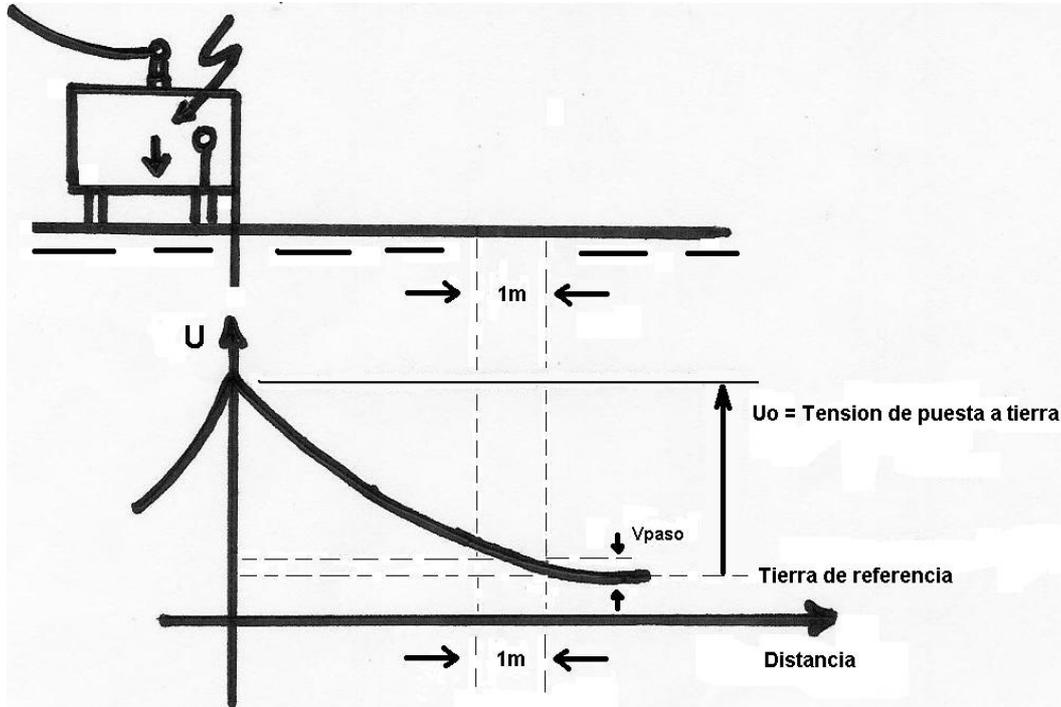
Definición de la IEEE Standard 81<sup>4</sup>

"La tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, que se asimila a un metro, en la dirección del gradiente de potencial máximo".

El gradiente de potencial en una región coincide, prácticamente con el valor mas elevado, que puede alcanzar la tensión de paso, que adquiere sus valores mas elevados en las proximidades inmediatas de los electrodos de puesta a tierra. Se puede notar en la Fig4 que la tensión de paso  $V_p$  es una fracción de la tensión de puesta a tierra,  $U_o$ .

<sup>4</sup> ANSI/IEE STD81- Institution of Electrical Engineers

Fig4. Se representa el perfil de potenciales en torno a un electrodo vertical de puesta a tierra, pudiendo comprobarse la proporción entre  $V_p$ (tensión paso) y  $U_o$ .



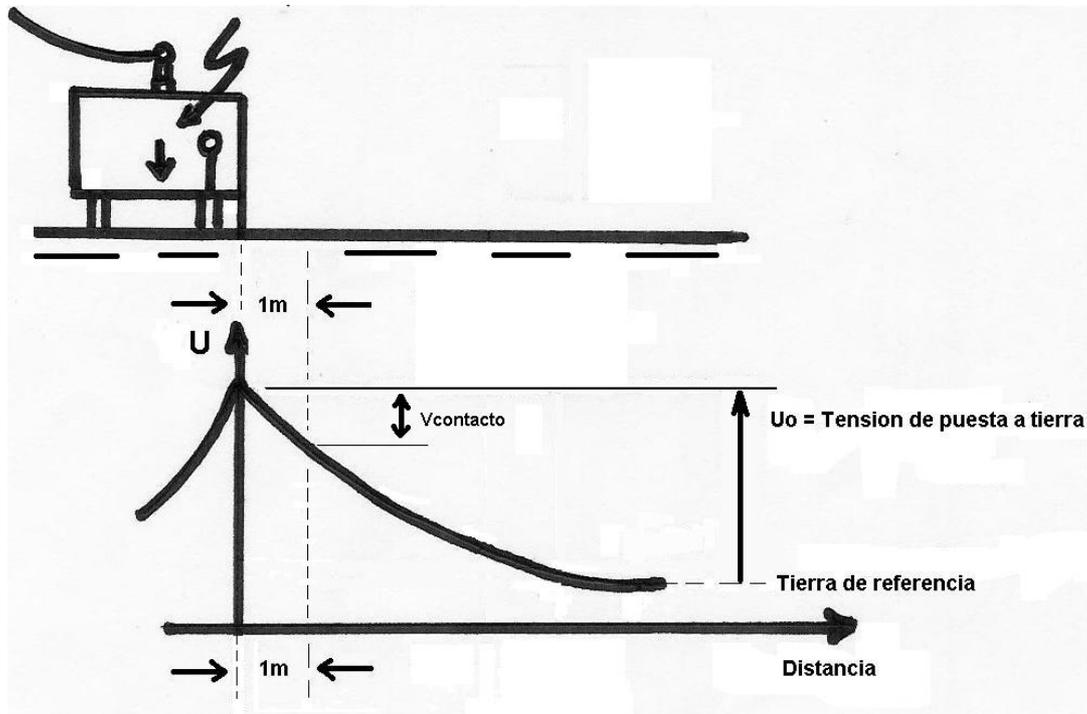
Rogelio García Márquez. “La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el RAT”.p.34.

### 5.3.4 TENSIÓN DE CONTACTO.

Es importante mencionar que en la mayor parte de los casos, el peligro mas grande de las personas durante la circulación de una corriente de puesta a tierra no resulta de las tensiones de paso sino del doble contacto con el cuerpo, por una parte con una estructura unida a los electrodos de tierra por sus superficies de apoyos o fijación, a la tensión  $U_o$  y por otra parte, la del terreno  $U_x$ , a una distancia del orden del metro, en un lugar donde este potencial difiera de  $U_o$ .

El riesgo esta, entonces, en relación con la tensión  $U_o - U_x$ , o tensión de contacto  $V_c$  como se muestra en la Figura5, que puede alcanzar en determinadas situaciones, una fracción importante de la tensión total,  $U_o$ .

Figura5. Sobre el mismo perfil de potenciales de la figura anterior, esta indicada esta diferencia de potencial preexistente, es decir, antes de presencia de la persona  $V$ , destacándose su proporción respecto a  $U_0$ .



Rogelio García Márquez. "La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el RAT".p.37.

La IEEE Std 81 la define de esta forma.

"la tensión de contacto es la diferencia de potencial entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia igual a la distancia horizontal máxima que se puede alcanzar, aproximadamente, 1 metro".

### 5.3.5 TENSIÓN TRANSFERIDA o GPR(GROUND POTENTIAL RISE).

Esta tensión es un caso especial de la tensión de contacto donde un voltaje es transferido hacia dentro o hacia fuera de la subestación.

Este tipo de tensiones comunicadas al suelo en lugares alejadas son las que se conocen como tensiones transferidas. La elevación natural de potencial en lugares relativamente alejados de una toma de tierra por la que circule una fuerte corriente

de falla puede ser importante. De hecho los terrenos raramente son homogéneos y la propagación de la corriente cesa de ser radial a una cierta distancia de la toma de tierra. Es un hecho experimental que, a menudo, las corrientes en el suelo pasan desapercibidas a distancias importantes del lugar donde se produce una falta de aislamiento por el valor, generalmente débil, de los gradientes locales, unido a otros factores que hacen los accidentes pocos probables como son la existencia de resistividad de un determinado terreno y la distribución en el mismo de la corriente de falla tales que puedan darse puntos con altos gradientes de potencial, presencia de la persona en un punto donde sea alto el potencial, duración de la falla y del contacto del cuerpo el tiempo suficiente que se superen los valores admisibles de seguridad, entre otros.

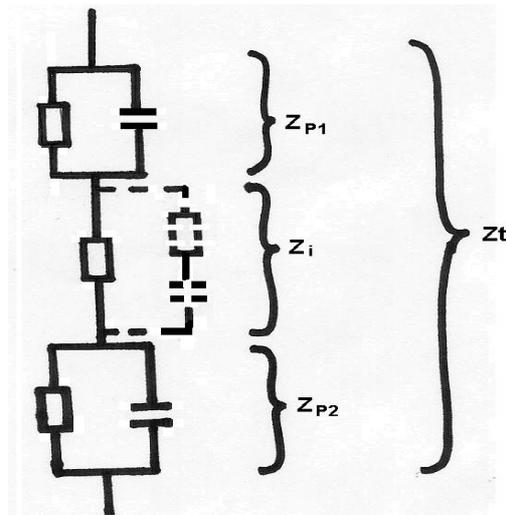
Es importante poner atención a estos problemas cuando las corrientes evacuadas son muy elevadas, principalmente en zonas de alta resistividad, sobre todo cuando el terreno es heterogéneo, en que fallas húmedas puedan concentrar altas corrientes o bien, cuando existen canalización susceptibles de llevar puntos no muy separados físicamente a potenciales muy diferentes.

### **5.3.6 Tensión Máximas Aplicables al Cuerpo Humano.**

Resulta mas efectivo y cómodo a la hora de realizar un diseño de instalaciones no tomar como referencia una curva de seguridad  $i = f(t)$ , sino definir los criterios de seguridad por el valor de la tensión en función del tiempo, a cuyo efecto deben tenerse en cuenta los valores de la resistencia del cuerpo humano, la cual varia con la tensión de contacto aplicada.

La siguiente grafica muestra una analogía de la resistencia del cuerpo humano

Figura6. Equivalente circuital de la impedancia del cuerpo humano.  $Z_i$ : impedancia interna,  $Z_{p1}$ ,  $Z_{p2}$ : impedancia de la piel, en las zonas de entrada y salida de la corriente.  $Z_t$ : impedancia total( $Z_i + Z_{p1} + Z_{p2}$ ).



Rogelio García Márquez. "La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el RAT".p.42.

La resistencia del cuerpo humano, es un parámetro importante que define que tanto afecta el paso de la corriente por una persona aclarando de que es una condición fisiológica del sujeto lo cual es muy variable así como los parámetros físicos del accidente que se presente, tensión, tipo de contacto.

Este esquema es el resultado de muchas medidas y estudios realizados durante muchos años y es una aproximación de lo que representa la impedancia del cuerpo humano y que ha ayudado de igual forma para la elaboración de normativas.

Como puede verse en la figura, la impedancia comprende 3 partes: las dos impedancias de la piel,  $Z_{p1}$  y  $Z_{p2}$ , al nivel de los puntos de contacto y la impedancia interna,  $Z_i$ .

La suma vectorial de la impedancia interna del cuerpo y las de la piel constituye la impedancia total,  $Z_t$ , del cuerpo humano.

La impedancia interna puede considerarse como resistiva, principalmente, su valor depende, esencialmente del trayecto de la corriente y en cierta medida de la superficie del contacto, pero las mediciones parecen indicar que posee, también una componente capacitiva.

Las dos impedancias de la piel, pueden considerarse como una red de resistencias y capacitancias, debiendo resaltarse que para diferencias de potencial de contacto algunas decenas de voltios, su valor varia ampliamente con la superficie de contacto, la temperatura, la transpiración, etc, incluso para una misma persona. Para diferencias de potencial de contacto entre 50 y 100V disminuye considerablemente y es despreciable después de la perforación de la misma. En el instante en que se aplica la diferencia de potencial de contacto, las capacitancias del cuerpo están descargadas y presentan una impedancia nula, por lo que las Z también lo son y la resistencia inicial que presenta el organismo es , prácticamente Zi.

La tensión máxima de contacto aplicada al ser humano, que se acepta en cualquier punto de una instalación, 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 Reglamento la tensión máxima de contacto o de toque no debe superar los valores dados en la siguiente tabla tomada de RETIE.

<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
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

Tabla1. Valores máximos de tensión de contacto.

#### **5.4 CONEXIONES TÍPICAS DE ATERRIZAMIENTO DEL NEUTRO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.**

El neutro de un transformador o maquinas rotativas puede adoptar diferentes formas de tratamiento. De este hecho se deriva el que se hayan normalizado tres tipos de conexión a tierra " normalizados a nivel internacional. Es importante

mencionar que aunque a nivel internacional se hayan normalizado en general estos 3 tipos de conexión a tierra, cada país apoyándose en su normativa escoge el tipo de conexión mas apropiada y lo exige en sus normativas buscando siempre la seguridad y mayor eficiencia en sus instalaciones, en el caso de Colombia el tipo de conexión del neutro es sólido a tierra o TN-C como se mencionara mas adelante.

#### **5.4.1 SISTEMAS ELÉCTRICOS CON NEUTRO AISLADO IT.**

##### **Principio**

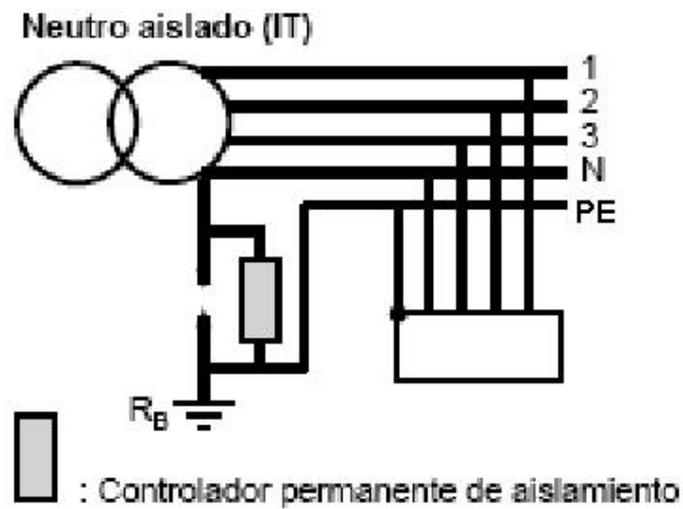
- El neutro del transformador no está conectado a tierra. En teoría está aislado de la tierra. Pero, está naturalmente conectado a tierra a través de las capacitancias parásitas de los cables de la red y/o voluntariamente mediante una impedancia de valor elevado, aproximadamente unos  $1500 \Omega$  (neutro impedante).
- Las masas de los receptores eléctricos están conectadas a tierra.
- El retorno de corriente de fallas monofásicas a tierra es de pequeña intensidad.
- El sistema no presenta seguridad, pero es confiable.

En Colombia actualmente este tipo de conexión a tierra, no se usa, con el tiempo ha ido desapareciendo esto debido a las desventajas que presenta y a la falta de coordinación con las protecciones, ya que cuando se presentan fallas con niveles muy bajos de corrientes, las protecciones no detectan las falla, por lo que la falla permanece sin ser detectada, mientras la continuidad del servicio permanece estable. O si alguna protección detecta la falla, no hay selectividad y se requiere desconexión secuencial de los circuitos, para determinar el circuito fallado.

Cabe anotar que en la NTC2050 se hace referencia en la sección 250-153, lo establecido para la puesta a tierra de instalaciones y circuitos de alta tensión, con sistemas puesto a neutro a través de impedancia, pero como se menciono

anteriormente ya no es muy usado en la actualidad, por las desventajas que presenta se esta implementando el neutro puesto solidamente a tierra o TN-S.

Figura7.Conexión IT.



Schneider electric. "cuaderno técnico #114" .p. 64.

#### 5.4.2 SISTEMAS ELÉCTRICOS CON NEUTRO A TIERRA.

En estos sistemas con neutro a tierra podemos encontrar 2 tipos de esquemas de conexión a tierra ECT generales, el TN y TT.

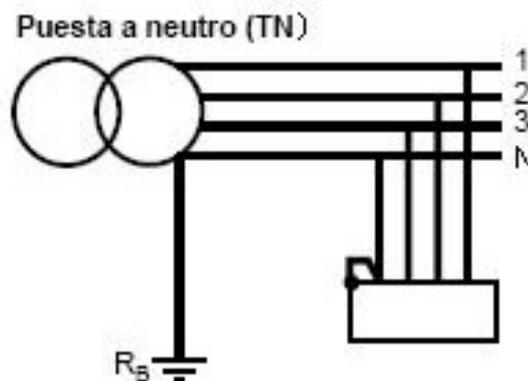
##### 5.4.2.1 CONEXION TN.

###### Principio.

- El neutro del transformador se conecta a tierra.
- Las masas de los receptores eléctricos están conectadas al neutro.

- Las tensiones están referidas a tierra directamente a través del neutro puesto a tierra.
- El retorno de corrientes de falla es de gran intensidad.
- Sistema presenta seguridad, pero no confiabilidad.

Figura8. Conexión TN.



Schneider electric. "cuaderno técnico #114" .p. 65.

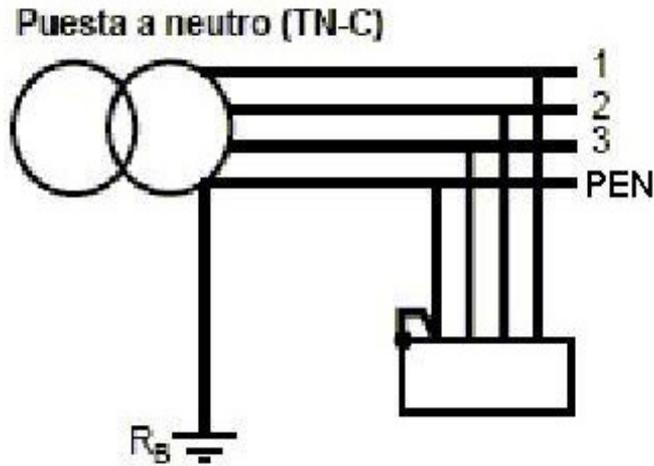
Este esquema en Colombia no es usado, en la actualidad el tipo de conexión a tierra son el neutro sólido a tierra o TN-S como se mencionara en el numeral siguiente, a pesar de que el neutro este aterrizado, su desventaja es que las masas están conectadas al neutro lo que se convierte en un factor muy peligroso debido a que caso de falla de aislamiento entre la alta tensión y las masas de esa instalación, la interconexión de la tierra del neutro de baja tensión con la tierra de las masas de la instalación propagaría a aquellos un potencial que podría, en ciertos casos, ser excesivos.

Para este misma conexión TN, existe una subclasificación de donde se obtienen el tipo de conexión TN-C y el tipo de conexión TN-S

#### 5.4.2.1.1 CONEXIÓN TN-C.

Un único y mismo conductor sirve de neutro y de conductor de protección.

Figura9. Conexión TN-C.

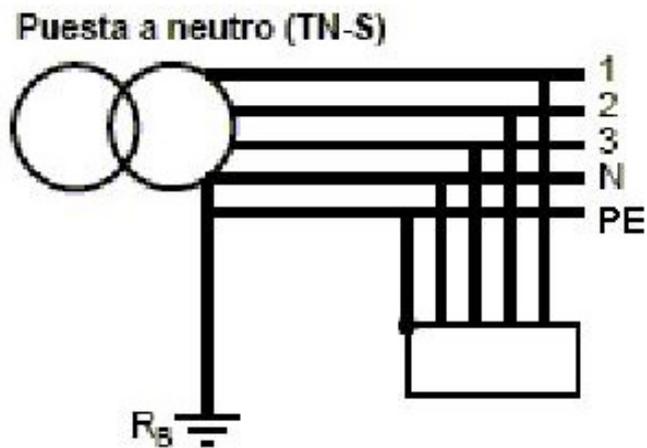


Schneider electric. "cuaderno técnico #114" .p. 65.

#### 5.4.2.1.2 CONEXION TN-S.

El neutro y el conductor de protección están diferenciados físicamente, existe un neutro independiente del conductor de protección, o sea 2 por aparte, a diferencia del TN-C, donde solo existe un conductor que sirve de neutro y de conductor de protección.

Figura10. Conexión TN-S.



Schneider electric. "cuaderno técnico #114" .p. 66.

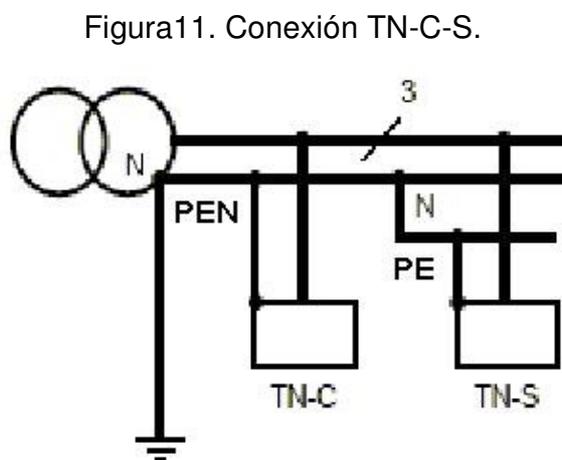
En Colombia el tipo de conexión mas utilizado actualmente es este tipo, o mas conocido como neutro sólido a tierra, la normativa NTC2050 muestra todas las normas para la conexión a tierra del neutro y de circuitos así como de equipos. En su sección 250 en la numeral A, indica todos los circuitos que se deben aterrizar y los que no y en el numeral G para la conexión de la puesta a tierra de los descargadores de sobretension, o la sección 7.2.3 de la NTC4552 y para instalaciones y circuitos de alta tensión en la sección 250-152.

En la industria se pone a tierra el neutro para limitar la corriente de falla, por lo cual lo convierte en una ventaja con respecto al neutro aislado IT y en cuanto a seguridad con respecto al TN, porque la tierra de las masas están conectadas a una toma de tierra independiente del aterrizamiento del neutro lo que evita la propagación de potencial entre ellos.

Se puede usar también la coexistencia simultánea de estas conexiones llamado TN-C-S.

#### 5.4.2.1.3 ESQUEMA TN-C-S.

Consiste en que el neutro y el conductor de protección están separados aguas abajo de una parte de una instalación hecha en TN-C. Hay que indicar que el TN-S no puede estar aguas arriba del TN-C.



Schneider electric. "cuaderno técnico #114" .p. 66.

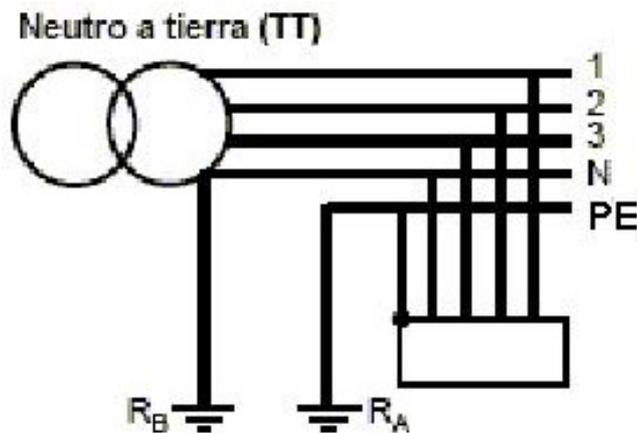
#### 5.4.2.2 CONEXION TT.

Este es un sistema donde la alimentación se pone a tierra en un único punto, pero la instalación del cliente, la pantalla del cable y las partes metálicas expuestas están conectadas a tierra vía un electrodo separado, que es independiente del electrodo de alimentación.

#### Principio

- El neutro del transformador está conectado a tierra.
- Las masas de los receptores eléctricos están también conectadas a una toma de tierra.

Figura12. Esquema de conexión TT.



Schneider electric. "cuaderno técnico #114" .p. 68.

$R_A$  = resistencia a tierra de las masas de la instalación.

$R_B$  = resistencia de la puesta a tierra del neutro.

## 5.5 INTERCONEXIÓN O UNIÓN DE LOS SISTEMAS DE TIERRA.

Objetivos de la unión de los electrodos o sistemas:

- 1) Reducir el valor de la resistencia de puesta a tierra como resultado de la resistencia equivalente.
- 2) Reducir el gradiente de potencial en el área cercana a los electrodos o sistemas de tierra.
- 3) Limitar las diferencias de potencial entre ellos y sus sistemas asociados, lograr un punto o área equipotencial.
- 4) Evitar tensiones peligrosas transferidas entre electrodos o sistemas de tierra.
- 5) Obtener una red de tierra mas segura y confiable.

Es importante ratificar que los diferentes sistemas de tierra se deben desarrollar con conductores independientes y preferiblemente por trayectorias distintas, donde el único punto de conexión debe ser la malla de tierra o los electrodos independientes interconectados a través de conductores que formen finalmente un mismo punto de referencia o una única tierra general.

La interconexión de las diversas tomas de tierra de servicio y protección de una instalación permite obtener, con el mínimo costo, la resistencia global mas pequeña así como reducir las diferencias de tensión locales entre las partes de la instalación a su mínima expresión.

Esta interconexión es el sistema que, de la forma mas simple, permite prever el comportamiento de las partes, bajo cualquier circunstancia, sin necesidad de conocer, los acoplamientos existentes, a veces mal definidos o mal controlados, como es el caso de 2 sistemas de tierra independientes que puedan quedar reunidos, inadvertidamente, a consecuencia de trabajos en la instalación. Este

ultimo caso se presenta, sobretodo, para la tierra del punto neutro de baja tensión de los transformadores que alimenten a consumidores distantes, desde un centro de transformación. En caso de falla de aislamiento entre la alta tensión y las masas de esa instalación, la interconexión de la tierra del neutro de baja tensión (tierra de servicio) con la tierra de las masas de la instalación (tierra general, de protección y servicio) propagaría a aquellos un potencial que podría, en ciertos casos, ser excesivos.

Resulta entonces, indicada la separación de una y otra tierra, salvo que el examen de la situación, teniendo en cuenta los valores de la corrientes de falla y las resistencias de tierra, muestre que la interconexión no reviste peligro.

Cuando se establezca la separación de los circuitos de tierra, deben tomarse las precauciones necesarias para que no resulte inoperante, debiendo estar las tomas de tierras separadas, suficientemente alejadas para que el acoplamiento por el terreno quede limitado a un valor pequeño aislados los conductores o aparatos conectados a una toma de tierra diferente de la general, respecto a ella, para un valor de la tensión al menos igual al susceptible de aparecer entre los circuitos de tierra.

Para la interconexión de las puestas a tierra el RETIE recomienda en el caso cuando por requerimientos de una edificación o inmueble existan varias puestas a tierra, todas ellas deben estar interconectadas eléctricamente, según criterio adoptado de IEC- 61000-5-2, tal como aparece en el artículo 15 de Puestas a tierra del RETIE, en el numeral de requisitos generales.

#### **5.5.1 UNIFICACION MEDIANTE BOBINA DE CHOQUE.**

Para la unificación de las redes primarias y secundarias se utiliza un elemento acoplador muy importante, pero que quizás por razones económicas ya que a su debido valor se convierte en una causa de la no utilización del mismo, y que conlleva a la implementación métodos mas sencillos y baratos, pero que de alguna forma afectan en la instalación trayendo grandes problemas de puesta a

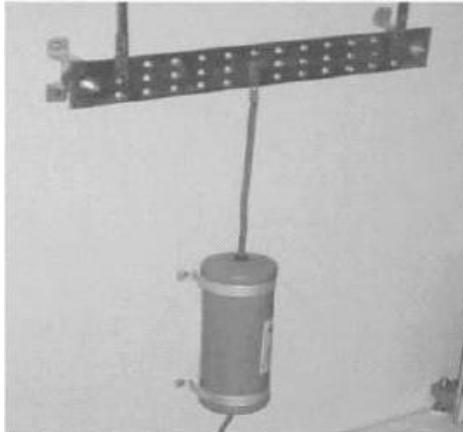
tierra. Este elemento es la bobina de choque, esta es un elemento acoplador que puede utilizarse para interconectar los sistemas de puesta a tierra de potencia y de equipo sensible, o para reducir ruidos eléctricos en la alimentación de equipo sensible.

- **Bobina de Choque.**

Las bobinas de choque para interconexión de puestas a tierra como se menciono anteriormente y como se muestra en la figura13, tienen como principio de funcionamiento ofrecer una baja resistencia(casi cero) en servicio normal, logrando que se ayuden las puestas a tierra y una alta impedancia( $X_L = 2\pi fL$ ) ante impulsos, que puedan circular en los conductores de puesta a tierra.

Para reducir las sobretensiones conducidas(originadas por la corriente de un rayo) en una instalación eléctrica, se debe evitar que una corriente de gran magnitud circule dentro de dicha instalación, por tanto, se debe disipar la mayor parte de la corriente en la puesta a tierra. Para lograrlo existen 2 opciones: reducir la impedancia del sistema externo de protección contra rayos(aumentando el calibre de los conductores de las bajantes e instalando mas puestas a tierra) o disminuir la rata de cambio de la corriente ( $di/dt$ ) del rayo(instalando mas bajantes); sin embargo, también se puede llevar a cabo una solución mas practica y efectiva, utilizando una bobina de choque que interconecte una puesta a tierra de baja impedancia con otras puestas a tierra como la de subestación, la de equipo electrónico, etc. La corriente de rayo deberá ir en su mayor parte a la puesta a tierra del sistema de protección contra rayos, reduciendo de esta manera las corrientes en modo común que circulan dentro de la instalación y que son responsables de las sobretensiones producidas.

Figura13. Bobina de choques para interconexión de tierras.



Favio Casas Ospino. "Tierras soporte de la seguridad eléctrica".p.178.

De acuerdo al conocimiento actual sobre las puestas a tierra, se aprueba la construcción de tierras dedicadas<sup>5</sup>, es decir, una para subestación, otra para protección contra rayos, otra para equipos sensibles, etc. Por otro lado, para considerar que dos tierras están independientes, su separación debe ser como mínimo de cinco veces el tamaño de la mayor. En la practica es casi imposible tener tierras dedicadas y además independientes. Las razones por las cuales algunos fabricantes de equipos recomiendan tierras "aisladas" como se mencionara mas adelante, es evitar que a dichos equipos les lleguen perturbaciones provenientes del sistema eléctrico normal, o por mala interpretación del concepto de tierra aislada. Las diferencias de tensión de referencia en los cableados de los equipos sensibles, se evitan mediante la correcta interconexión de las tierras dedicadas.

- **Análisis del comportamiento.**

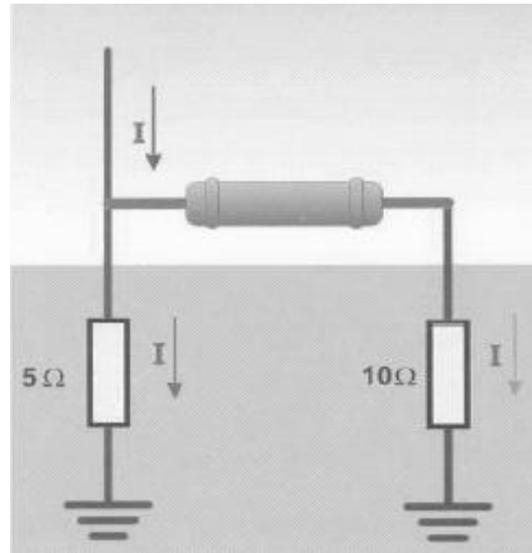
En el circuito de la figura14 se puede analizar lo que sucede cuando una corriente de rayo es interceptada con el descargador de sobretensión y conducida hacia tierra por medio de las bajantes. Se hará la suposición de que la puesta a tierra de

---

<sup>5</sup> Tierra dedicada o separada, una para cada función.

protección contra rayos es de menor resistencia que la puesta a tierra de la subestación y entre ellas se instala una bobina de choque.

Figura14 Interconexión de puestas a tierra con bobina de choque.



Favio Casas Ospino. "Tierras soporte de la seguridad eléctrica".p.181.

El sistema se comporta como un divisor de corrientes, es decir, la corriente total se divide en dos partes. Esta condición es óptima, porque la corriente del rayo se dispersa en su mayor parte a través de la puesta a tierra de menor valor. Como consecuencia, tenemos una mínima corriente de modo común en el sistema de cableado eléctrico, con un  $di/dt$  mucho menor, por tanto, se reducen las sobretensiones en modo diferencial.

Cuando se modelan las puestas a tierra teniendo en cuenta todos los parámetros que intervienen en la respuesta transitoria de electrodos tipo varilla, anillos o contrapesos; la ventaja de la bobina de choque es aun mayor. El empleo de la bobina de choque como recurso tecnológico no solo es sencillo sino efectivo, pero sobre todo es una solución remedial a una condición de riesgo potencial, que debe ser tomada como alternativa para cuando se requiera.

- **Desventajas de la instalación de la bobina de choque.**

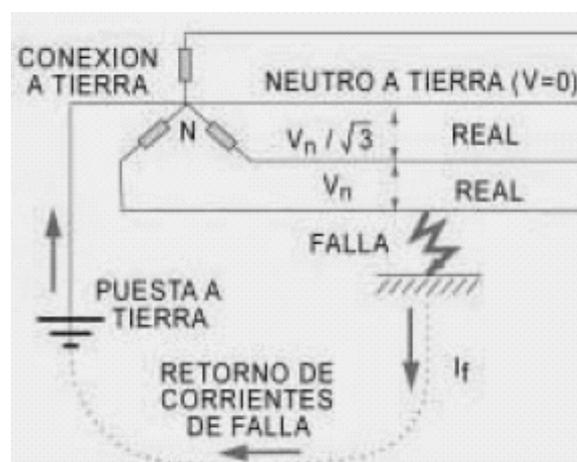
El único inconveniente teórico de la bobina, es que habría que controlar con un adecuado montaje la sobretensión entre los dos extremos de la misma. Sin embargo, el tiempo de duración de la sobretensión es muy corto para permitir el proceso de falla de aislamiento y por tanto, la formación de un arco eléctrico entre los dos extremos, tal como lo queda demostrado en la practica.

En las industrias no es muy utilizadas aparte de razones económicas, también el funcionamiento como tal de la bobina ya que siempre se comporta como un circuito abierto, nunca esta la conexión a tierra directamente en condiciones normales, esta solamente se conecta a tierra cuando ocurre la descarga atmosférica, en caso contrario permanece abierta, lo que no tendría en cuenta otro tipo de fallas distintas a las descargas atmosféricas.

### 5.6 DETERMINACION DE CORRIENTES DE FALLA EN SISTEMAS CON NEUTRO PUESTO A TIERRA.

Las tensiones de los alimentadores están directamente referidas al potencial de tierra ( $V = 0$ ) a través del aterramiento del neutro (que posibilita retorno de grandes corrientes) (Fig15).

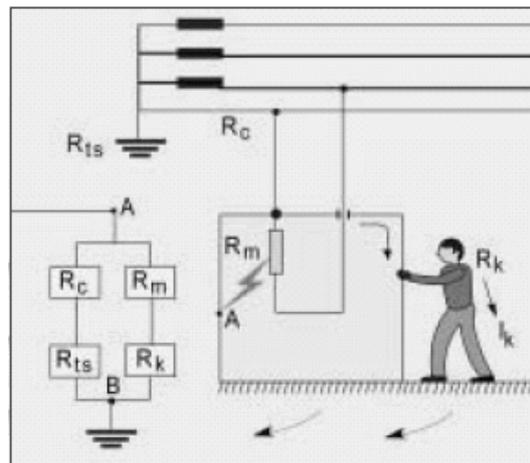
Figura15. Sistemas con neutro puesto a tierra.



- Sin puesta a tierra del usuario.

La tensión entre los extremos de una falla a través de una persona sin resistencia de contacto con el suelo  $V_r = V / \sqrt{3}$  produce corrientes ( $I_k$ ) peligrosas (Fig); la protección impide la falla doble.

Figura16. Falla en circuito del usuario sin puesta a tierra.



Tomando una resistencia del cuerpo humano de  $1000\Omega$  el cual es un valor que se constituye como una buena aproximación para la resistencia media del cuerpo, como lo establecen muchos autores(nos basamos del libro de la puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el RAT del autor Rogelio García Márquez).

Tomando un valor de  $6\Omega$  para la resistencia del terreno y de  $2\Omega$  para la carcasa donde hay el contacto.

$$R_a = R_c + R_{ts} = ec(1) = 0.17 + 6 = 6.17\Omega$$

$$R = \frac{R_k R_a}{R_k + R_a} = ec(2) = \frac{1000 * 6.17}{1006.17} = 6.132\Omega$$

$$I_f = \frac{V_n / \sqrt{3}}{R} = \text{ec}(3) = \frac{127}{6.132} = 20.71A$$

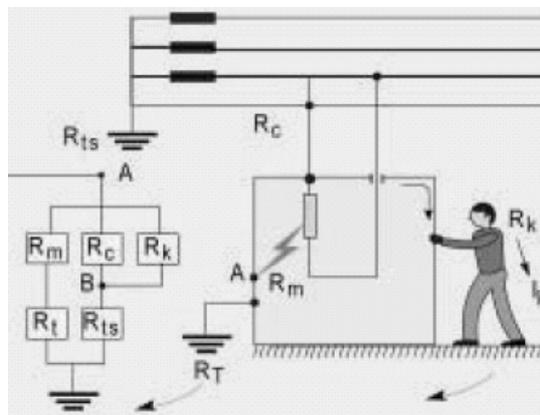
$$V_{AB} = I_F * R = \text{ec}(4) = 20.71 * 6.13 = 127V$$

$$I_K = \frac{V_{AB}}{R_K} = \text{ec}(5) = \frac{127}{1000} = 127mA$$

- **Con puesta a tierra del usuario.**

Bajo idéntica situación desventajosa (puntos de contacto  $R = 0 \Omega$ ) para la falla Fase – Tierra (Fig17) se tendrán corrientes ( $I_K$ ) no peligrosas:

Figura17. Falla en circuito del usuario con puesta a tierra.



$$R_b = \frac{R_K R_c}{R_K + R_c} = \frac{1000 * 0.17}{1000.17} = 0.169\Omega$$

$$R_a = R_b + R_{ts} = 0.169 + 6 = 6.169\Omega$$

$$R_s = R_m + R_t = 2.0 + 25 = 27\Omega$$

$$R = \frac{R_a R_s}{R_a + R_s} = \frac{6.169 * 27}{6169 + 27} = 5.02 \Omega, \quad I_f = \frac{V_n / \sqrt{3}}{R} = \frac{127}{5.02} = 25.30 A$$

$$V_{AB} = I_F * R_b = 25.30 * 0.169 = 4.27 V$$

$$I_K = \frac{V_{AB}}{R_K} = \frac{4.27}{1000} = 4.27 mA$$

Será necesario proveer para las corrientes de falla, un trayecto de baja resistencia entre las masas de los aparatos eléctricos y el suelo (tierra).

## 5.7 EQUIPOTENCIALIDAD.

En todos los casos obligatoriamente, se deben hacer las conexiones equipotenciales pertinentes para asegurar la continuidad eléctrica y la capacidad de transportar con seguridad cualquier corriente de falla que se pueda producir.

La equipotencialidad es el estado de partes conductoras que tienen un potencial eléctrico sustancialmente igual. Todos los puntos que deben ponerse a tierra han de interconectarse con una puesta a tierra a través de una resistencia mínima.

### 5.7.1 MEDICION DE EQUIPOTENCIALIDAD.

Aunque es un concepto que en rigor científico solo se cumple para corriente continua y para electrostática, en toda instalación con sistema de puesta a tierra, es muy importante equipotencializar todas sus partes. Las mediciones se efectúan mediante la inyección de corriente continua con una fuente regulada y medición de voltaje y corriente. Los criterios básicos al respecto son:

- Máxima resistencia para una conexión de puesta a tierra: 10mΩ.
- Máxima resistencia aceptada para un enlace equipotencial: 0.1 Ω.
- Máx resistencia entre los puntos extremos de una puesta a tierra: 1.0 Ω.

- Máx resistencia entre el barraje equipotencial y la puesta a tierra: 5m  $\Omega$ .
- Máxima resistencia para las bajantes: 0.3  $\Omega$ .
- Máxima impedancia del conductor neutro: 0.25  $\Omega$ .

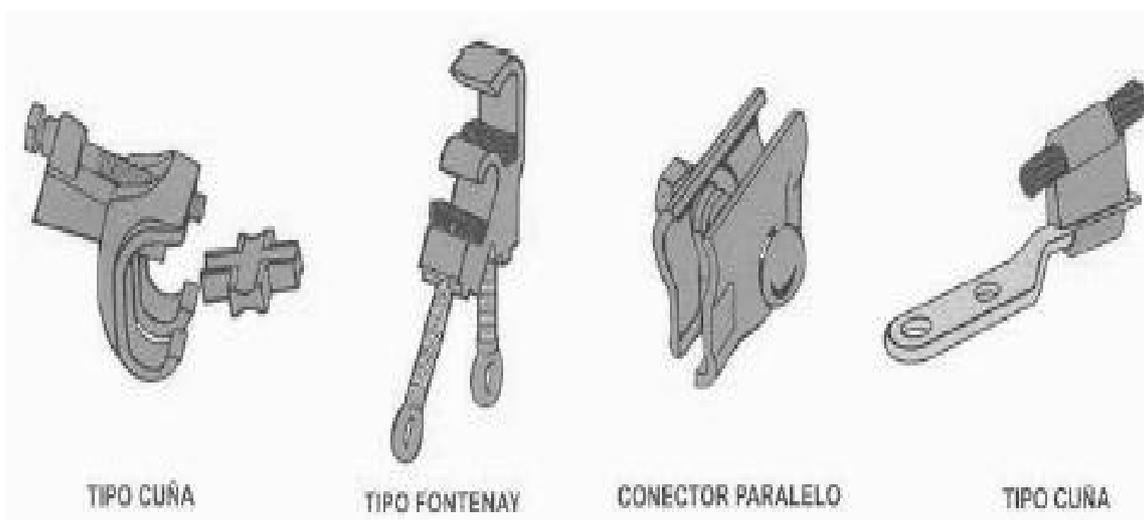
## 5.8 ACCESORIOS DE CONEXIÓN Y MATERIALES.

Las conexiones son uno de los componentes mas repetitivos en un sistema de puesta a tierra SPT y normalmente no reciben mantenimiento ni son inspeccionadas, por tanto deben construirse de tal manera que estén exentas de daños. Estas pueden ser mecánicas o exotérmicas.

### 5.8.1 CONEXIONES MECÁNICAS.

Algunos de los conectores que actualmente están certificados se presentan en la figura, sin embargo, es importante anotar que en el mercado se consiguen muchos que no están certificados y que practicas como el empalme manual no son adecuadas técnicamente.

Figura18. Conexiones mecánicas.



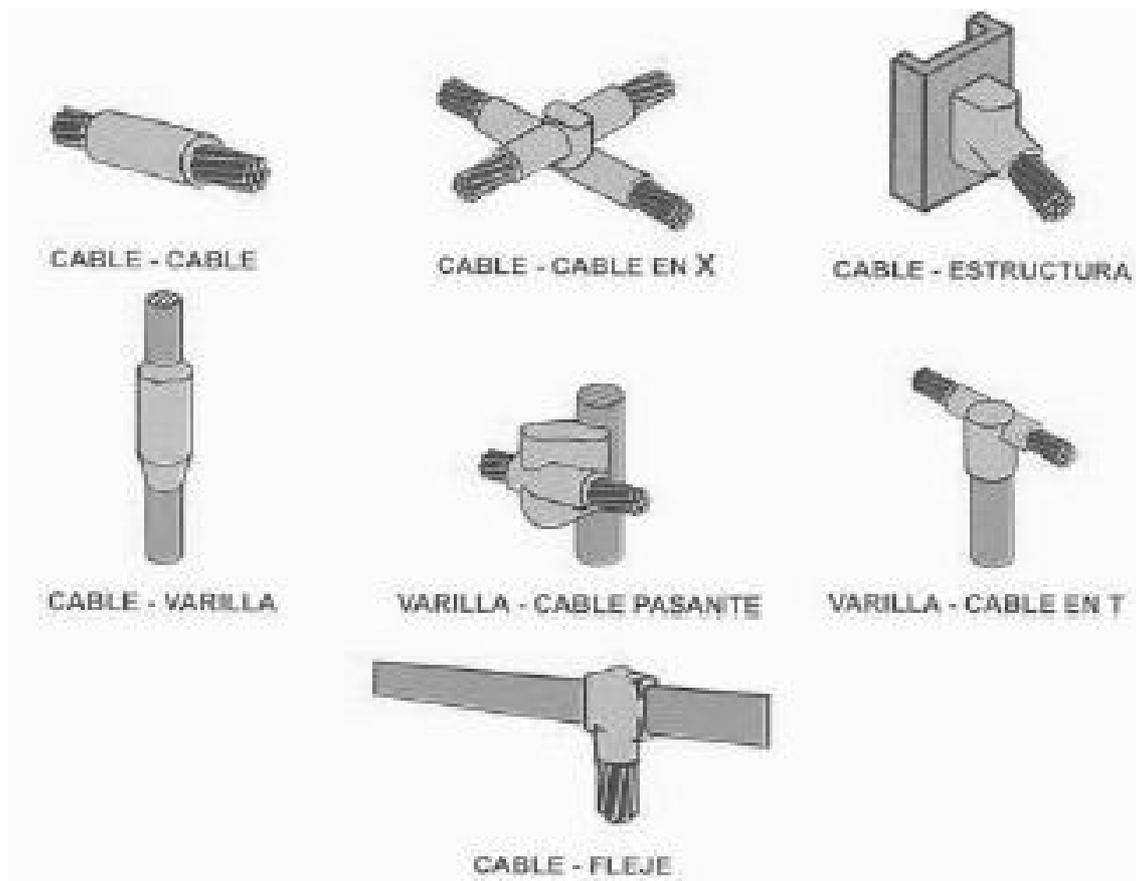
Favio Casas Ospino. "Tierras soporte de la seguridad eléctrica".p.104.

## 5.8.2 CONEXIONES EXOTÉRMICAS.

La soldadura exotérmica, cuproaluminotérmica<sup>6</sup> o soldadura de termita es quizás el sistema más fiable pues evita discontinuidades por ser unión a nivel molecular. Consiste en una reacción química en la que se reduce óxido de cobre mediante aluminio en polvo. Al combinarse el aluminio con el oxígeno, se forma alúmina y se precipita cobre metálico en forma líquida debido al calor de la reacción. Se le llama exotérmica por el desprendimiento de calor.

La figura muestra los tipos más comunes de conexión con soldadura exotérmica.

Figura19. Conexiones exotérmicas.



<sup>6</sup> Soldadura fundida de aluminio y cobre.

Favio Casas Ospino. "Tierras soporte de la seguridad eléctrica".p.105.

### **5.8.3 SELECCIÓN DE LAS UNIONES.**

Los métodos mas comunes para efectuar las uniones del sistema de puesta a tierra son la soldadura exotérmica, las abrazaderas y los conectores a presión. Algunas guías para su utilización son:

- Si por razones mecánicas, el recocido del conductor es una cuestión de consideración, es prudente no exceder 250°C, independientemente del tipo de unión o conexión.
- La temperatura de 450°C es un valor razonable para conectores del tipo abrazadera.
- Las uniones del tipo soldadura exotérmica deberán unir íntimamente los conductores de tierra con un molde que tiene las mismas características de fusión que los mismos conductores, de tal forma que toda la conexión puede ser tratada como si fuera parte integral de un conductor homogéneo.

Los conectores de presión pueden ser generalmente de 2 tipos: los pernados y los de compresión. Es razonable diseñar estos conectores para un rango entre 250°C y 350°C.

### **5.9 NORMAS Y REGLAMENTOS DE REFERENCIA.**

#### **Normas de referencias internacionales.**

- IEEE Std 142 – 1991 Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. Green Book IEEE.
- IEEE80 - Institution of Electrical Engineers -STD80
- IEEE81 - Institution of Electrical Engineers -STD81

## **Normas de referencia nacionales.**

- NTC 2050 –Norma técnica colombiana- sección 250
- NTC 4552 – Norma técnica colombiana – Protección contra descargas eléctricas atmosféricas
- RETIE - Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas –Capítulo 2-artículo15.

## **6. CAPITULO II:**

### **METODOS PARA CALCULOS DE RESISTIVIDAD, MEDIDAS DE RESISTENCIA Y DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA.**

#### **6.1 RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS.**

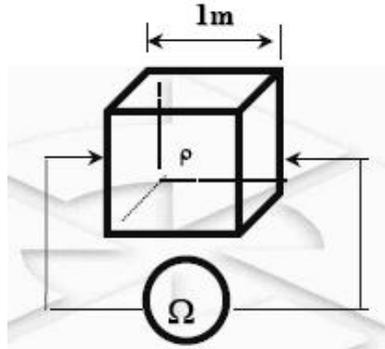
El factor más importante de la resistencia a tierra no es el electrodo en sí, sino la resistividad del suelo mismo, por ello es requisito conocerla para calcular y diseñar la puesta a tierra de sistemas.

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina "Resistividad Aparente" que para el interés de este trabajo, será conocida simplemente como "Resistividad del Terreno".

##### **6.1.1 COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE LOS SUELOS.**

La resistividad de los suelos se expresa en  $\Omega$ -m,  $\Omega$ -cm ó  $\Omega$ -mm, que corresponde a la resistencia que presenta un cubo de 1 metro cúbico de suelo o aguas, entre sus paredes laterales (aristas) y se representa por la letra griega  $\rho$ .

Figura20. Resistividad de un cubo de terreno de 1m de arista.



Donde:

Dimensiones de ρ:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad \text{ec(6)}, \quad \rho = \frac{R \cdot s}{l} \Rightarrow \left( \frac{\Omega \cdot m^2}{m} \right) = \Omega \cdot m$$

para un cubo de 1m de lado:

$$R(\Omega) = \rho \frac{1(m)}{s(m^2)} = \rho \frac{1(m)}{(1 \times 1)m^2} = \frac{\rho}{1m}, \quad \text{despejando } \rho, \quad \rho = R(\Omega \cdot m)$$

Donde :

R = Resistencia en (Ω)

ρ = Resistividad en (Ω. m)

l = Longitud en (m)

S = Sección en (m<sup>2</sup>)

La tierra representa generalmente un mal conductor (gran contenido de oxido de silicio y óxido de aluminio que son altamente resistivos) pero gracias al amplio volumen disponible, se puede lograr a través de ella los niveles conductivos necesarios para su utilización auxiliar. La conductividad representa un fenómeno esencialmente electroquímico o electrolítico, y por lo tanto, depende de la cantidad de agua depositada o el nivel de humidificación existente Los suelos están compuestos principalmente, por óxidos de silicio y óxidos de aluminio que son muy

buenos aislantes; sin embargo la presencia de sales y agua contenida en ellos, mejora notablemente la conductividad de los mismos.

## 6.1.2 FACTORES QUE DETERMINAN LA RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS.

En la resistividad del terreno influyen los siguientes factores y es necesario su evaluación:

### 6.1.2.1 NATURALEZA DE LOS SUELOS.

Los suelos son buenos, regulares o malos conductores de la electricidad en función de su naturaleza. El análisis y conocimiento de esta naturaleza es el primer paso para la instalación adecuada del sistema de puesta a tierra. En la tabla siguiente se muestra los valores característicos de la resistividad de los suelos, donde se puede apreciar que entre la resistividad del agua de mar y el hielo existe una gran diferencia y se puede concluir que el agua de mar es el que presenta la mas baja resistividad y por lo tanto un buen conductor de la electricidad.

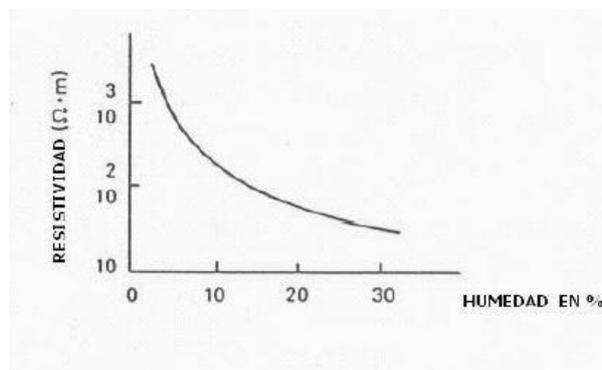
Tipo de suelo o agua	Valor típico de resistividad( $\Omega$ -m)
Agua de mar	2
Arcilla	40
Aguas subterráneas	50
Arena	2000
Granito	25000
Hielo	100000

Tabla2. Resistividades típicas según el tipo de suelo o agua.

### 6.1.2.2 HUMEDAD.

La resistividad que presenta un terreno esta en relación directa a los porcentajes de humedad contenida en él; es decir, depende de su estado hidrométrico, al aumentar la humedad disminuye la resistividad y al disminuir la humedad aumenta la resistividad. En todo caso siempre que se añade agua a un terreno disminuye su resistividad respecto al que tendría en seco.

Figura21. Variación de la resistividad en función al porcentaje de humedad.

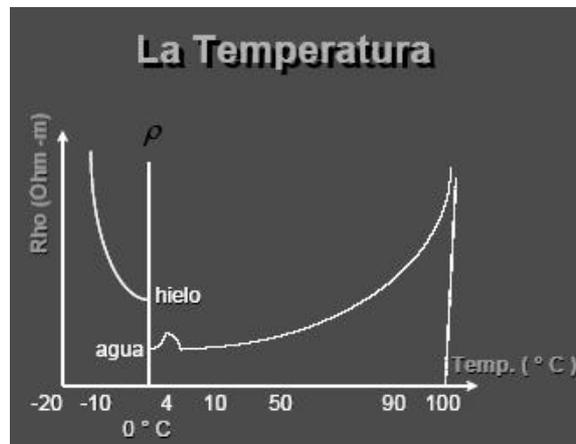


Miguel Martínez. "Diseño digital de malla a tierra".p.79

### 6.1.2.3 TEMPERATURA DEL TERRENO.

A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al llegar a 0° C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra. El hielo es aislante desde el punto de vista eléctrico, lo que implica que la movilidad de los iones del terreno a través del agua se ve detenida al congelarse esta. Una forma de amortiguar este efecto en zonas con clima continental (inviernos fríos y veranos calurosos) deberá introducirse los electrodos a mayor profundidad. En el siguiente gráfico, figura 22, se puede observar como aumenta la resistividad de un terreno en función del descenso de la temperatura.

Figura22. Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura.



#### 6.1.2.4 CONCENTRACIÓN DE SALES DISUELTAS.

Al presentarse una mayor concentración de sales disueltas en un terreno, mejora notablemente la conductividad y por lo tanto la resistividad. El agua hace que las sales penetren hacia la parte profunda del terreno, hacia la capa de depósito, y que un riesgo excesivo o una lluvias excesivas lavan el terreno y, por lo tanto, arrastran la sal que rodea los electrodos aumentando la resistividad. El siguiente gráfico muestra la variación de la resistividad de un terreno en función del porcentaje de sal presente:

Figura23. Variación de la resistividad del terreno en función del % de sal.

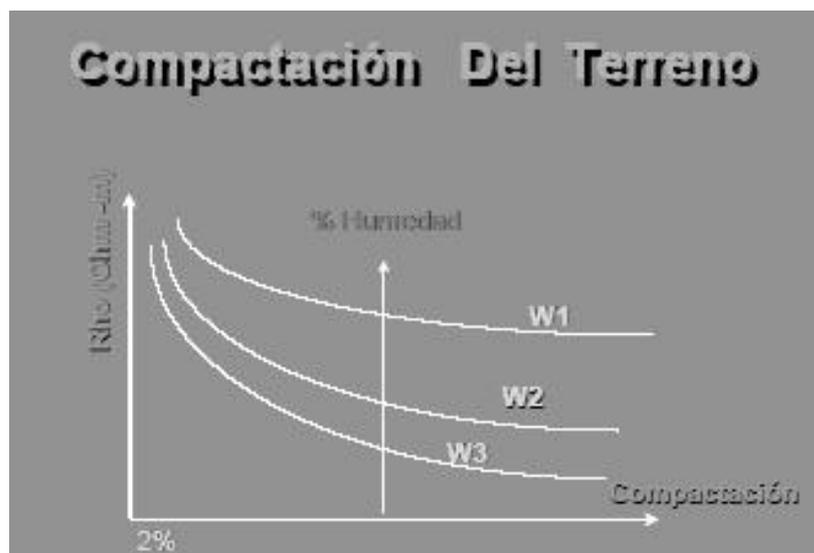


### 6.1.2.5 LA COMPACTACIÓN DEL TERRENO.

La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo. Por ello, se procurará siempre colocar los electrodos en los terrenos más compactos posibles.

En la grafica se puede observar la relación entre la compactación y la resistividad del terreno.

Figura24. Variación de la resistividad del terreno en función de la compactación del terreno.



### 6.1.2.6 GRANULOMETRÍA.

Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena y de que ésta sea mayor que la de la arcilla.

Los suelos pueden clasificarse según su granulometría en:

- Arcilla (greda)
- Arena finísima
- Arena fina
- Arena gruesa
- Piedra suelta
- Roca.

#### **6.1.2.7 ESTADO HIGROMÉTRICO.**

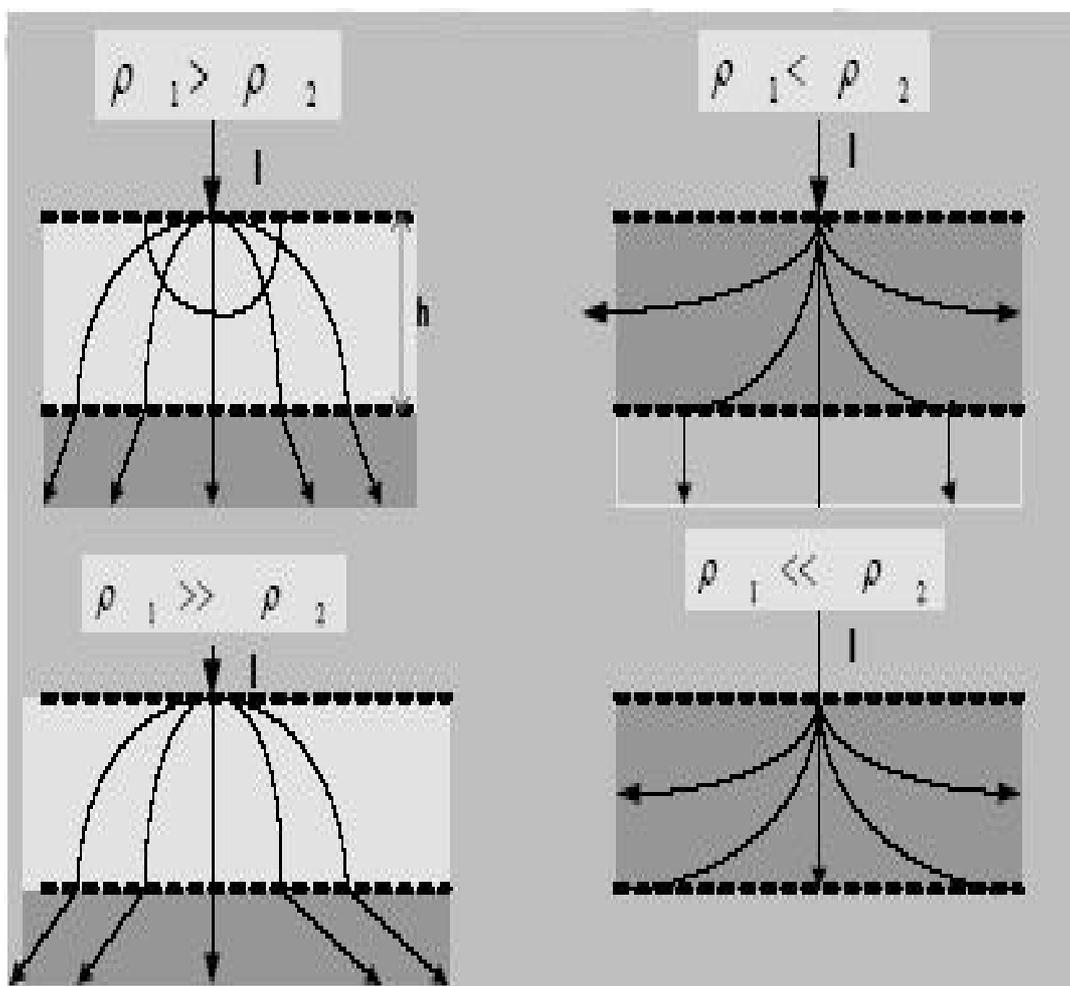
El contenido de agua y la humedad influyen en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático. Como ejemplo, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de éste. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante. Y, puede tenerse el caso de que en tiempo de secas, un terreno puede tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierras. Por ello, el sistema debe ser diseñado tomando en cuenta la resistividad en el peor de los casos.

#### **6.1.2.8 ESTRATIFICACIÓN DEL TERRENO.**

El terreno obviamente no es uniforme en sus capas. En los 3 m de longitud de una varilla electrodo típica, al menos se encuentran dos capas diferentes de suelos. Existen estratos que se presentan en forma inclinada o verticales debido a fallas geológicas pero para los estudios se asumen horizontales. El desconocimiento a priori de la resistividad de las capas inferiores obliga al estudio y medición de las mismas si se requiere conocer el valor de la puesta a tierra a una determinada profundidad. Se puede afirmar que la resistividad a una profundidad de 5 m puede llegar a ser mayor que solamente a una profundidad de 1,5 m por tratarse de un terreno de una capa arcillosa.

En la siguiente figura se observa que el comportamiento de la resistividad del terreno no es uniforme y depende de la característica de los estratos y en un caso real se puede dar terrenos con diferentes capas con resistividades y espesores diversos que pueden ser mayor a lo requerido, por lo tanto no tendría éxito la puesta a tierra en esta capa.

Figura25. Influencia de la estratificación del terreno.



### 6.1.3 RESISTIVIDADES TÍPICAS DE TERRENOS.

Naturaleza del terreno	Resistividad en Ohm - m
Terreno pantanoso	Hasta 30
Limo	20 A 100
Humos	10 A 150
Turba Húmeda	5 A 100
Arcilla Plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 A 200
Margas de jurásico	30 A 40
Arena arcillosa	50 A 500
Arena silícea	200 A 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 A 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 A 3000
Caliza blanda	100 A 300
Caliza compacta	1000 A 5000
Caliza agrietada	500 A 1000
Pizarra	50 A 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granito y gres procedentes de alteracion	1500 A 10000
Granito y gres muy alterados	100 A 600

Tabla3. Valores típicos de resistividades de acuerdo a la naturaleza del terreno

### 6.1.4 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD.

Antes de efectuar una medición de resistividad es necesario seleccionar adecuadamente el equipo a utilizar y para ello se requiere saber cuáles son los componentes del instrumento, es decir, la fuente de potencia, sistema de medida, los requisitos mínimos que deben cumplir estos equipos y qué tipo de ensayo debe ser sometidos estos equipos.

Los componentes del instrumento son:

- Fuente de potencia
- Sistema de medida

Fuente de potencia:

- Recomendable alterna o alterna pulsante, capaz de vencer la resistencia propia del circuito y del terreno, tensión entre 50 y 500 V. a una frecuencia de 60 a 70 Hz.
- Debido a la probabilidad de electrólisis no es recomendable fuente de tensión continua.
- En el caso de instrumentos a batería deberá disponer de rectificador estático DC/AC.

Sistema de medida:

Básicamente se conocen tres sistemas de medida:

1. Sistema voltímetro: amperímetro o sistema ohmimétrico; ventaja: la resistencia de los electrodos de corriente no afectan la lectura del instrumento.
2. Sistema comparador: de resistencias, ofrece relativa facilidad en la lectura directa.
3. Sistema de balance nulo: debido al uso de electrodos de resistencia baja no afecta la lectura del instrumento. Existen sistemas combinados entre sistema ohmimétrico y el sistema de balance nulo, mejorándose la medición de resistencias bajas.

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un **Telurómetro** o *Megger* de tierras de cuatro terminales.

Los aparatos de mayor uso, de acuerdo a su principio de operación, pueden ser de 2 tipos: del tipo de compensación de equilibrio en cero y el de lectura directa.

Los telurómetros deben inyectar una corriente de frecuencia que no sea de 60 Hz para evitar se midan voltajes y corrientes que no se deban al aparato sino a ruidos

eléctricos. Por ejemplo, si estamos cerca de una subestación o de una línea en servicio, y vamos a realizar mediciones de resistividad y resistencia de tierra, con un aparato de 60 Hz, dichos sistemas van a inducir corrientes por el suelo debido a los campos electromagnéticos de 60 Hz y darán una lectura errónea.

De igual manera sucede cuando los electrodos de prueba están mal conectados o tienen falsos contactos, darán señales falsas de corriente y voltaje. Si hay corrientes distintas a las que envió el aparato, éste leerá otras señales de voltaje y corriente que no son las adecuadas.

También estos aparatos de repente tienen oscilaciones en sus lecturas y no es posible leerlas. Los telurómetros son analógicos o digitales y deben contener 4 carretes de cable calibre 14 AWG normalmente. Para enrollamiento rápido se recomienda construir un sistema devanador que permita reducir el tiempo de la medición. También traen 4 electrodos de material con la dureza suficiente para ser hincados en la tierra con marro. Son de una longitud aproximada de 60 cm y un diámetro de 16 mm. Además de lo anterior se hace necesario contar con una cinta no metálica de 50 m aproximadamente.

Los telurómetros tienen cuatro terminales 2 de corriente (C1, C2) y 2 de potencial (P1, P2) y están numerados en el aparato C1 P1 P2 C2. Los telurómetros deben estar certificados y probados en el campo con una resistencia antes de realizar las mediciones.

Como la medición obtenida por un telurómetro es puntual, se deben hacer mediciones en un sentido, en otro a 90 grados del primero, y, en el sentido de las diagonales. En la medición de resistividad de un terreno, es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es una práctica común de una tabla con lecturas, el eliminar los valores que estén 50% arriba o abajo del promedio aritmético de todos los valores capturados.

Figura26. Equipo de medición: Telurómetro.



#### **6.1.4.1 PRECAUCIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA MEDICIÓN.**

##### **Precauciones.**

- Las mediciones deben efectuarse en épocas apropiadas.
- Los electrodos de exploración deben tener un buen contacto con el terreno.
- Si el suelo tiene capa gruesa de arena verter agua en el punto de clavado de los electrodos.
- Verificar el punto de contacto de la bornera de los instrumentos y la toma de los electrodos.
- Verificar los conductores gastados para evitar puntos de degradación del aislamiento.
- Verificar la presencia de corrientes inducidas.
- La resistencia de los electrodos auxiliares y conductores deben ser tal que no influyan en las mediciones.
- 

##### **Recomendaciones de cuando no realizar la medición.**

- Después de una lluvia.
- Durante alta humedad ambiental.

- Cuando hay conductores pelados y no se logran buen contacto en el conexionado.
- Durante horas de tormenta.
- Durante horas de humedad, en la que se escucha chisporroteo en los aisladores.
- Durante la ejecución de trabajos de mantenimiento sobre la infraestructura en las proximidades.

### **6.1.5 RESISTENCIA VS RESISTIVIDAD.**

Aun cuando pudiesen confundirse estos dos términos, tienen significados diferentes. La eficiencia de un sistema de un electrodo enterrado (barra, jabalina, malla, plato, etc) es evaluado en términos de resistencia. Es una medida de cuán bien el electrodo puede dispersar corriente en el suelo circundante. La propiedades eléctricas del suelo son descritas en términos de resistividad.

Al hacer una medición de resistencia, se está probando un sistema particular de tierra. Al hacer una medición de resistividad se está haciendo una prueba al propio suelo.

La resistencia es medida en Ohms. La resistividad es dada comúnmente en Ohm-m. La resistividad de un suelo determinado combinado con la configuración del electrodo conforma la resistencia que dicho electrodo en particular experimenta. En la práctica, la medición de resistividad es realizada primero, para identificar un buen sitio para la puesta a tierra y hacer el cálculo teórico para su diseño óptimo. Después se realiza la medición de resistencia para verificar que se ha logrado el valor deseado según los requerimientos. Por lo indicado anteriormente es de gran importancia que se investigue la resistividad del suelo cada vez que se tenga como objetivo la instalación de un sistema de puesta a tierra. La resistividad del suelo varía por muchas razones. Entre ellas la profundidad desde la superficie, el tipo y la concentración de químicos en el suelo, el contenido de humedad y la temperatura. En otras palabras, la resistividad del suelo es aquella que posee el

electrolito contenido en el mismo. La presencia de agua en la superficie, por ejemplo, no indica necesariamente una resistividad baja.

## 6.2 METODOS DE MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRRENO

### 6.2.1 MÉTODO DE LOS TRES ELECTRODOS. (MÉTODO PARA CALCULO DE RESISTIVIDAD).

Básicamente consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo de dimensiones conocidas, enterrado en un terreno cuya resistividad se desea conocer (Fig. 41). El cálculo de la resistividad aparente a una profundidad dada, puede ser realizada utilizando cualquiera de las tres ecuaciones a, b, c; aunque se puede recomendar el uso de la ecuación “c” a partir de la cual se obtiene.

$$\rho_a = \frac{2\pi LR}{\ln \frac{4L}{r} - 1} \quad \text{ec(7)}$$

Ecuaciones:

$$\text{a) } R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{a}, \quad \text{b) } R = \frac{\rho}{2\pi L} \text{Arcsenh} \frac{L}{a}, \quad \text{c) } R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

Donde:

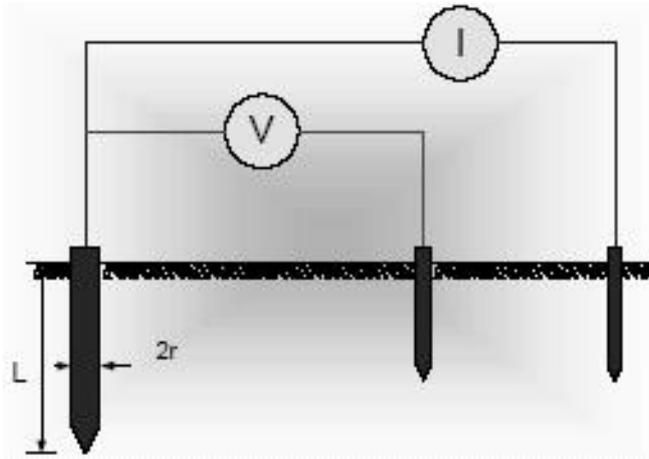
$\rho_a$  : Resistividad aparente para una profundidad L ( $\Omega$  - m)

L : Longitud del electrodo enterrado en contacto con el suelo (m)

2r : Diámetro del Electrodo (m)

R : Valor medido de la resistencia ( $\Omega$ )

Figura27. Método de tres electrodos para la medición de resistividad



### 6.2.2 MÉTODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS. (METODO PARA CALCULO DE RESISTIVIDAD).

El principio de este método está basado en la medición de la diferencia de potencial entre dos de los electrodos, luego de haber inyectado al terreno una corriente a través de los otros dos. La corriente inyectada puede ser corriente continua conmutada o corriente alterna de baja frecuencia (menores de 200 Hz) por razones de acoplamiento entre los conductores. La ecuación fundamental para la medición de resistividad mediante cuatro electrodos, teniendo en cuenta la Fig.28 es:

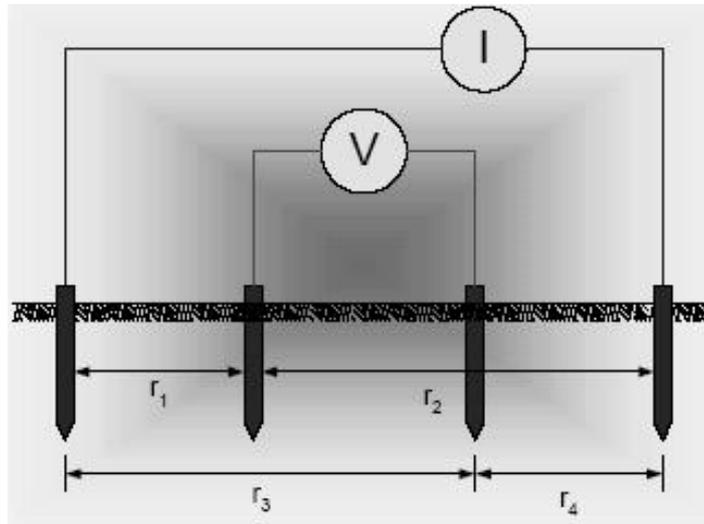
$$\rho = \frac{2\pi V}{I} * \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)} \quad \text{ec (8)}$$

Donde:

V : Diferencia de potencial entre dos electrodos

I : Corriente inyectada  $r_1, r_2, r_3, r_4$  : Distancia entre electrodos

Figura28. Medición de la resistividad por el método de los cuatro electrodos.



Si el terreno considerado es homogéneo, el valor de la resistividad medida por este método corresponderá al valor único de resistividad presente en el terreno; pero sí no es homogéneo, entonces el valor obtenido será ficticio, llamándose resistividad aparente y se designa por  $\rho_a$ .

### 6.2.3 MÉTODO DE WENNER. (MÉTODO PARA CÁLCULO DE RESISTIVIDAD).

Con objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar los 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra. El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón  $V/I$  es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.

$$\rho = \frac{4\pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \text{ de la que se obtiene: } \rho = \frac{4\pi \cdot a \cdot R}{n} \quad \text{ec(9)}$$

Donde:

$\rho$ : Resistividad del terreno (ohmio – metro)

R: Resistencia medida (ohmios)

a: Distancia entre electrodos (metros)

b: Profundidad de penetración de los electrodos (metros)

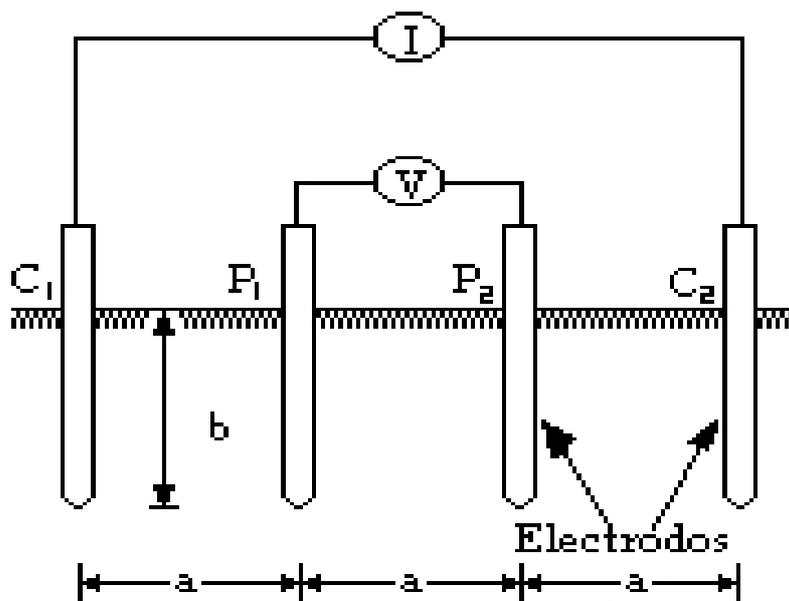
n: Factor aproximado que tiene un valor entre 1 y 2 (depende de la relación b/a)

La segunda ecuación puede aproximarse a:

$$\rho = 4\pi a R \text{ Si } b > a \quad \text{ec(10)}$$

$$\rho = 2\pi a R \text{ Si } b < a \quad \text{ec(11)}$$

Figura29. Configuración de Wenner.



En la configuración de Wenner, los electrodos de corriente (C) y los electrodos de Potencial (P) pueden tener 3 arreglos alternativos, sin alterar el resultado de la resistividad que se va a medir, siempre y cuando se aplique la expresión adecuada. Estos arreglos son mostrados en la siguiente tabla, siendo el más frecuente utilizado para las mediciones el arreglo C – P – P – C.

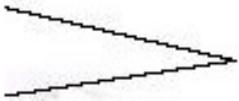
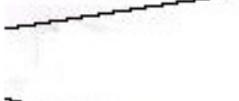
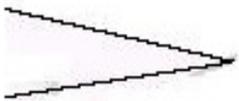
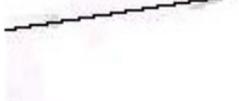
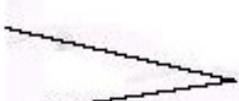
C – P – P – C		$\rho_1 = 2\pi a R_1$
P – C – C – P		
C – C – P – P		$\rho_2 = 6\pi a R_2$
P – P – C – C		
C – P – C – P		$\rho_3 = 3\pi a R_3$
P – C – P – C		

Tabla4. Arreglos alternativos de los electrodos.

Se recomienda que se tomen lecturas en diferentes lugares y a 90 grados unas de otras para que no sean afectadas por estructuras metálicas subterráneas. Y, que con ellas se obtenga el promedio.

### 6.2.3.1 EJEMPLOS DE PERFILES DE RESISTIVIDAD.

Para obtener el perfil de resistividad en un punto dado, se utiliza el Método de Wenner con espaciamentos entre electrodos de prueba cada vez mayores. Por lo general, para cada espaciamiento se toman dos lecturas de resistividad en direcciones perpendiculares entre sí.

La gráfica resultante de trazar el promedio de las mediciones de resistividad (R) contra distancia entre electrodos (a) se denomina perfil de resistividad aparente del terreno.

## Ejemplos de perfiles.

1. Capa superficial arcillosa y húmeda, capa inferior rocosa: perfil de resistividad ascendente.

Figura30. Perfil de resistividad de terreno arcilloso y rocoso.



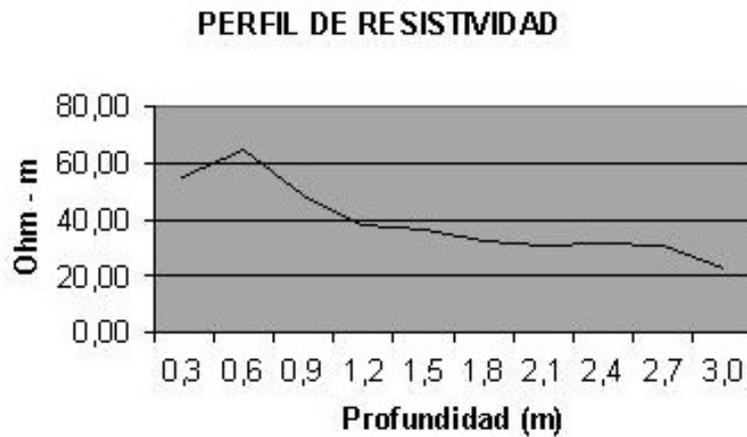
2. Capa superficial muy seca, capa inferior arenosa: perfil de resistividad descendente.

Figura31. Perfil de resistividad de terreno seco y arenoso.



3. Terreno rocoso y seco. Perfil de resistividad plano.

Figura32. Perfil de resistividad de terreno seco y rocoso.

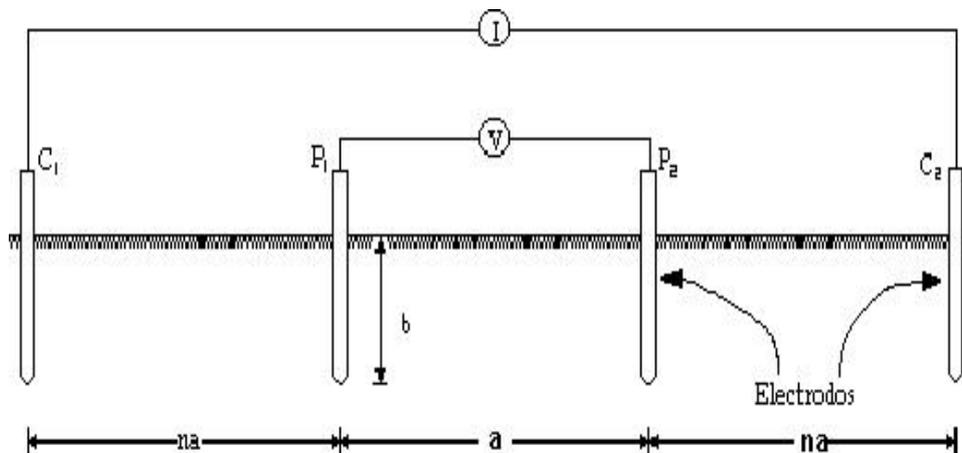


#### 6.2.4 MÉTODO DE SCHLUMBERGER. (MÉTODO PARA CALCULO DE RESISTIVIDAD).

El método de Schlumberger es una modificación del método de Wenner, ya que también emplea 4 electrodos, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial ( $a$ ) se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos ( $na$ ) de la separación base de los electrodos internos ( $a$ ).

La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la figura33.

Figura33. Configuración de Schlumberger.



La ecuación fundamental para este caso es:

$$P_a = \pi R.n(n+1)a \quad \text{ec(12)}$$

El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando se requieren conocer las resistividades de capas más profundas, sin necesidad de realizar muchas mediciones como con el método Wenner. Se utiliza también cuando los aparatos de medición son poco inteligentes. Solamente se recomienda hacer mediciones a 90 grados para que no resulten afectadas las lecturas por estructuras subterráneas.

### **6.3 CALCULOS Y MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA TIERRA.**

Uno de los parámetros más importantes que caracteriza una puesta a tierra es el valor de su resistencia. Se define este como el cociente entre el potencial adquirido por ella y la corriente conducida a tierra.

Debido a que existen diferentes espesores de los estratos y con resistividades diferentes cada uno, a fin de obtener un valor bajo de resistencia, es necesario conocer el tamaño y la forma del electrodo a enterrar, ya que de ello dependerá su resistencia. Para una comparación económica entre las diferentes configuraciones de puesta a tierra, se requieren expresiones analíticas que relacionen todos los parámetros de la puesta a tierra. Tales expresiones deben ser utilizadas adecuadamente para cada configuración, teniendo en cuenta sus limitaciones porque son el resultado de las aplicaciones de los conceptos de la teoría de campo o del método de potenciales promedios, que asume una densidad de carga uniformemente distribuido en todo el sistema de puesta a tierra de la misma manera que la resistividad del suelo. Una forma de determinar teóricamente la resistencia de puesta a tierra es por analogía con la capacitancia a tierra del sistema de electrodos, la cual está basada en el hecho que el flujo de corriente a tierra de un sistema de electrodos, tienen la misma trayectoria como la emisión de

flujo eléctrico de una configuración similar de conductores teniendo cargas aisladas, entonces:

Tomada de ec(6),  $R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{C}\right)$

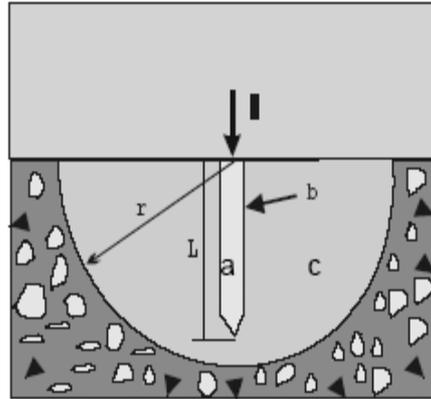
Donde “C” es la capacitancia del sistema de electrodos considerando su imagen con respecto a la superficie de la tierra.

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra involucra el cálculo de la misma resistencia a tierra, ya sea de un electrodo elemental, una combinación simple de electrodos, una combinación compleja de electrodos (malla de tierra) o de mallas de tierra interconectadas. En general, los electrodos elementales que conforman la mayor parte de las puestas a tierra, son: la barra enterrada verticalmente en el terreno y el conductor horizontal embebido en el terreno.

La resistencia de puesta a tierra total tiene tres componentes (Fig.34):

- La resistencia del conductor conectado al sistema de puesta a tierra, que está en función de su resistividad, longitud y sección.
- La resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el suelo, este valor es usualmente pequeño si el electrodo está libre de pintura o grasa, esto se elimina efectuando un buen contacto entre el electrodo y tierra.
- La resistencia de la tierra alrededor del electrodo que es la resistencia principal que influirá en la resistencia total de la puesta a tierra.

Figura34. Componentes de la resistencia de puesta a tierra.



Donde:

$\rho$ : resistividad del terreno.

L: Longitud del electrodo.

A: área de la semiesfera equivalente.

Si una esfera de radio  $x$ , tiene el espesor  $dx$ , entonces la resistencia  $dR$  del elemento es:

$$dR = \frac{\rho dx}{2\pi x^2} \quad \text{ec(13)}$$

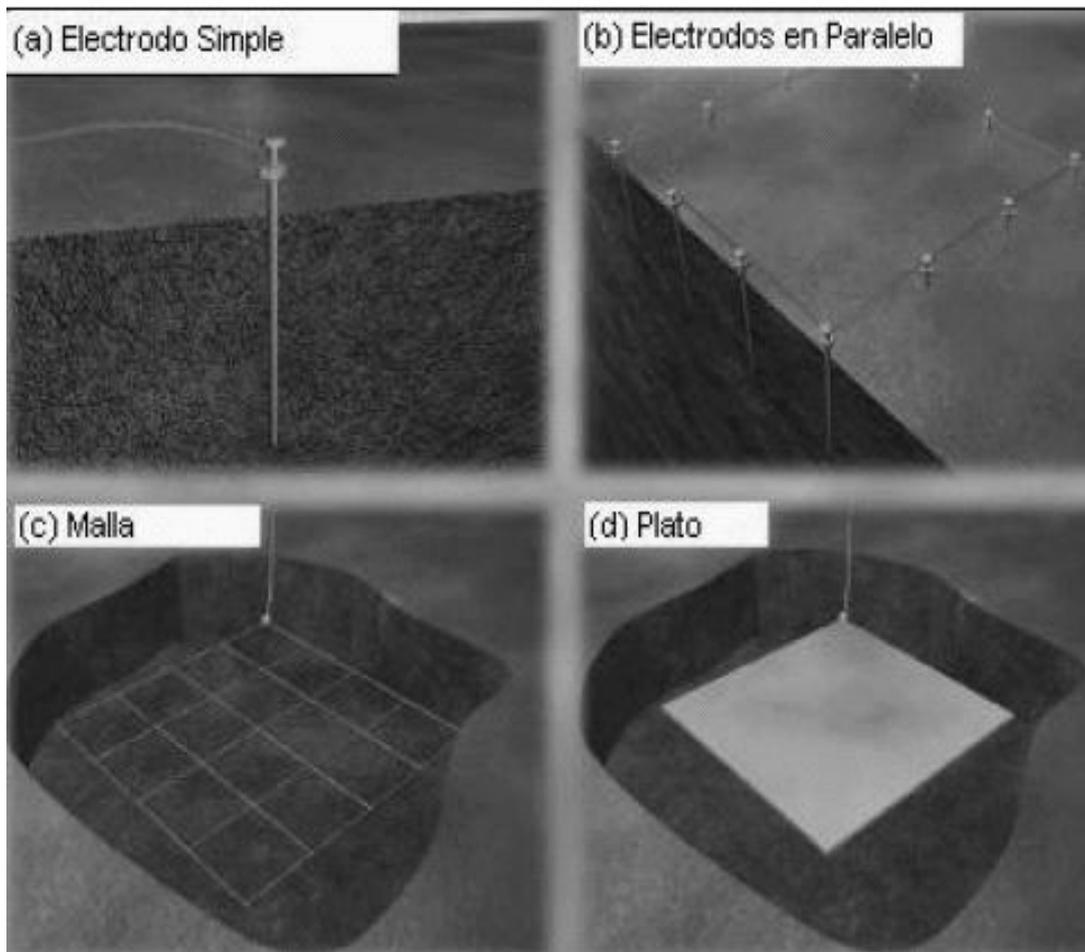
Siendo la resistencia hasta una distancia  $x$  de:

$$R = \int_r^{r1} \frac{\rho dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r1} \right) \quad \text{ec (14)}$$

### 6.3.1 GEOMETRÍA Y CONFIGURACION DE LOS ELECTRODOS PARA LOS DIFERENTES SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.

A continuación se deducirá la resistencia de puesta a tierra de las configuraciones más típicas y más utilizadas.

Figura35. Electrodo de Puesta a tierra. A) Barra o jabalina; b) Arreglo de electrodos en paralelo; c) Malla; d) Plato.



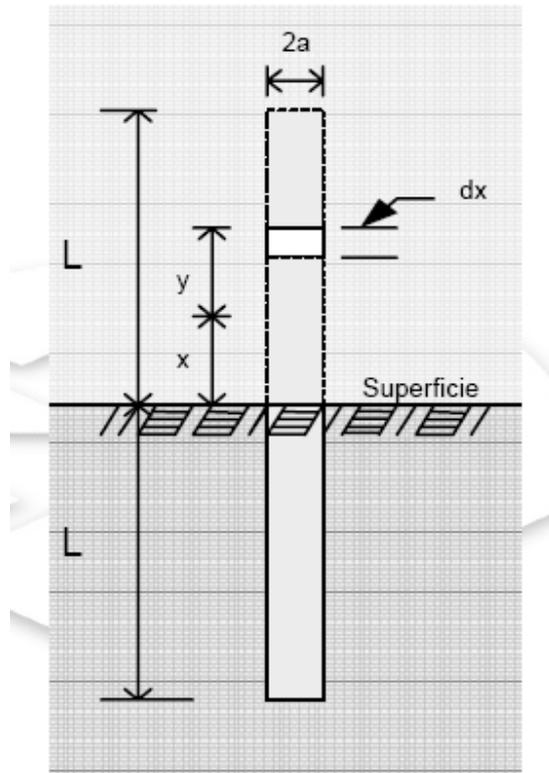
Miguel Martínez Lozano. "Métodos de medición de tierra en zonas urbanas".p.139.

### 6.3.1.1 ELECTRODOS VERTICALES

#### 6.3.1.1.1 VARILLA ENTERRADA SOBRE LA SUPERFICIE

Considerando una jabalina de longitud " $L$ ", diámetro " $2a$ " junto con su imagen sobre la superficie de la tierra. (Fig. 36)

Figura36. Modelo de jabalina enterrada, en la superficie y en imagen.



El problema electrostático consiste en calcular la capacitancia, asumiendo una carga uniforme sobre la superficie, esto significa calcular el potencial promedio sobre el electrodo. Suponiendo que la carga asumida es en centímetros de longitud, entonces la carga en el segmento  $dy$  es  $qdy$ . El potencial en cualquier punto P debido a esta carga es:

$$\text{potencial} = \frac{qdy}{\sqrt{a^2 + y^2}} \text{ ec(15)}$$

Para obtener el potencial total, se integra entre  $y=0$  a  $y=(1-x)$  y también de  $y=0$  a  $y=(1+x)$ .

Y multiplicando por  $dx/t$  e integrando de  $x=0$  a  $x=1$ , el potencial será:

$$\frac{V}{2q} = \ln\left(\frac{4L}{a} - 1\right) \quad \text{ec(16)}$$

La capacitancia de :

$$\frac{1}{C} = \frac{V}{2qL} = \frac{1}{L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad \text{ec (17)}$$

y la resistencia por analogía será:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad \text{ec (18)}$$

También se pueden utilizar otras expresiones como:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \operatorname{arcsenh}\left(\frac{2L}{d}\right) \quad \text{ec (19)}, \quad R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{a} \quad \text{ec (20)}$$

Donde:

$\rho$  : resistividad del terreno ( $\Omega$  - m).

L : longitud de la barra en (m).

A : radio de la barra en (m).

$L_n$ : logaritmo natural.

R : resistencia en ( $\Omega$ ).

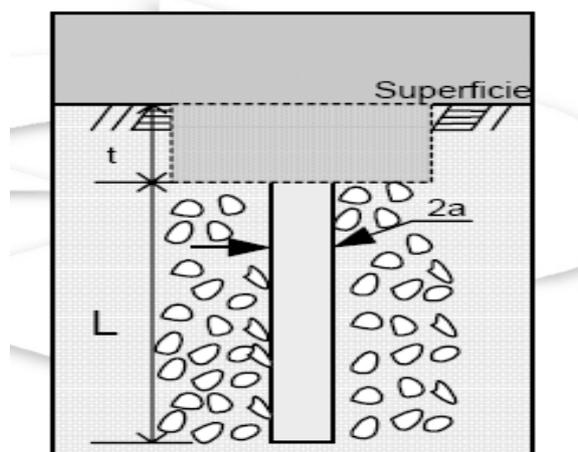
d:2a

La diferencia entre una y otra para las longitudes y radios normales no es mayor del 6%.

### 6.3.1.1.2 VARILLA ENTERRADA A PARTIR DE UNA PROFUNDIDAD “T”.

En la mayoría de los casos no se encuentran enterradas a partir de la superficie del terreno, sino a partir de una profundidad t, como se muestra en la Fig.37

Figura37. Electrodo vertical enterrado a una profundidad t.



La resistencia será:

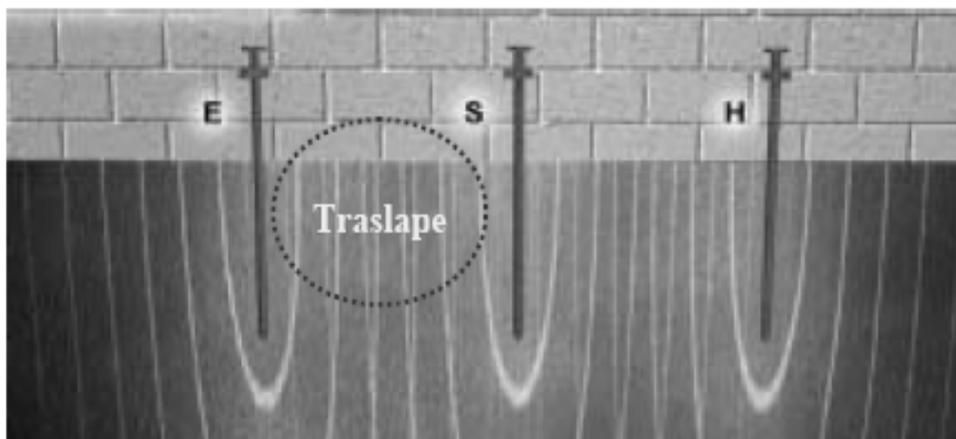
$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{L}{a} \sqrt{\frac{3L+4t}{L+4t}}\right) \quad \text{ec(21)}$$

Nota: el objetivo de enterrar una distancia “t” al electrodo debajo de la superficie es para disminuir los posibles gradientes de potencial sobre la superficie del terreno en los contornos de la barra.

### 6.3.1.1.3 RESISTENCIA A TIERRA DE DOS O MÁS VARILLAS EN PARALELO

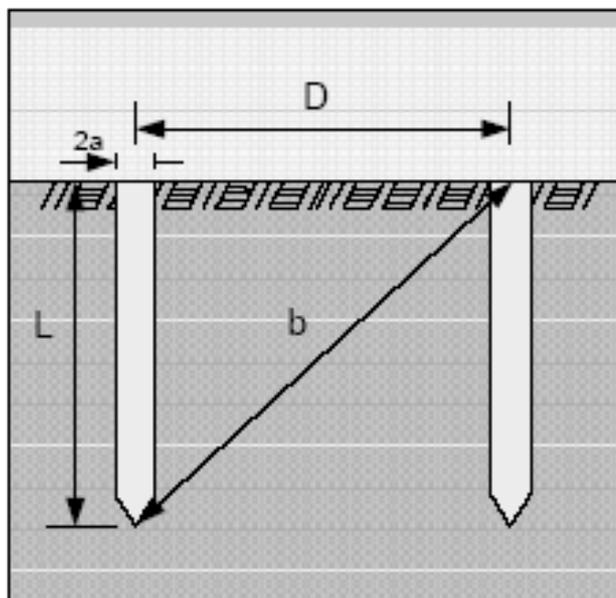
Si bien el objetivo es disminuir la resistencia equivalente, esto se logra teniendo un espaciamiento mínimo entre varillas igual al doble de su longitud con el fin de evitar zonas de interferencia como se observa en la Fig. 38.

Figura38. Zonas de interferencia (traslape), cuando los electrodos no están espaciados suficientemente.



Resistencia de tierra de 2 varillas separadas a una distancia  $D$ , como se observa en la Fig. 39.

Figura39. Dos electrodos de puesta a tierra.



$$R_2 = \frac{\rho}{4\pi L} \ln\left(\frac{(b+L)^2 - D^2}{D^2 - (b-L)^2}\right) \text{ ec(22), Haciendo } D = 2L$$

$$R_2 = \frac{\rho}{4\pi L} \ln\left(\frac{10.47L - 2}{2 - 1.53L}\right) \text{ ec (23)}$$

L = 2,4 m      d = $\frac{5}{8}$ R <sub>1</sub> = 0,425 pa								
Separación	2,5 mm		3 m		4 m		5 m	
Número de Jabalinas	R <sub>eq</sub> [Ω]	K						
2	0,241 pa	0,566	0,237 pa	0,557	0,231 pa	0,511	0,228 pa	0,536
3	0,173 pa	0,408	0,169 pa	0,397	0,163 pa	0,383	0,159 pa	0,374
4	0,137 pa	0,324	0,133 pa	0,313	0,127 pa	0,298	0,123 pa	0,289
5	0,115 pa	0,270	0,110 pa	0,260	0,105 pa	0,246	0,101 pa	0,237
6	0,099 pa	0,233	0,095 pa	0,223	0,089 pa	0,210	0,086 pa	0,202
7	0,087 pa	0,206	0,083 pa	0,196	0,078 pa	0,184	0,075 pa	0,176
8	0,078 pa	0,185	0,075 pa	0,176	0,070 pa	0,164	0,066 pa	0,156
9	0,071 pa	0,168	0,068 pa	0,159	0,063 pa	0,148	0,060 pa	0,141
10	0,065 pa	0,154	0,062 pa	0,140	0,057 pa	0,135	0,054 pa	0,128
11	0,060 pa	0,142	0,057 pa	0,134	0,053 pa	0,124	0,050 pa	0,118
12	0,056 pa	0,132	0,053 pa	0,125	0,049 pa	0,115	0,046 pa	0,109
13	0,053 pa	0,124	0,050 pa	0,117	0,046 pa	0,107	0,043 pa	0,101
14	0,049 pa	0,117	0,047 pa	0,110	0,043 pa	0,101	0,040 pa	0,095
15	0,047 pa	0,110	0,044 pa	0,103	0,040 pa	0,095	0,038 pa	0,089

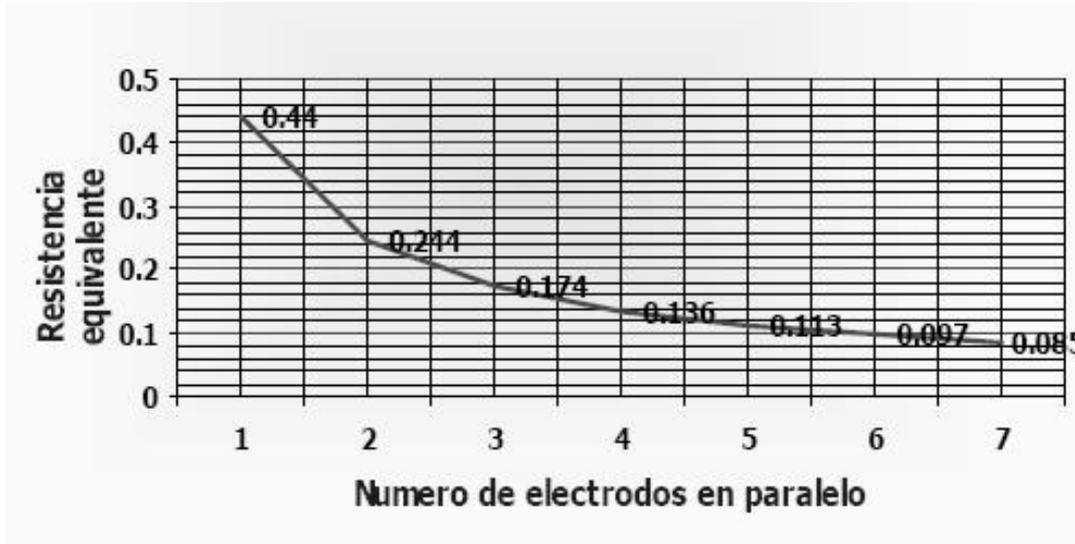
Tabla5. Resistencia de puesta a tierra de electrodos paralelos, alineados e igualmente espaciados (L=2,4m, φ = 5/8 pulg. R<sub>1</sub> = 0,425p).

$L = 2,4 \text{ m}$ $d = \frac{3}{4}$ $R_1 = 0,413 \rho_a$								
Separación	2,5 mm		3 m		4 m		5 m	
Número de Jabalinas	$R_{eq} [\Omega]$	K						
2	0,235 $\rho_a$	0,568	0,231 $\rho_a$	0,559	0,225 $\rho_a$	0,546	0,222 $\rho_a$	0,537
3	0,169 $\rho_a$	0,410	0,165 $\rho_a$	0,399	0,159 $\rho_a$	0,384	0,155 $\rho_a$	0,375
4	0,134 $\rho_a$	0,326	0,130 $\rho_a$	0,315	0,124 $\rho_a$	0,300	0,120 $\rho_a$	0,290
5	0,112 $\rho_a$	0,272	0,108 $\rho_a$	0,262	0,102 $\rho_a$	0,217	0,098 $\rho_a$	0,238
6	0,097 $\rho_a$	0,235	0,093 $\rho_a$	0,225	0,087 $\rho_a$	0,211	0,084 $\rho_a$	0,203
7	0,086 $\rho_a$	0,208	0,082 $\rho_a$	0,198	0,076 $\rho_a$	0,185	0,073 $\rho_a$	0,177
8	0,077 $\rho_a$	0,186	0,073 $\rho_a$	0,177	0,068 $\rho_a$	0,165	0,065 $\rho_a$	0,157
9	0,070 $\rho_a$	0,169	0,066 $\rho_a$	0,160	0,061 $\rho_a$	0,149	0,058 $\rho_a$	0,142
10	0,064 $\rho_a$	0,155	0,061 $\rho_a$	0,147	0,056 $\rho_a$	0,136	0,053 $\rho_a$	0,129
11	0,059 $\rho_a$	0,144	0,056 $\rho_a$	0,136	0,052 $\rho_a$	0,125	0,049 $\rho_a$	0,119
12	0,055 $\rho_a$	0,134	0,052 $\rho_a$	0,126	0,048 $\rho_a$	0,116	0,045 $\rho_a$	0,110
13	0,052 $\rho_a$	0,125	0,049 $\rho_a$	0,118	0,045 $\rho_a$	0,108	0,042 $\rho_a$	0,102
14	0,049 $\rho_a$	0,118	0,046 $\rho_a$	0,111	0,042 $\rho_a$	0,101	0,039 $\rho_a$	0,096
15	0,046 $\rho_a$	0,111	0,043 $\rho_a$	0,104	0,039 $\rho_a$	0,096	0,037 $\rho_a$	0,090

Tabla6. Resistencia de puesta a tierra de electrodos paralelos, alineados e igualmente espaciados ( $L=2,4\text{m}$ ,  $\phi = 3/4$  pulg y  $R1 = 0,413\rho$ ).

Del cuadro se puede apreciar que el índice de reducción para 4 electrodos es de 32% y se obtiene una notable reducción hasta 6 electrodos y a partir de ello se satura la disminución de la resistencia equivalente con el aumento del número de electrodos en paralelo, como se puede apreciar en la siguiente gráfica.

Figura40. Curva resistencia equivalente en función del número de electrodos en paralelo.



#### 6.3.1.1.4 INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN Y EL ESPACIAMIENTO DE ELECTRODOS (VARILLAS).

- Diámetro del electrodo: la resistencia a tierra no disminuye considerablemente con el aumento del diámetro de la varilla, un incremento al doble del diámetro, la resistencia disminuye sólo al 11%.
- Efecto de espaciamiento y de longitud: si dos electrodos están ubicados muy próximos uno de otro, hay interferencia de campos eléctricos entre ellos y aumenta el valor de la resistencia, una separación menor que el doble de su longitud no es aconsejable.
- El aumento del número de electrodos, como se observó cuando se incrementa mucho el número de electrodos, debido al efecto “mutuo”, la resistencia a tierra aumenta, es decir, hay una cierta saturación, lo mismo sucede con la separación entre ellos. Habrá siempre un valor bajo el cual la resistencia aumenta y encima del cual la influencia de disminución es mínima.

### 6.3.1.2 ELECTRODOS HORIZONTALES.

La resistencia de aterramiento de un conductor o electrodo enterrado horizontalmente en el suelo a una profundidad “h” metros será:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{2L^2}{ah}\right) - 2 + \frac{2h}{L} - \left(\frac{h}{L}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{h}{L}\right)^4 \right] (\Omega) \quad \text{ec(24)}$$

Donde:

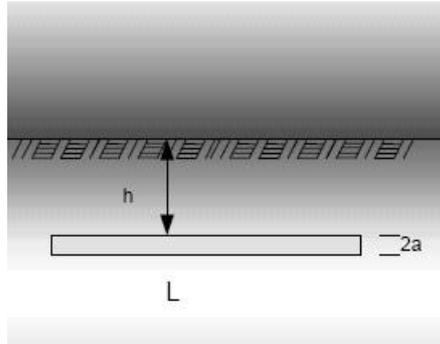
R: resistencia en ( $\Omega$ ).

L: longitud (m).

a: radio del electrodo (m).

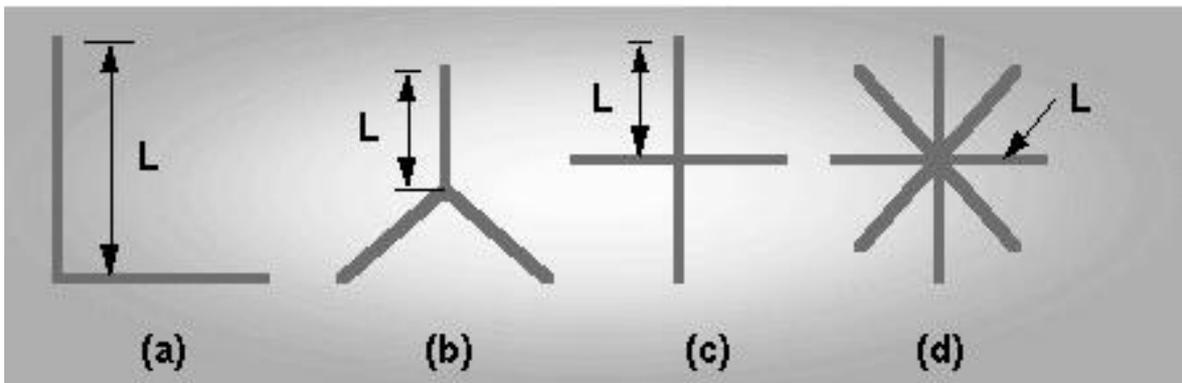
n: profundidad de enterramiento (m).

Figura41. Electrodo horizontal enterrado a una profundidad h.



Se pueden enterrar electrodos con diferentes configuraciones como se observa en la Figura61.

Figura42. Configuraciones horizontales de conductores.



### 6.3.1.2.1 DOS CONDUCTORES EN ÁNGULO RECTO (FIG. 61.a)

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{L^2}{2ah}\right) - 0.2373 + 0.8584 \frac{h}{L} + 1.656 \left(\frac{h}{L}\right)^2 - 10.85 \left(\frac{h}{L}\right)^4 \right] (\Omega) \text{ ec (25)}$$

### 6.3.1.2.2 CONFIGURACION EN ESTRELLA (FIG. 61.b).

$$R = \frac{\rho}{3\pi L} \left[ \ln\left(\frac{L^2}{2ah}\right) - 1.077 - 0.836 \frac{h}{L} + 3.808 \left(\frac{h}{L}\right)^2 - 13.824 \left(\frac{h}{L}\right)^4 \right] (\Omega) \text{ ec (26)}$$

### 6.3.1.3 CONFIGURACION EN MALLA.

Otra forma de configurar una puesta a tierra es mediante una malla entrelazada por conductores de cobre, la unión de los puntos de la malla debe ser tal que no exista calentamiento en dicha unión, con ello se pueden lograr resistencias más bajas que en las configuraciones anteriores.

#### 6.3.1.3.1 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE MALLA.

Según la fórmula experimental de "Laurent", se tiene la siguiente fórmula para el cálculo de puesta a tierra de una malla:

$$R = \frac{\rho}{4\sqrt{\frac{s}{\pi}}} + \frac{\rho}{L} (\Omega) \quad \text{ec (27)}$$

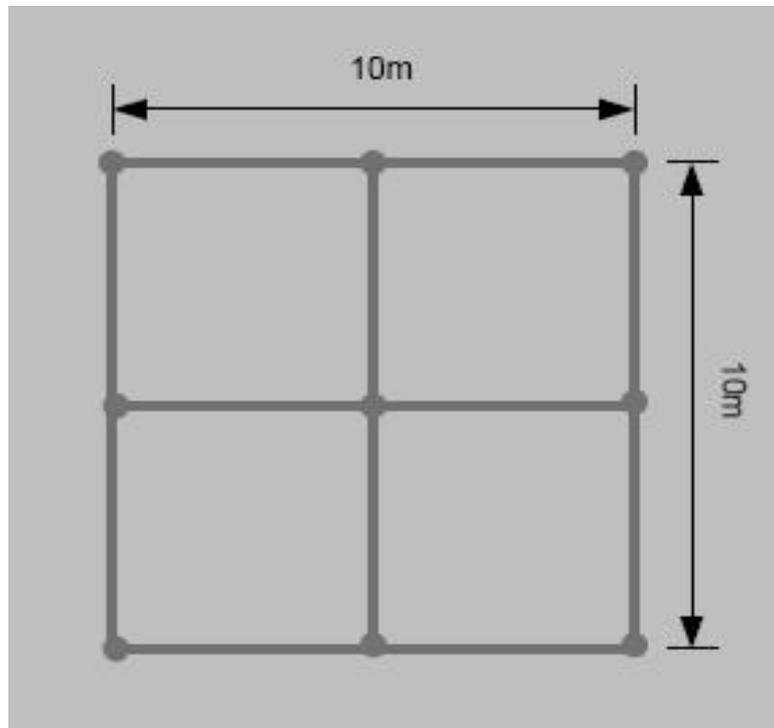
Donde:

$\rho$  : Resistividad ( $\Omega$ -m).

$s$ : superficie que cubre la malla ( $m^2$ ).

$L_T$ : Longitud total de conductor de la malla (m).

Figura43. Ejemplo de una malla de puesta a tierra de 10 x 10 .

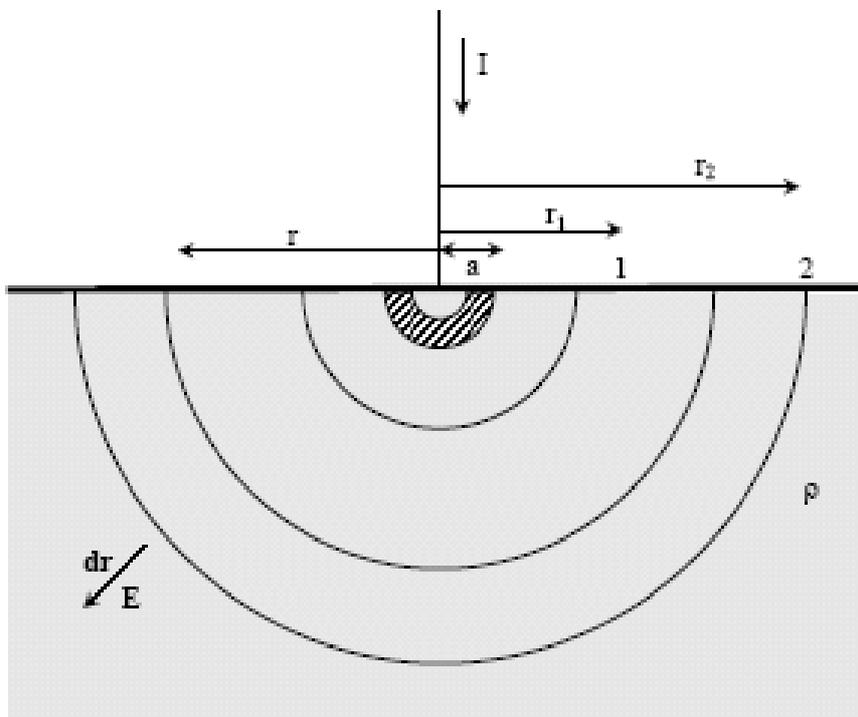


#### 6.4 METODOS DE MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.

Generalmente el concepto de resistencia se asocia al de un elemento con dos terminales claramente definidos, que permiten su conexión eléctrica dentro de un circuito o red. En el caso de un sistema de puesta tierra SPT, solo se dispone de un terminal: el punto de conexión al terreno mediante el SPT. Si se considera el terreno donde está el SPT como un plano infinito, el otro terminal de la resistencia queda indeterminado. En la práctica este no es el caso, ya que para poder medir la resistencia se debe inyectar corriente al SPT formando un circuito cerrado para el retorno de la corriente. Aunque la estructura física de un SPT consta generalmente de barras verticales y conductores horizontales, el concepto de resistencia a tierra se comprende mejor considerando la forma de electrodo de conexión más sencilla de estudiar teóricamente: un electrodo hemisférico

enterrado a ras del suelo, ver figura 44. Para fines de cálculo se asumirá al terreno como un medio conductor semi-infinito homogéneo con resistividad  $\rho$ . La resistividad del material del electrodo se considera mucho menor que la del terreno. Debido a la simetría del electrodo la corriente se distribuye uniformemente sobre la superficie del mismo.

Figura44. Modelo matemático de conexión del electrodo.



Miguel Martínez Lozano. "Manual de medida de resistencia a tierra".p.159.

La resistencia de tierra de un electrodo esta compuesta de tres factores:

- La resistencia del propio electrodo (metal)
- La resistencia de contacto del electrodo con la tierra

- La resistencia del suelo, desde la superficie del electrodo hacia afuera, en el espacio por donde circula la corriente, tierra circundante, desde el electrodo hacia el infinito.

La resistencia del electrodo y su conexión es muy baja ya que los electrodos son hechos de un material bastante conductor y bajo en resistencia, como el cobre. La resistencia de contacto del electrodo con la tierra es también bastante baja si el electrodo está libre de pintura, grasa, etc, y el electrodo está firmemente enterrado.

Factores como la resistividad, la longitud del electrodo y profundidad a la que es enterrado y el diámetro del mismo, afectan la resistencia del mismo.

Otro factor a tomar en cuenta cuando se trabaja con electrodos es la proximidad de unos con otros. Al trabajar en un arreglo de varios electrodos en paralelo la resistencia total no se ve muy disminuida si estos están muy próximos entre sí. Esto se debe a la resistencia mutua que provoca que la corriente que circula por cada electrodo eleve el voltaje en los próximos a éste. Como el voltaje es incrementado por el mismo valor de corriente, la resistencia total es incrementada por la resistencia mutua entre electrodos. Este fenómeno se debe tener en cuenta no sólo al diseñar el arreglo de los electrodos sino también en el momento de colocar los electrodos de prueba a la hora de realizar mediciones de resistencia de un sistema de puesta a tierra.

#### **6.4.1 VALORES DE RESISTENCIA RECOMENDADOS.**

Un buen diseño de puesta a tierra debe reflejarse en el control de las tensiones de paso, de contacto y transferidas; sin embargo, la limitación de las tensiones transferidas principalmente en subestaciones 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, NTC 2050, NTC 4552:

Aplicación	Valores máximos de resistencia de puesta a tierra
Estructuras de líneas de transmisión	20 $\Omega$
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1 $\Omega$
Subestaciones de media tensión	10 $\Omega$
Protección contra rayos	10 $\Omega$
Neutro de acometida en baja tensión	25 $\Omega$
Electrodo simple	25 $\Omega$

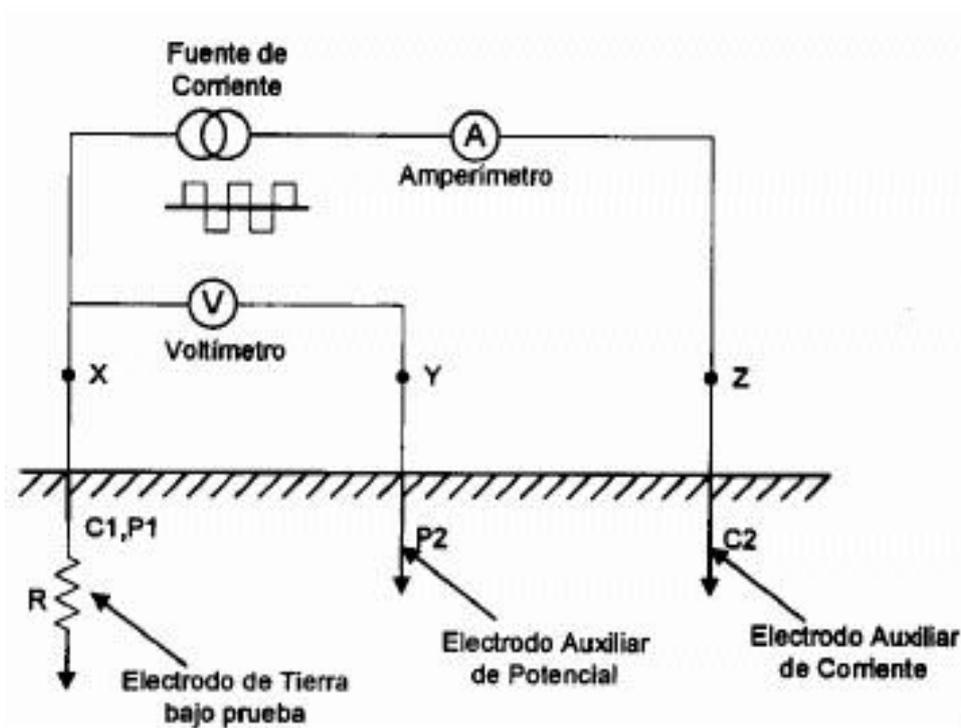
Tabla7. Valores máximos de resistencia de puesta a tierra.

#### **6.4.2 MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL. (METODO DE MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA).**

El método consiste en inyectar corriente a través de un electrodo de prueba denominado de corriente y medir el alza de potencial mediante otro electrodo auxiliar denominado de potencial. Conocido el valor de tensión y el valor de corriente se podrá obtener mediante ley de Ohm el valor de resistencia. Los tres electrodos se mantienen en una línea recta y se va corriendo el electrodo de potencial hacia el electrodo de corriente para hacer sucesivas mediciones de resistencia.

En la Figura 45 se presenta un esquema del método. En ella se presentan los puntos X, Y, Z (también C1, P2, C2 o E, S, H).

Figura45. Método de caída de potencial.

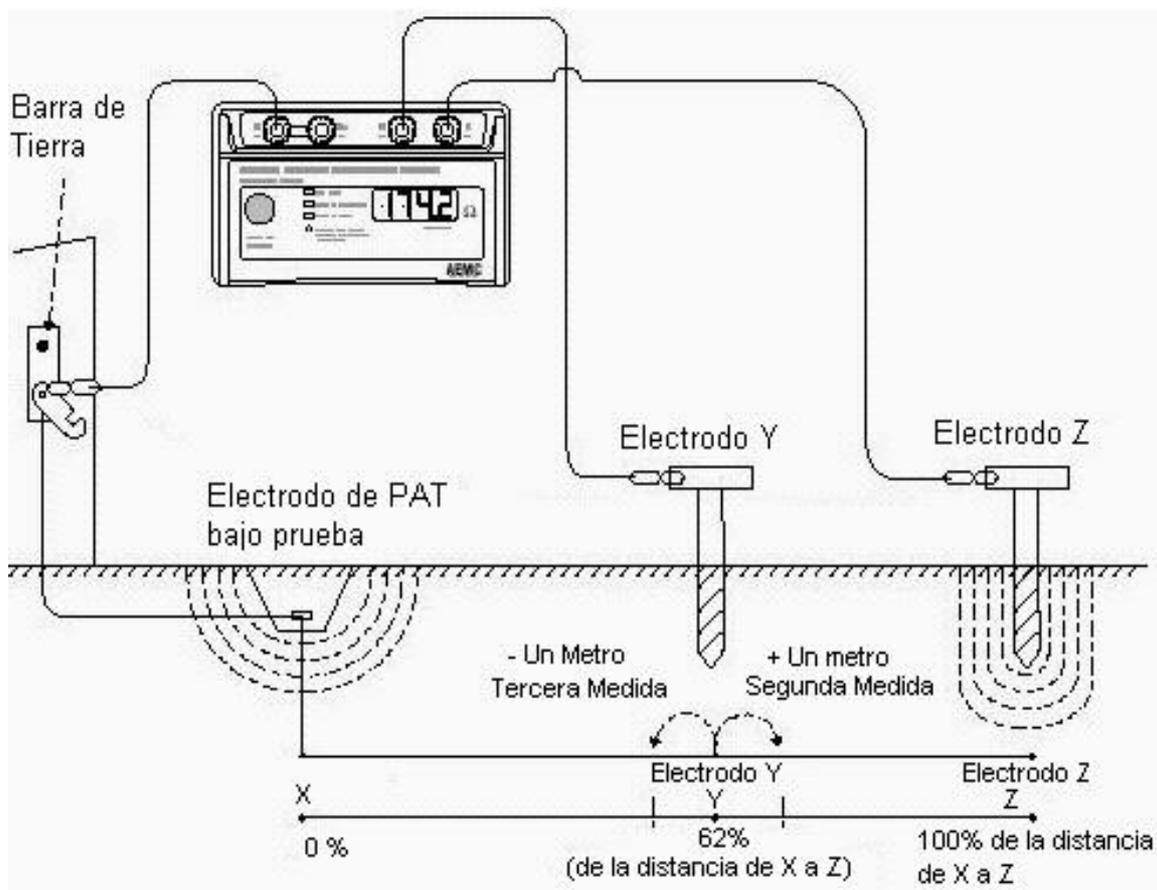


Miguel Martínez Lozano. "Métodos de medición de tierra en zonas urbanas".p.84.

#### 6.4.3 MÉTODO DEL 62% ((MÉTODO DE MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA)).

En cuanto a la distancia óptima para el electrodo de potencial para hallar el punto en que se estabiliza la curva de resistencia en función de la distancia del electrodo de potencial respecto al de tierra, se tiene que generalmente este punto de equilibrio se encuentra al 62% de la de la distancia entre el electrodo de puesta a tierra bajo prueba y el electrodo de corriente; por lo que el método de caída de potencial también se conoce como método del 62%.

Figura46. Método de 62%



Miguel Martínez Lozano. "Métodos de medición de tierra en zonas urbanas".p.106.

Una limitación del método del 62% es que asume condiciones ideales. Estas incluyen un distanciamiento adecuado entre los electrodos, siempre en línea recta y un suelo homogéneo. El suelo rara vez es completamente homogéneo y en zonas bajo construcción se verá particularmente afectado. Así, el electrodo de potencial al 62% de la distancia total podría quedar en una pequeña zona que no represente al área en general. Esto podría provocar que la lectura fuese muy alta y por tanto se realizase un mejoramiento innecesario del sistema de puesta a tierra. De igual modo podría pasar que la lectura fuese muy baja y se dejase el sistema sin modificación, cuando tal vez requeriría algún ajuste. Además, podría pasar que los electrodos no estuviesen lo suficientemente separados al 62% y se tomase una lectura en la gráfica Resistencia en función de la distancia en el momento en

que la resistencia está apenas aumentando (y no cuando la curva ya se ha estabilizado como se indicó anteriormente) y pensar, erróneamente, que se ha cumplido con los requerimientos.

La ventaja del método del 62% sin embargo, está en que una vez que se han verificado las distancias adecuadas para la medición de resistencia es sencillo y rápido realizar nuevas mediciones en sitio con fines de mantenimiento.

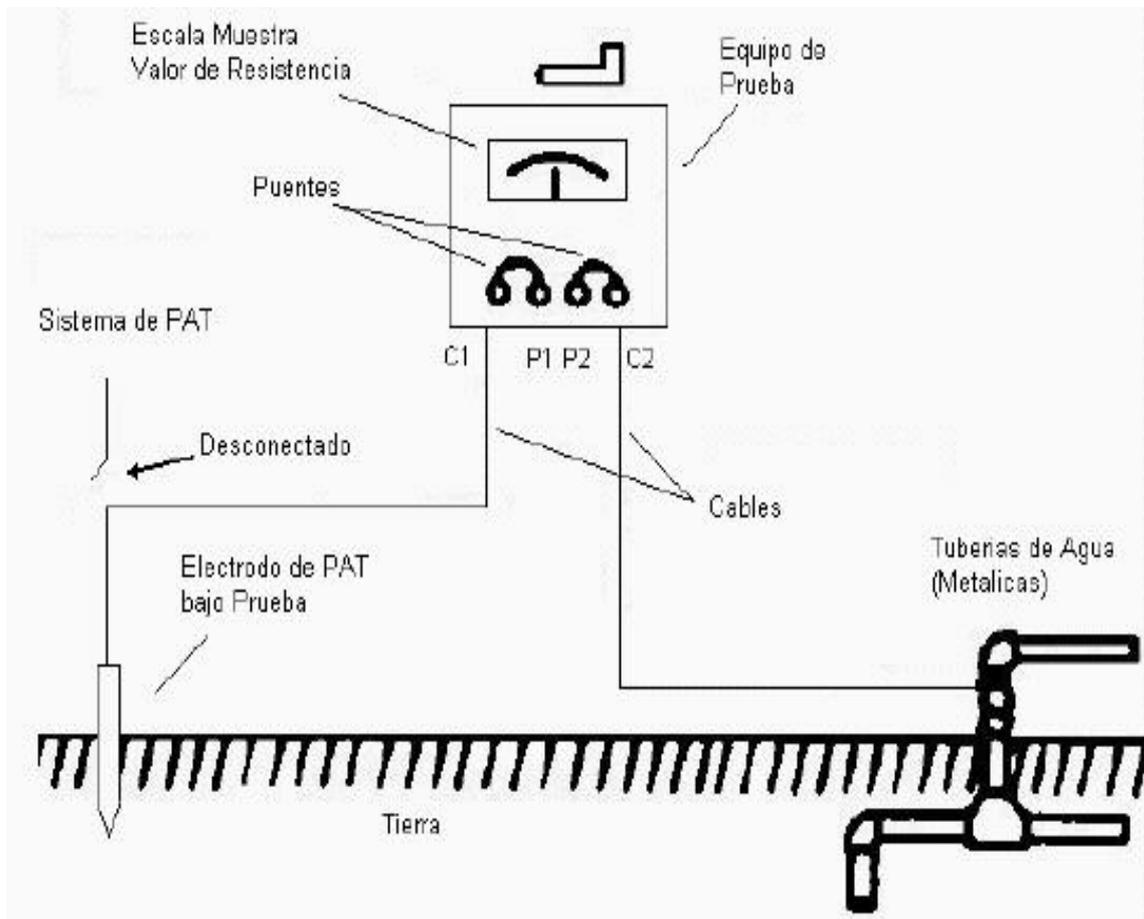
#### **6.4.4 MÉTODO DE DOS PUNTOS O POLOS. (MÉTODO DE MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA).**

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

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.

Figura47. Método de los dos Polos.



Miguel Martínez Lozano. "Métodos de medición de tierra en zonas urbanas".p.121.

#### 6.4.5 UBICACIÓN DE LOS ELECTRODOS DE PRUEBA EN MALLA A TIERRA.

Desgraciadamente no hay un método para determinar con exactitud la distancia requerida entre el electrodo de tierra y el de corriente. Esto se debe a que las condiciones del suelo son muy variables. En suelos muy conductivos, la resistencia del volumen alrededor del electrodo es comparativamente pequeña y se pueden realizar mediciones aceptables con una separación de tan sólo unos 8 metros. A medida de que las condiciones del suelo empeoran, y/o las especificaciones del electrodo bajan (valor de resistencia), el área de influencia del electrodo crece. Entonces, distancias mucho más grandes pueden ser requeridas para salir del área de influencia del electrodo que se está probando.

En general, basado en numerosas pruebas, se utiliza una distancia entre el electrodo bajo estudio y el electrodo de corriente igual a cuatro o cinco veces la longitud de la máxima dimensión del electrodo bajo prueba (otros autores recomiendan diez veces). Por ejemplo, con un electrodo simple el electrodo de corriente sería ubicado a una distancia igual a cinco veces (o cualquier otro múltiplo escogido) el largo del electrodo simple; Con un plato o base enterrada, cinco veces la diagonal; con un disco enterrado, cinco veces el diámetro; etc.

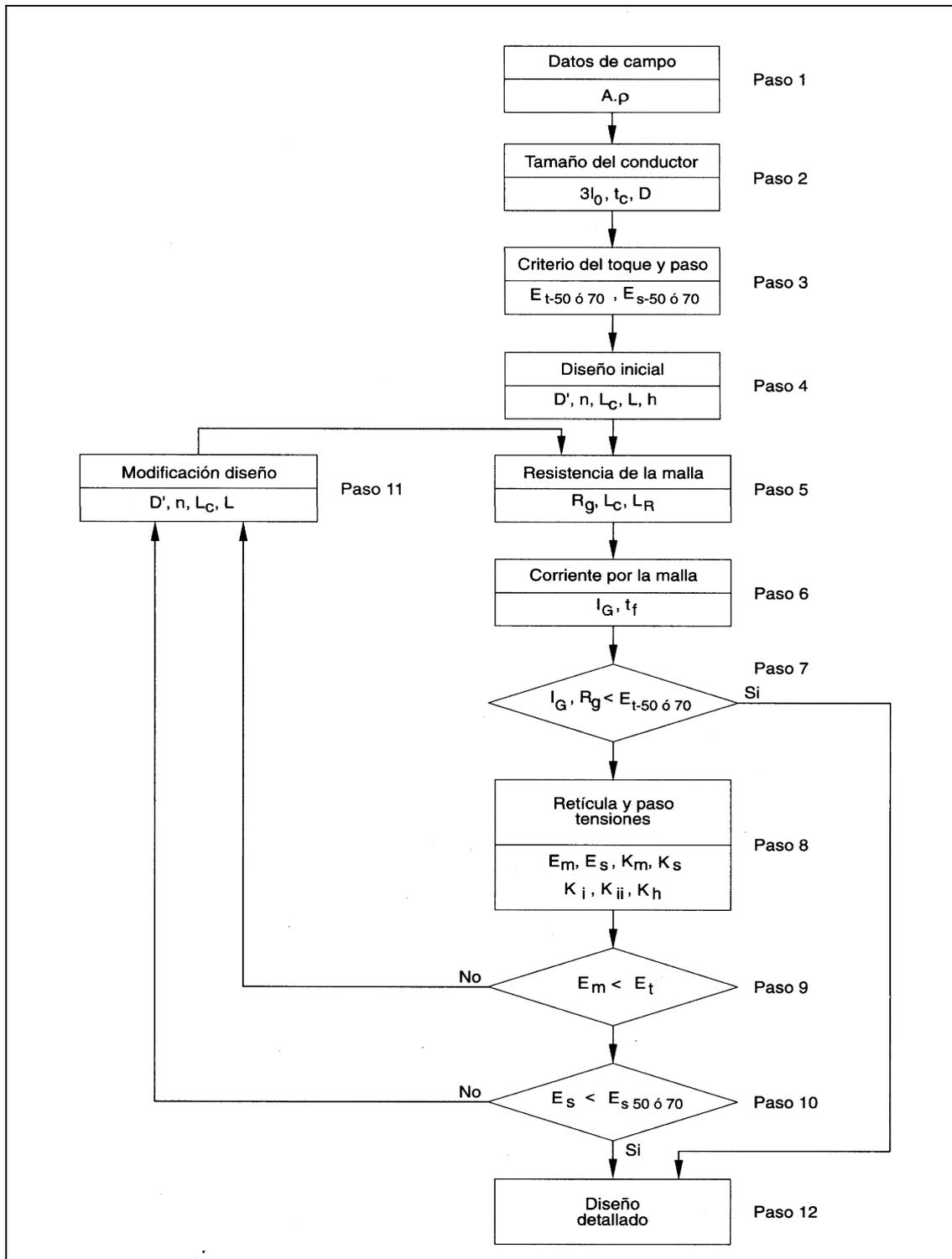
Estas son distancias aproximadas para realizar un primer intento. De no lograrse mediciones coherentes se debe repetir el proceso, variando la distancia, hasta lograrlo.

En el caso de un área pequeña o de un electrodo simple, se puede colocar el electrodo de corriente a unos 30 metros del electrodo bajo estudio (si el espacio permite llevar el electrodo de corriente a esa distancia) ya que a esta distancia se presume despreciable la influencia de uno respecto al otro. El electrodo de potencial se coloca a media distancia y se inicia el proceso de medición de resistencia como se describió anteriormente.

En cuanto a la distancia óptima para el electrodo de potencial para hallar el punto en que se estabiliza la curva de resistencia en función de la distancia del electrodo de potencial respecto al de tierra, se utiliza el método del 62% que se mencionara mas adelante.

## 6.5 DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA (NORMA IEEE 80).

Figura48. Diagrama de flujo para calculo de sistema de puesta a tierra.



### 6.5.1 PASO 1: MEDIDAS EN CAMPO.

De los diseños preliminares de la subestación se puede determinar el área de cubrimiento de la malla. Las mediciones de la resistividad darán el valor de  $\rho$  y el modelo del suelo a utilizar. El tipo de método de resistividad y de resistencia a escoger dependerá del tipo de suelo al cual se ajusta, el que sea de agrado para el diseñador teniendo en cuenta el mínimo de error. Estos métodos se mencionaran en la primera parte de este capítulo, por lo que poder encontrar todas las formulas referentes para el calculo de resistividad para cada método.

#### ❖ PRELIMINARES:

### ESTUDIO DE CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO MONOFASICA.

Se considera que al ocurrir una falla a tierra, los interruptores operan eliminando la falla del sistema, se debe asumir un tiempo de duración de la falla aplicando un factor D, que se toma de la siguiente tabla:

Duración de la Falla $t_c$ (ciclos)	Factor de Decremento (D)
0.5	1.65
6	1.25
15	1.10
30 ó más	1.10

Tabla8. Duraciones de falla y factores de decremento.

Entonces la corriente de falla será:

$$I_{cc} = I_{cc} * A * D \quad \text{ec ( 28)}$$

Donde:

$I_{cc}$  = Corriente de corto circuito monofasica en Amp.

A = Factor de seguridad  
 D = Factor de decremento.

### 6.5.2 PASO 2: CÁLCULO DE LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR.

Se determina el tamaño del conductor de la malla, teniendo en cuenta, en la estimación de la corriente de falla, la máxima corriente que podría llegar a conducir algún conductor del sistema de tierra y el tiempo máximo posible de interrupción.

La elección del conductor se realiza a partir de la fórmula de Sverak.

$$A_c = \frac{I}{\sqrt{\frac{TCAP \times 10^4}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}}} \quad \text{ec(29)}$$

Donde:

$A_c$ : área del conductor ( $\text{mm}^2$ ).

I: corriente eficaz (kA).

$T_m$ : temperatura máxima permitida ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_a$ : temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_r$ : temperatura de referencia para el material ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$\alpha_r$ : coeficiente térmico de resistividad a la temperatura  $T_r$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ ).

$\rho_r$ : resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia  $T_r$  ( $\mu\Omega\text{cm}$ ).

$K_0$ :  $(1/\alpha_r) - T_r$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$t_c$ : tiempo que fluye la corriente (s).

TCAP: factor de capacidad térmica ( $\text{J}/\text{cm}^3 \times ^{\circ}\text{C}$ ).

### 6.5.3 PASO 3. CALCULO DE LAS TENSIONES MAXIMAS PERMITIDAS.

Se determinan las tensiones máximas tolerables de toque y de paso para una persona que pesa por lo menos entre 50 y 70 Kg.

$$E_{s\ 70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{ec(30) tensión de paso.}$$

$$E_{t\ 70} = (1000 + 1,5C_s\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{ec(31) tensión de contacto.}$$

$t_s$  = tiempo máximo de operación de los relés

$C_s$  = es un factor de reducción que depende del espesor de la capa de cascajo de la superficie de la subestación  $h_s$  y del factor de reflexión  $K$ .

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad \text{ec(32)}$$

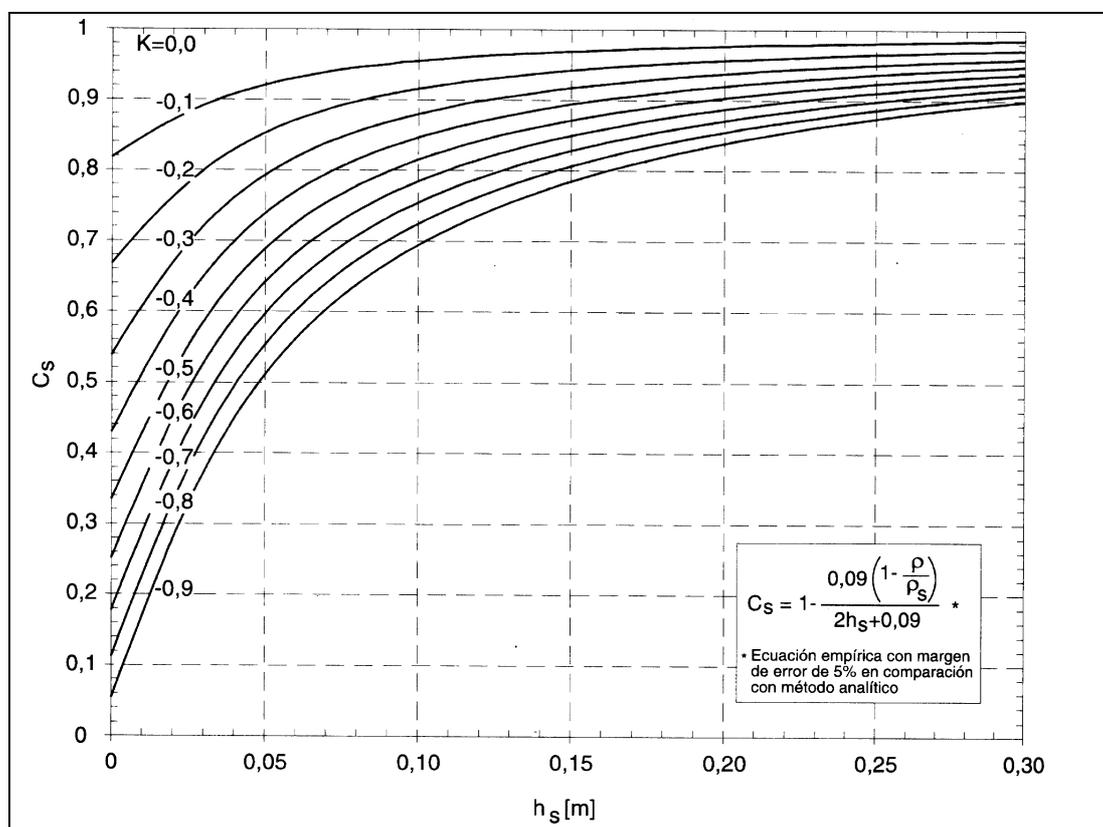
Donde:

$\rho$  = Resistividad de diseño calculada.

$\rho_s$  = Resistividad en la superficie del suelo.

El valor del factor de reducción  $C_s$ , es tomado de la figura:

Figura 49. Factor de Reducción  $C_s$  como una función del factor de reflexión  $K$  y del espesor de la capa de cascajo  $h_s$



#### 6.5.4 PASO 4: DISEÑO PRELIMINAR.

En el diseño inicial se considera la forma geométrica de la malla, sus dimensiones en x y y, la separación de los cables paralelos, el diámetro y longitud de las varillas teniendo en cuenta las normativa NTC2050 y el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.

#### 6.5.5 PASO 5. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.

La fórmula básica para determinar la resistencia de tierra de la subestación es:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \quad \text{ec(33)}$$

La anterior ecuación es razonablemente precisa para profundidades de la malla de aproximadamente 0,25 m. Para profundidades de malla entre 0,25 y 2,5 m se debe incluir una corrección por profundidad, lo cual resulta en la fórmula de Sverak:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad \text{ec(34)}$$

Donde:

L: longitud Efectiva de Conductor con varillas (m).

A: Área ocupada por la malla (m<sup>2</sup>).

h: Espesor de la capa del terreno (m).

#### 6.5.6 PASO 6. CALCULO DE MAXIMA CORRIENTE POR LA MALLA.

Es importante antes tener unos datos preliminares como son el estudio de cortocircuito en el paso 1, ese estudio determina la máxima corriente de falla (el cual es un dato suministrado por la empresa de distribución de energía Electrocosta ).

#### 6.5.7 PASO 7. CALCULO DEL GPR.

El potencial de la malla de tierra con respecto a tierra remota (GPR) se calcula como:

$$\text{GPR} = I_G * R \quad \text{ec(35)}$$

GPR = Potencial máximo de la malla.

$I_G$  : Corriente de corto circuito monofásica en Amp.

R : Resistencia de la malla esperada en Ohms.

Es importante que el potencial de la malla de tierra con respecto a la tierra remota GPR sea menor que la tensión de contacto permitida, si no es así se requiere determinar las tensiones de contacto y de paso que se presentan en la subestación y que cumplan con las condiciones de seguridad que se muestran en el diagrama de flujo, aunque es importante en el caso de que GPR sea menor que la tensión de contacto permitida se determinen las tensiones en la subestación como dato informativo del diseño.

#### **6.5.8 PASO 8. CALCULO DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO ESTIMADAS EN LA SUBESTACIÓN.**

- **Cálculo de la Tensión de contacto.**

La tensión de retícula (lazo o malla)  $E_m$  se puede aproximar por medio del siguiente grupo de fórmulas:

$$E_t = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} \quad \text{ec(36)}$$

Donde:

$$K_i = 0,644 + 0,148n \quad \text{ec(37)}$$

$K_{ii} = 1$  , para mallas con varillas en el perímetro o en las esquinas.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}}, \quad \text{ec(38)}$$

para mallas sin varillas en el perímetro o en las esquinas, pudiendo tener algunas en la parte central.

La longitud efectiva de cable y varillas enterradas para la tensión de contacto para mallas sin varillas o con pocas varillas en el interior de la malla está dada por la siguiente ecuación:

$$L_M = L_C + L_R \quad \text{ec(39)}$$

Cuando se tiene varillas en las esquinas o en el perímetro, la longitud efectiva de cable y varillas enterradas para la tensión de contacto se convierte en:

$$L_M = L_C + 1,55 + 1,22 \frac{L_r}{\sqrt{(L_x^2 + L_y^2)}} L_R \quad \text{ec(40)}$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p} \quad \text{ec(41)}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad \text{ec(42)}$$

$n_c + n_d = 1$  para mallas rectangulares.

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d \quad \text{ec(43)}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad \text{ec(44)}$$

$$K_m = \frac{1}{2n} \ln \left( \frac{D'^2}{16hD} + \frac{(D'+2h)^2}{8D'D} \right) \frac{h}{4D} + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{n(2n-1)} \right) \quad \text{ec(45)}$$

• **Cálculo de la Tensión de Paso.**

Para el enterramiento normal de la malla, se debe tener en cuenta que  $0,25 \text{ m} < h < 2,5 \text{ m}$ :

$$E_s = \frac{\rho I_g K_s K_i}{0,75L_c + 0,85L_R} \quad \text{ec(46)}$$

$$K_s = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D'+h} + \frac{1}{D'} (1 - 0,5^{n-2}) \right) \quad \text{ec(47)}$$

**6.5.9 PASO 9. TENSIÓN DE CONTACTO ESTIMADA VS TENSIÓN DE CONTACTO MÁXIMA PERMITIDA.**

Si la tensión calculada de contacto o lazo es menor que la tensión tolerable de toque, se continúa al paso 10; si no, se requiere la revisión del diseño de la malla como se indica en el paso 11. por lo tanto se continua al paso 10.

**6.5.10 PASO 10. TENSIÓN DE PASO ESTIMADA VS TENSIÓN DE PASO MÁXIMA PERMITIDA.**

Si la tensión de paso está por debajo de la tensión tolerable correspondiente, se continúa al paso 12; si no se revisa el diseño como se indica en el paso 11. Por lo tanto se requiere un arreglo al diseño. Por lo tanto se continua al paso 11.

### **6.5.11 PASO 11. REVISIÓN DEL DISEÑO PRELIMINAR.**

Si cualquiera de las tensiones tolerables se excede, se requiere la revisión y el rediseño de la malla. Este rediseño puede incluir aspectos tales como: menor espaciamiento de conductores, un número mayor de varillas, etc.

$E_t$  (estimada) <  $E_t$  (permitida) **tensiones de contacto.**

$E_s$  (estimada) <  $E_s$  (permitida) **tensiones de paso.**

De acuerdo a estas condiciones se podrá se denotar si el diseño cumple con las condiciones de seguridad pertinentes.

## **7. CAPITULO III:**

### **RECOMENDACIONES PARA CALCULOS DE MALLAS A TIERRA EN BASE A DIFERENTES MEDIDAS TOMADAS DE DIVERSOS TERRENOS.**

#### **7.1 MEDIDAS GENERALES EN O.A.T SECTOR CRESPO.**

La empresa de Organización de apoyo turístico se encuentra ubicada en el sector de Crespo, el terreno es de tipo arenilla por su cercanía al mar, se realizaron distintas medidas a diferentes espaciamientos de los electrodos utilizando el metodo de Wenner se calcularon difrentes datos de Resistividad como se muestra a continuacion.

#### **Primer Sondeo:**

Distancia entre electrodos =  $a = 1.0\text{m}$

Profundidad de los electrodos =  $b = 0.5\text{m}$

Se tomaron 3 medidas para obtener un promedio del valor de la resistividad y en diferentes lugares del terreno y a 90° tratando de que las lecturas no hayan sido afectadas por estructuras metálicas debajo de la tierra.

**Resistencias obtenidas en el instrumento de medida Teluometro:**

$$R1 = 55\Omega - R2 = 60\Omega - R3 = 53\Omega$$

**Resistividades obtenidas:**

$$\rho1 = 2\pi a R1 = 345.6 \Omega\cdot m - \rho2 = 2\pi a R2 = 376.9 \Omega\cdot m - \rho3 = 2\pi a R3 = 333.0 \Omega\cdot m$$

$$\text{Resistividad promedio} = \rho_{\text{promedio}} = (345.6+376.9+333)/3 = 351.8 \Omega\cdot m$$

**Segundo sondeo:**

$$\text{Distancia entre electrodos} = a = 2.0\text{m}$$

$$\text{Profundidad de los electrodos} = b = 0.5\text{m}$$

Resistencias obtenidas en el instrumento de medida Teluometro

$$R1 = 23\Omega - R2 = 20\Omega - R3 = 26\Omega$$

**Resistividades obtenidas:**

$$\rho1 = 2\pi a R1 = 289 \Omega\cdot m - \rho2 = 2\pi a R2 = 251 \Omega\cdot m - \rho3 = 2\pi a R3 = 326 \Omega\cdot m$$

$$\text{Resistividad promedio} = \rho_{\text{promedio}} = (289+251+326)/3 = 288.7 \Omega\cdot m$$

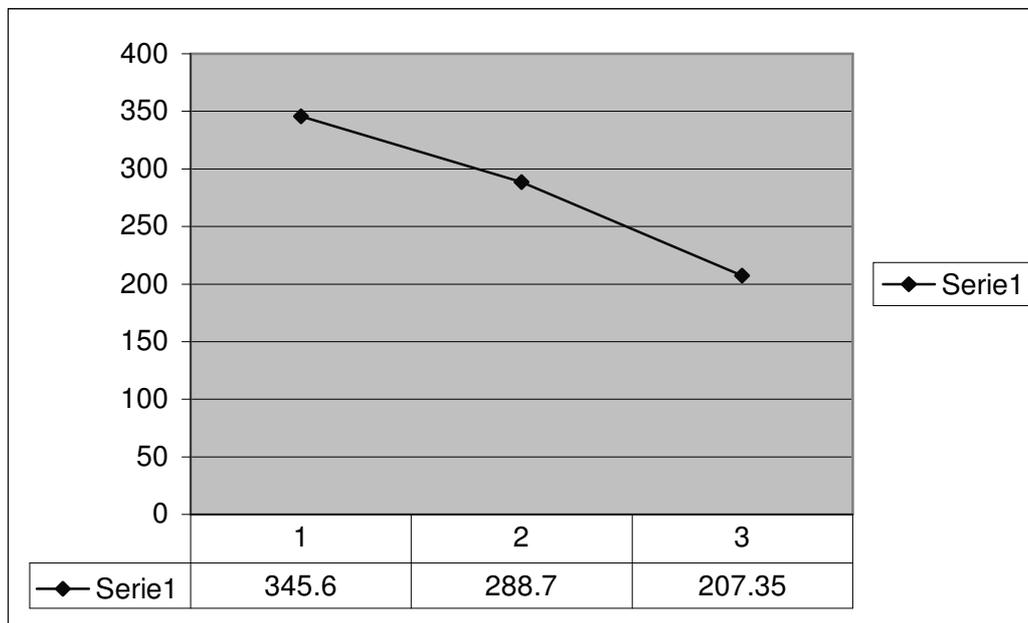
**Resistividad de Diseño.**

Obtenemos el promedio general de los valores finales de resistividad para cada espaciamiento

$$\rho = \frac{351.8 + 288.7}{2} = 320.25\Omega - m$$

A continuación se muestra el perfil de resistividad aparente del terreno en OAT la cual es una gráfica resultante de trazar el promedio de las mediciones de resistividad (R) contra distancia entre electrodos.

Figura50. Perfil de resistividad para OAT.



## 7.2 MEDIDAS GENERALES EN HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE.

El Hospital Universitario del Caribe presenta un terreno tipo arcilloso, se realizaron distintas medidas a diferentes espaciamientos de los electrodos utilizando el metodo de Wenner se calcularon difrentes datos de Resistividad como se muestra a continuacion.

### **Primer Sondeo:**

Distancia entre electrodos =  $a = 1.0\text{m}$

Profundidad de los electrodos =  $b = 0.5\text{m}$

Se tomaron 3 medidas para obtener un promedio del valor de la resistividad y en diferentes lugares del terreno y a  $90^\circ$  tratando de que las lecturas no hayan sido afectadas por estructuras metalicas debajo de la tierra.

### **Resistencias obtenidas en el instrumento de medida Teluometro:**

$R_1 = 10\Omega$  -  $R_2 = 9\Omega$  -  $R_3 = 12\Omega$

### **Resistividades obtenidas:**

$\rho_1 = 2\pi a R_1 = 62.8 \Omega\text{-m}$  -  $\rho_2 = 2\pi a R_2 = 56.5 \Omega\text{-m}$  -  $\rho_3 = 2\pi a R_3 = 75.39 \Omega\text{-m}$

**Resistividad promedio =  $\rho_{\text{promedio}} = (62.8+56.5+75.39)/3 = 64.5 \Omega\text{-m}$**

### **Segundo Sondeo:**

Distancia entre electrodos =  $a = 2.0\text{m}$

Profundidad de los electrodos =  $b = 0.5\text{m}$

### **Resistencias obtenidas en el instrumento de medida Teluometro:**

$R_1 = 4\Omega$  -  $R_2 = 3\Omega$  -  $R_3 = 6\Omega$

### **Resistividades obtenidas:**

$\rho_1 = 2\pi a R_1 = 50.26 \Omega\text{-m}$  -  $\rho_2 = 2\pi a R_2 = 37.7 \Omega\text{-m}$  -  $\rho_3 = 2\pi a R_3 = 75.4 \Omega\text{-m}$

**Resistividad promedio =  $\rho_{\text{promedio}} = (50.26+37.7+75.4)/3 = 54.45 \Omega\text{-m}$**

Por tanto tomando un valor promedio general para diseño obtenemos

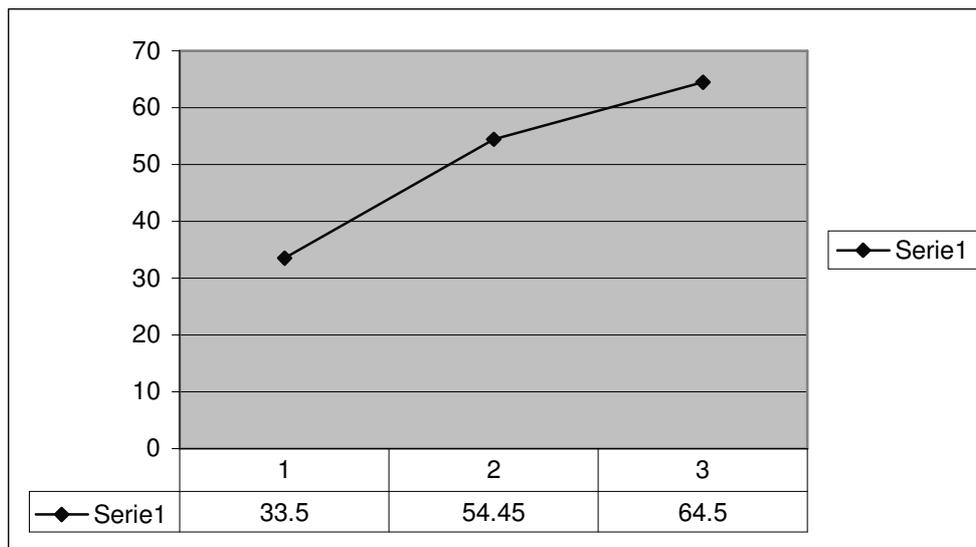
**Resistividad de Diseño.**

Obtenemos el promedio general de los valores finales de resistividad para cada espaciamento

$$\rho = \frac{64.5 + 54.45}{2} = 59.4 \Omega - m$$

A continuación se muestra el perfil de resistividad aparente del terreno en O.A.T la cual es una gráfica resultante de trazar el promedio de las mediciones de resistividad (R) contra distancia entre electrodos.

Figura51. Perfil de resistividad para HUC.

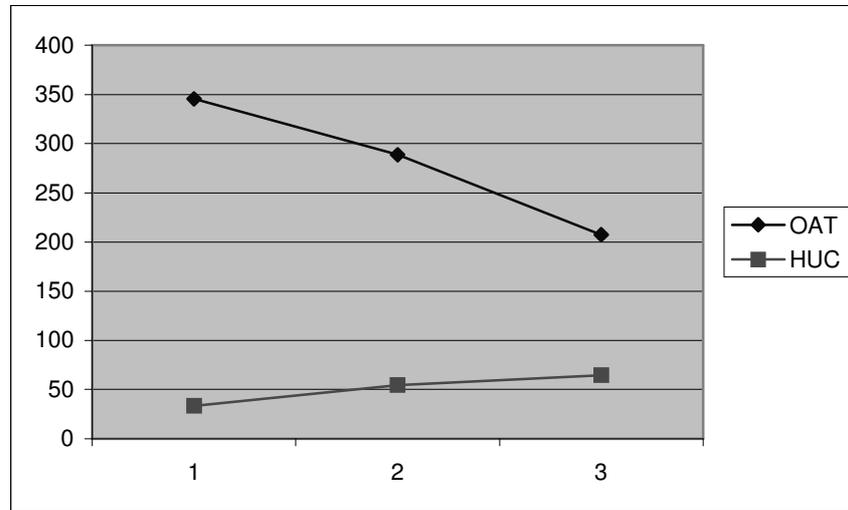


**7.3 TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS OBTENIDOS.**

Entidades	$\rho_1(a = 1m)$	$\rho_2(a = 2m)$	$\rho_{Promedio(Diseño)}$
OAT	351.8 $\Omega$ -m	288.7 $\Omega$ -m	320.25 $\Omega$ -m
HUC	64.5 $\Omega$ -m	54.45 $\Omega$ -m	59.48 $\Omega$ -m

Tabla9. comparacion de resistividades entre las 2 empresas.

Figura52. Perfiles de resistividades de ambas empresas.



De acuerdo a la tabla y a la grafica de comparacion de los perfiles para cada empresa, se puede deducir que en terreno arenoso, de arenilla la resistividad es mucho mayor, el metodo utilizado fue el metodo de Wenner, por lo que trabajamos con distintos espaciamentos entre los electrodos para tener un valor promedio de la resistividad con lo que se obtiene una mayor certeza y efectividad, para el terreno del Hospital Universitario del Caribe se obtuvo que por ser arcilloso sus características del suelo, afectan la resistividad con lo que se obtuvieron valores menores de resistividad, pero que se encuentra entre el rango de valores admisibles en cuanto a relacion de terreno y resistividad y que servira para el diseño del sistema de puesta a tierra.

#### 7.4 RECOMENDACIONES GENERALES.

Las condiciones ambientales pueden deteriorar el sistema de puesta a tierra con el tiempo, por lo que se recomienda su monitoreo de vez en cuando para verificar su estado y cerciorarse de que se tiene el valor de resistencia de puesta a tierra deseado. Asimismo, las condiciones ambientales modifican el valor de resistencia de puesta a tierra dependiendo de la estación en que ésta se mida.

Por ello, se recomienda que las mediciones regulares realizadas coincidan con diferentes estaciones del año y así asegurarse que se toman medidas en las condiciones más desfavorables.

Al momento de realizar la medición se debe prestar atención, entre otras cosas, a la colocación de los electrodos de prueba de modo que no se solapen las áreas de influencia de los mismos. De producirse un solapamiento de dichas áreas la lectura de resistencia dada por el equipo de medición no será la correcta, por lo que se debe seguir la recomendación del fabricante y los métodos estándares para la coacción de los electrodos.

La profundidad a la que se entierren los electrodos de prueba no afecta el resultado de la medición. De lo que hay que cerciorarse es de que dichos electrodos hagan buen contacto con tierra, ya sea compactando la tierra alrededor de los mismos o incluso humedeciendo la zona.

La presencia de objetos metálicos enterrados así como la de tendidos eléctricos, según sea el caso, afecta la medición. Por ello, se recomienda realizar varias mediciones en diferentes direcciones para el primer caso y una nueva medición en dirección perpendicular al tendido eléctrico. Así se obtendrá una mejor medición.

## **8. CAPITULO VI:**

### **PLAN DE SEGURIDAD, MANTENIMIENTO Y MEJORAMIENTO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.**

#### **8.1 GENERALIDADES.**

Un sistema de puesta a tierra es en parte, la más importante, de una instalación eléctrica y debe dársele un tratamiento acorde con su trascendencia. Esto significa que si no se llega a un punto optimo, debe hacerse esfuerzos para llevarla a la mejor condición, antes de la puesta en servicio. También debe someterse a un mantenimiento periódico para que siempre este en buenas condiciones.

Los equipos de naturaleza eléctrica, en alta o baja tensión, cuando por razones de mantenimiento son desconectados de su alimentación, deben conectarse a tierra antes de recibir servicio.

Se debe conectar a tierra para evitar accidentes por:

1. Tensiones inducidas por líneas adyacentes.
2. Fenómenos inducidos por corrientes de falla en conductores o estructuras metálicas cercanas.
3. Descargas atmosféricas.
4. Errores humanos al energizar circuitos equivocados.
5. Contactos accidentales con conductores energizados.
6. Mal funcionamiento de equipos de desconexión.

El caso 1 se presenta muy comúnmente en líneas subterráneas de distribución, el caso 6 en interruptores automáticos de circuitos de baja tensión y el caso 4, desgraciadamente de una manera muchas veces mortal, tanto en alta como en baja tensión.

Según datos mundiales, hay considerablemente más casos de accidentes por contacto accidental en líneas de baja que en alta tensión.

En alta tensión TODOS los circuitos de cualquier longitud deben ponerse a tierra para trabajar en ellos. Inclusive, los circuitos telefónicos también de longitud mediana, deben conectarse a tierra para darles servicio.

## **8.2 TECNICAS DE MEJORAMIENTO DE PUESTAS A TIERRA.**

A contar con los valores reducidos de resistencia de puesta a tierra, se deben tener varias ventajas, entre ellas una mejor protección a las personas y equipos. Se vuelve útil entonces, recoger aquellas practicas para lograr una decisión acertada. Dentro de algunas técnicas encontramos:

- instalar contrapesos.
- hacer anillos alrededor de las torres.

- hacer malla de tierra extensa.
- preparar concretos especiales.
- concretos conductivos.
- utilizar electrodos químicos.
- hacer rellenos.
- varillas de mayor diámetro.
- varillas mas largas.
- varillas en paralelo (electrodos múltiples).

### **8.3 MEJORAMIENTO DE RESISTIVIDAD DE UN TERRENO.**

En esta parte se van a describir los tratamientos del terreno más usuales para mejorar las puestas a tierra de una instalación que puede ser un domicilio o edificio. En el caso de terrenos rocosos o de alta resistividad deberá realizarse alrededor de los electrodos (picas o conductor enterrado) un relleno con tierra de cultivo de resistividad favorable para mejorar la calidad de contacto entre el electrodo y la tierra de relleno.

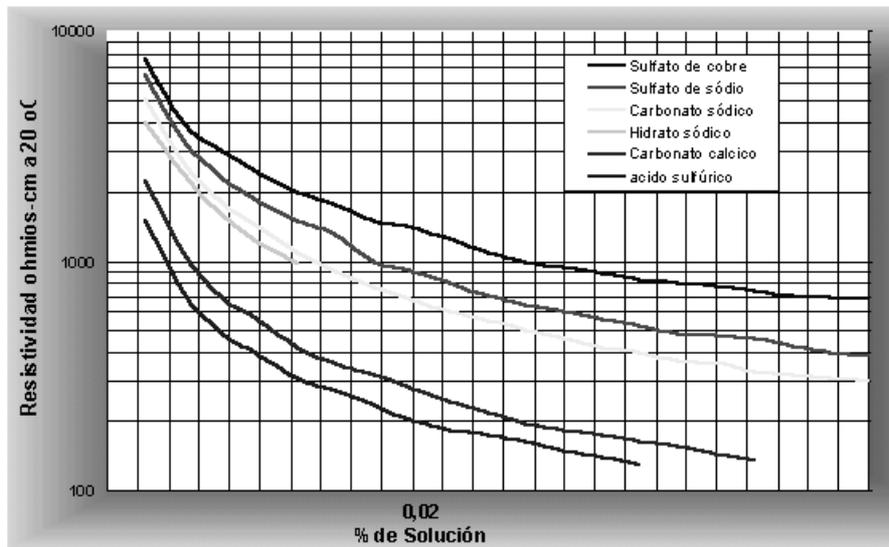
En algunos casos de sequía, terrenos desnudos, terrenos huecos, etc. Hacen que la resistencia de toma a tierra se eleve tomando valores peligrosos; en este caso es necesario realizar tratamiento del terreno.

La resistividad de un terreno depende de su contenido de electrolitos, que a su vez dependerá de su naturaleza mineralógica y del contenido de humedad. Cuando el terreno es mal conductor debe tratarse alrededor de los electrodos para disminuir artificialmente la resistividad del mismo afectando a su volumen del terreno. Esto puede lograrse realizando:

- Tratamiento con sales.
- Tratamiento con geles.
- Tratamiento por abonado electrolítico del terreno.

En la podemos observar la disminución de resistividad al aumentar la concentración de sales disueltas.

Figura53. Curvas de resistividad típica de soluciones más comunes.



#### 8.4 CARACTERISTICAS DE UN SUELO ARTIFICIAL.

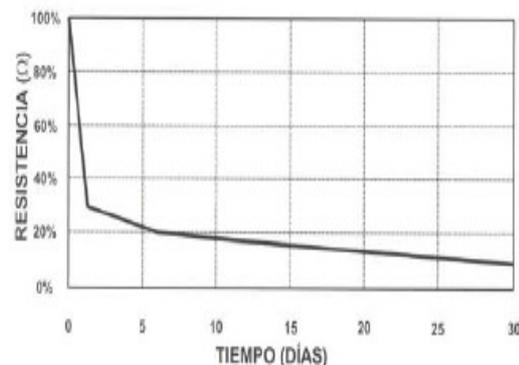
- Que no tenga factores de riesgo para quienes lo manipulen para animales.
- Que sea fácil de aplicar.
- Que retenga la mayor humedad posible, el mayor tiempo posible.
- Que su humedad relativa no exceda el 10%.
- Que permanezca inalterable con el tiempo.
- Que su costo no sea elevado.
- Que no dañe los suelos naturales donde se aplique.
- Que no se introduzca fácilmente entre las grifas o fisuras.
- Que los procesos químicos originados en la mezcla sean irreversibles.
- Que no se presentes migraciones con el tiempo.
- Que tenga alta capacidad de intercambio cationico.
- Que tenga elevada superficie especifica.
- Que sea soluble en agua.
- Que se tixotropico.

- Que su PH sea alcalino ( mayor que 7).
- Que su permitividad sea mayor a 10.
- Que tenga baja resistividad.
- Que combine la capacidad de absorción con adsorción.
- Que cambie sus propiedades con temperaturas hasta 1100 °C
- Que presente baja conductividad térmica.
- Estado: disección.
- Insolubilidad en agua.

### 8.5 SUELO ARTIFICIAL FAVIGEL DE COLOMBIA.

A continuación se resumen las características del suelo artificial FAVIGEL, desarrollado en COLOMBIA, cuya marca registrada es FAVIGEL<sup>7</sup>. Es un suelo artificial compuesto, que se desarrollo dentro de un amplio plan de investigación interdisciplinaria, como respuesta a la necesidad imperiosa de obtener un agente que redujera en forma efectiva y permanente la resistencia de las puestas a tierra. Permite un tratamiento físico- químico al terreno circundante al electrodo que le garantiza, un aumento considerable de su conductividad. Su nombre se origino del nombre de quien lo desarrollo y de la consistencia que toma cuando se hidrata.

Figura54. Reducción de puesta a tierra con Favigel.



Favio Casas. "Tierras soporte de la seguridad eléctrica".p.220.

<sup>7</sup> Suelo artificial para mejoramiento de resistividad de suelos. favigel@etb.net.co

### **8.5.1 ¿QUE VENTAJAS OFRECE?**

Por generar un proceso físico químico y no solamente químico, presenta una estabilidad superior a otros tratamientos.

Las exigencias de excavación son mucho menores que con otros métodos.

Debido a que sus componentes no son perjudiciales para el ser humano o para animales, lo hace un producto totalmente ecológico.

Ha demostrado mayor efectividad en la reducción de la resistencia de la puestas a tierra comparado con productos similares.

Su facilidad de aplicación, pero no requerir hidratación previa , elimina el manejo de recipientes , o herramientas adicionales.

### **8.5.2 CUALES SON LAS PRINCIPALES CARACTERISTICAS FAVIGEL.**

- Seguridad ecológica: no ofrece peligro para quienes, lo manipulan o para las personas y animales que pueden entrar en contacto con favigel.
- Economía: por su gran efectividad, la relación costo- beneficio, supera ampliamente cualquier otra solución.
- Estabilidad: por desarrollar un mínimo de procesos químicos, Favigel presenta una gran estabilidad independiente del tiempo.
- Alta temperatura de fusión: debido a altas temperaturas presentes en caso de una falla, muchos suelos naturales se cristalizan 200 o 300 °C. Favigel presenta una temperatura de fusión mayor de 1200°C. que le permite soportar las fallas.
- Baja resistividad: una vez humedecido mantiene su resistividad inferior a 0.5 ohms, lo que se traduce en mejoras de la resistencia de puesta a tierra superiores al 90%.
- Tixotropía<sup>8</sup>: gracias a su forma de retención de humedad, Favigel, puede pasar del estado coloidal, al estado líquido y viceversa.

---

<sup>8</sup> Fenómeno de pérdida de Resistencia de un coloide.

- Retención de humedad: por su capacidad de absorción y adsorción de agua es un excelente material higroscópico, ya que su humedad relativa es menor al 8%.
- Anticorrosivo: su PH entre 7 y 7.5 garantiza mínima corrosión en los electrodos.
- Capacidad de intercambio cationico: 36.4
- Limite liquido: 78.7%.
- Limite plástico: 56%.
- Densidad: 0.91 gr/ cm<sup>3</sup>
- Calor especifico: 1.020j/g°C

### **8.5.3 COMO REALIZA SU HIDRATACION?**

En todos los casos Favigel se aplica en su estado seco. La hidratación puede ser natural o manual y se puede hacer cuando ya se haya vertido en la excavación o antes. Quizás la mayor ventaja de Favigel estriba en que no requiere hidratación previa por agitación, ni preparación especial en cubetas, ni cargar los elementos especiales hasta el sitio. Si se desea obtener resultados inmediatos, debe agregarse aproximadamente 5 galones de agua por cada dosis utilizada. En sitios a la intemperie, alejados o de difícil acceso como torres de líneas de transmisión o de comunicaciones, no exige transporte de agua hasta el sitio, puesto que se hidratará con agua lluvia.

### **8.6 PLAN DE MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.**

El mantenimiento, como toda una función administrativa, requiere de actividades de análisis para conocer las fallas y sus medidas remediales, el planteamiento para determinar los recursos necesarios y una programación para determinar la época de su realización.

Cuando se ejecuten labores mantenimiento en un sistema eléctrico que involucren los sistemas de puesta a tierra, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

ITEM	REALIZAR	ACCION PREVENTIVA
1	A seis meses	Revisión y ajustes necesarios del SIPRA. Revisión de estructuras de anclaje: aisladores y conectores.
2	Anual	Medición de resistencia de puesta a tierra. Medición de equipotencialidad. Revisión y ajustes necesarios del SIPRA. Revisión de estructuras de anclaje: aisladores y conectores.
3	Cinco años	Evaluación de resistencia de cada puesta a tierra. Medición de equipotencialización de cada SPT. Medición de resistencia de puesta a tierra de todo el SPT interconectado.
4	Diez años	Exploración de conexión del electrodo de tierra(una muestra). Las actividades propias de cada año.
5	Veinte años	Diagnosticar. Evaluar. Rediseñar. Proyectar acciones correctivas.

Tabla10 . Mantenimiento de un SPT.

### 8.7 INSPECCIONES, CONSERVACIÓN Y RENOVACIÓN.

Las puestas a tierra por su ubicación y funcionamiento discreto, son olvidadas con el transcurso del tiempo, lo cual no favorece a la permanencia de sus características y prestaciones, que sólo merecen una esporádica atención de conservación.

### **8.7.1 INSPECCIÓN DE LAS PUESTAS A TIERRA EN GENERAL.**

#### **Puestas a tierra domésticas.**

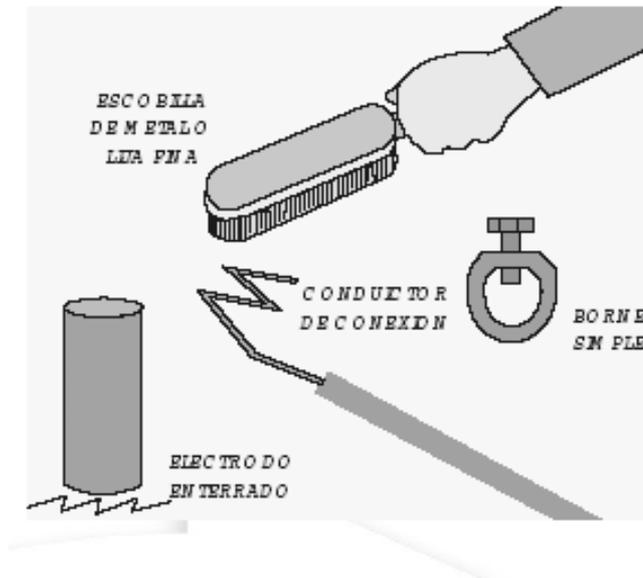
Consiste en retirar el borne o la grapa de presión para su limpieza con trapo y después con escobilla metálica y lija fina 120; luego, estando el electrodo libre, se mide la resistencia de dispersión, para comparar dicho parámetro con las medidas anteriores o con la requerida por la instalación.

#### **Puestas a tierra comerciales.**

Esta labor es idéntica a la anterior, se hace con el consentimiento de todos los usuarios y en los casos de servicios que no admiten la desconexión de tierra (comunicaciones, transferencia de datos, procesamiento, control, etc.); antes de la inspección se deberá habilitar a una distancia mayor a 5,0 m, una puesta a tierra temporal alterna luego:

- Hacer un puente desde la puesta a tierra – temporal hasta el extremo del conductor de conexión a la puesta a tierra permanente.
- Desconectar de la puesta a tierra – permanente la extremidad con puente del conductor de conexión y proceder a la inspección.
- Levantar el puente desconectado en sus extremos y retirar la puesta a tierra temporal.

Figura55. Limpieza de conexiones de puesta a tierra.



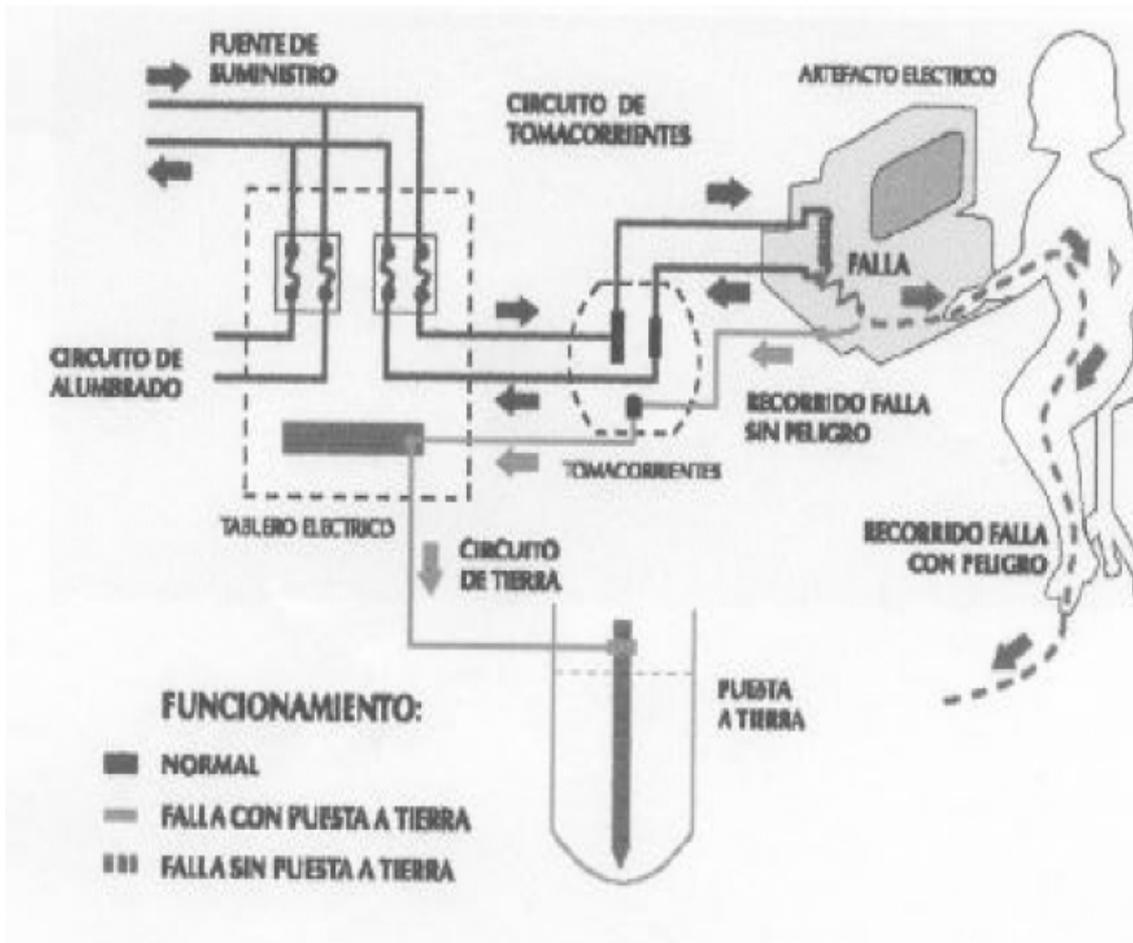
Tomado de: curso Virtual Tecsup.

### 8.8 SUELOS DE CONCRETO O MATERIAL EN EL CUAL NO SE PUEDEN INSERTAR LOS ELECTRODOS.

Algunas veces el electrodo bajo prueba está instalado en cemento, concreto o cualquier superficie en la que no es fácil la colocación de los electrodos de prueba. En estos casos, dependiendo de la sensibilidad del equipo, puede bastar colocar los electrodos sobre la superficie y mojar dicha área, si el equipo tiene una gran tolerancia a grandes resistencias de contacto. Sin embargo, si esto no es suficiente y el equipo de medición presenta alarmas de alta resistencia, se pueden utilizar mallas o pantallas metálicas y agua, para disminuir la resistencia de contacto de los electrodos con el suelo. La distancia a la cual se colocan estas pantallas e calculada de igual forma que con los electrodos.

## 8.9 ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PUESTA A TIERRA.

Figura56 . Funcionamiento de una puesta a tierra.



Wilbert Rene." Diseño y Ejecución de una Puesta a Tierra de Baja Resistencia."p.140

## **9. CAPITULO V.**

### **DISEÑO DE LA MALLA DE TIERRA PARA LA SUBESTACION ELECTRICA DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE. NORMA IEEE 80.**

En el diagrama de bloques que se muestra en el capítulo 2 se indican los pasos para el diseño de la malla a tierra, se estipularan esos pasos para llevar a cabo el diseño.

#### **9.1 PASO 1: MEDIDAS EN CAMPO.**

De los diseños preliminares de la subestación se puede determinar el área de cubrimiento de la malla. Las mediciones de la resistividad darán el valor de  $\rho$  y el modelo del suelo a utilizar.

##### **9.1.1 MEDIDAS DE RESISTIVIDAD.**

Para el HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE se diseñó el sistema de puesta a tierra para la subestación eléctrica, se tomó como base una configuración rectangular en malla.

Cabe resaltar que por ser una entidad Hospitalaria, el diseño es de sumo cuidado, ya que además de preservar la vida humana, hay que proteger equipos reguladores de tensión como UPS para equipos médicos.

El sistema de conexión es de tierra aislada y consta de un transformador de 1600 KVA y un transformador auxiliar de 1000 Kva, se presentan un barraje principal y un barraje regulado como conformación del sistema. Todos los cálculos que se presentan son en referencia al sistema de potencia en baja tensión no regulado y al sistema de media tensión. Los sistemas regulados en el Hospital tienen un promedio de 64Kva( 8 UPS de 8Kva), por lo que la disposición de las varillas se adopta en base al diseño de potencia no regulada, que es mucho más extenso y sirve de base para determinar el número de varillas utilizado.

El Hospital Universitario del Caribe presenta un terreno tipo arcilloso, se realizaron distintas medidas a diferentes espaciamientos de los electrodos utilizando el metodo de Wenner y se calcularon difrentes datos de Resistividad como se muestra a continuacion.

**De los datos del capitulo III tenemos:**

**Primer Sondeo:**

Distancia entre electrodos =  $a = 1.0\text{m}$

Profundidad de los electrodos =  $b = 0.5\text{m}$

**Resistencias obtenidas en el instrumento de medida Teluometro:**

$R_1 = 10\Omega$  -  $R_2 = 9\Omega$  -  $R_3 = 12\Omega$

**Resistividades obtenidas:**

$\rho_1 = 2\pi a R_1 = 62.8 \Omega\text{-m}$  -  $\rho_2 = 2\pi a R_2 = 56.5 \Omega\text{-m}$  -  $\rho_3 = 2\pi a R_3 = 75.39 \Omega\text{-m}$

**Resistividad promedio** =  $\rho_{\text{promedio}} = (62.8+56.5+75.39)/3 = \mathbf{64.5 \Omega\text{-m}}$

**Segundo Sondeo:**

Distancia entre electrodos =  $a = 2.0\text{m}$

Profundidad de los electrodos =  $b = 0.5\text{m}$

**Resistencias obtenidas en el instrumento de medida Teluometro:**

$R_1 = 4\Omega$  -  $R_2 = 3\Omega$  -  $R_3 = 6\Omega$

**Resistividades obtenidas:**

$\rho_1 = 2\pi a R_1 = 50.26 \Omega\text{-m}$  -  $\rho_2 = 2\pi a R_2 = 37.7 \Omega\text{-m}$  -  $\rho_3 = 2\pi a R_3 = 75.4 \Omega\text{-m}$

**Resistividad promedio** =  $\rho_{\text{promedio}} = (50.26+37.7+75.4)/3 = 54.45 \Omega\text{-m}$

**Resistividad de Diseño:** obtenemos el promedio general de los valores finales de resistividad para cada espaciamento

$$\rho = \frac{64.5 + 54.45}{2} = 59.4 \Omega - m$$

Para las medidas de resistividad de superficie  $\rho_s$ , se adopto un valor de:

**$\rho_s = 2.5 \text{ K}\Omega\text{-m}$ .**

#### ❖ PRELIMINARES:

- **ESTUDIO DE CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO MONOFASICA.**

Se considera que al ocurrir una falla a tierra, los interruptores operan eliminando la falla del sistema, asumiremos un tiempo de duración de la falla menor a 0.1 segundos que equivale a 6 ciclos, por esta razón aplicaremos un factor de 1.25 (D = 1.25) tomado de la tabla 8, del capítulo 2.

Para los cálculos de referencia se adopta la corriente de corto circuito por lado de media tensión en el punto, para el HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE, de la empresa de distribución de energía, en este caso Electrocosta:

$I_{cc} = 1.5 \text{ KA}$  ; reemplazando en la ec (49) tenemos:

**$I_{cc} = 1.5 \text{ KA} * 1.25 = 1.87 \text{ KA}$ .**

- **ESQUEMA PRELIMINAR DE MALLA A TIERRA.**

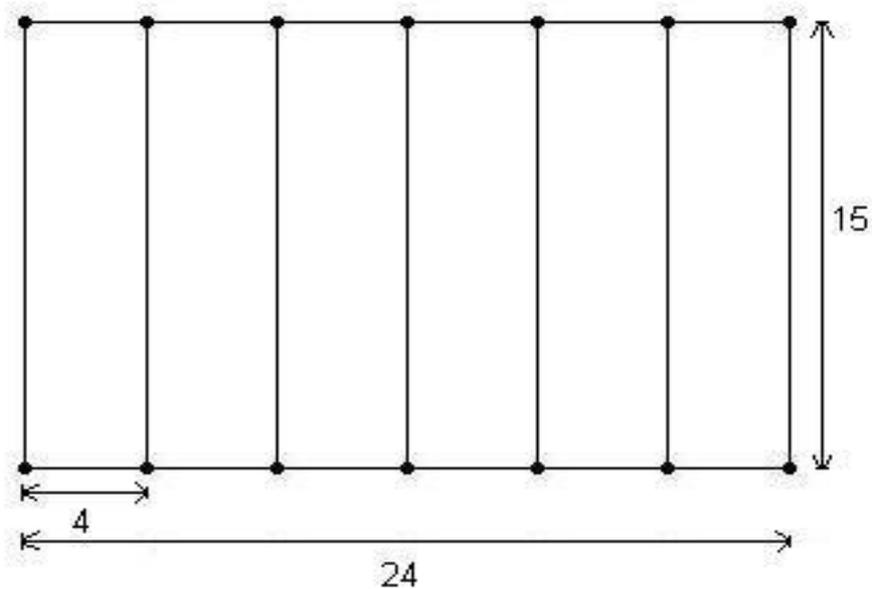


Figura57. Esquema de malla a tierra H.U.C

❖ **CONVENCIONES DE DISEÑO:**

Símbolo	Descripción
P	Valor de la resistividad del terreno, $\Omega\text{m}$ . 59.4 $\Omega\text{m}$
$E_{s-70}$	Tensión Máxima Permissible de Paso (V).
$E_{t-70}$	Tensión Máxima Permissible de contacto o toque(V).
$t_s$	Duración de la corriente de choque; tiempo máximo de operación de los relés (s). 0.1 seg
$\rho_s$	Resistividad de la capa de acabado de la superficie de la subestación. 2.500 $\Omega\text{m}$ .
$C_s$	Factor de reducción.
K	Factor de reflexión.
$R_G$	Resistencia de tierra de la subestación, $\Omega$ .
A	Area ocupada por la malla ( $\text{m}^2$ ). 360 $\text{m}^2$

$h$	Espesor de la capa del terreno (m).= 0.1 m
$I_G$	Máxima corriente por la malla (A).
$K_S$	Factor de geometría para tensiones de paso.
$D$	Diámetro del conductor de la malla (m).
$D'$	Espacio entre conductores paralelos (m).
$n$	Número de conductores efectivos en paralelo en una dirección.
$L$	Cantidad total de cable enterrado incluyendo la longitud de las varillas (m).
$L_C$	Longitud total del cable enterrado (m).
$L_r$	Longitud promedio de cada varilla (m).
$L_R$	Longitud total de varillas enterradas (m).
$L_M$	Longitud efectiva de conductor para tensión de paso (m).
$L_x$	Máxima longitud en la malla en el eje X (m).
$L_y$	Máxima longitud en la malla en el eje Y (m).
$L_p$	Longitud del perímetro de la malla (m).
$D_m$	Máxima distancia entre dos puntos en la malla (m).
$K_i$	Factor de corrección por geometría de malla.
$K_m$	Factor de geometría para tensiones de retícula.
$K_{ii}$	Factor de corrección, varillas en las esquinas de la malla.
$K_h$	Factor de enterramiento de la malla.
$h_0$	Profundidad de la malla enterrada (m).= 0.5 m

Tabla11 . Convenciones.

## 9.2 PASO 2: CÁLCULO DE LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR.

Se determina el tamaño del conductor de la malla, teniendo en cuenta, en la estimación de la corriente de falla, la máxima corriente que podría llegar a conducir algún conductor del sistema de tierra y el tiempo máximo posible de interrupción.

La elección del conductor se realiza a partir de la fórmula de Sverak<sup>9</sup> ec(29)

El diseño de la malla se hará con conductor de cobre desnudo en frío debido a que éste presenta una buena conductividad, y se ubica en un punto medio en cuanto a

<sup>9</sup> New Formula for Calculating the Substation Ground Grid Resistance S. Mangione (Italy)

corrosión y soportabilidad mecánica comparado con conductores de acero y aluminio.

❖ **CONSTANTE DE LOS MATERIALES.**

DESCRIPCIO	CONDUCTIVIDAD (%)	$\alpha_r$ (20 °C a)	$K_0$ (C°)	$T_m$ (°C)	$\rho_r$ ( $\mu\Omega\text{cm}$ )	TCAP ( $\text{J}/\text{cm}^3 \times ^\circ\text{C}$ )
Cobre recocido	100	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Cobre en Frio	97	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Acero cobrizado	40	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Aluminio EC	30	0.00378	245	1084	5.86	2.56
Aleación 5005	61	0.00353	263	657	3.22	2.60
Aleación 6201	53.5	0.00360	268	652	3.28	2.60
Acero alumizado	52.5	0.00323	657	654	8.48	2.60
Acero galvanizado	20.3	0.03320	293	419	20.1	3.93
Acero inoxidable	2.4	0.0316	749	1400	72	4.03

Tabla12. Tabla para cálculo de conductor de malla.

Para un conductor de cobre en frío y Reemplazando en la ec (29) con los respectivos valores tenemos:

$$A_c = \frac{1.87 \times 10^3}{\sqrt{\left( \frac{3.42 \times 10^{-4}}{0.1 * 0.00381 * 1.78} \right) \ln \left( \frac{242 + 1084}{35 + 1084} \right)}} = 15.4 \text{ mm}^2$$

La evaluación del calibre del conductor determinó el empleo de un cable de cobre calibre 21.15 mm<sup>2</sup> # 4 AWG (IEC) para la subestación estudiada (diámetro = 5.89 mm). Mas sin embargo por consideraciones de diseño se instalo un calibre # 1/0 AWG.

### 9.3 PASO 3. CALCULO DE LAS TENSIONES MAXIMAS PERMITIDAS.

Para el patio de conexión se toma como referencia una profundidad 10cm de espesor. Se considera que el tiempo máximo de operación de los reles es de 0.1 seg.

Se determinan las tensiones máximas tolerables de toque y de paso para una persona que pesa por lo menos entre 50 y 70 Kg.

Para el calculo de k, reemplazamos en la ec(32)

$$K = \frac{59.4 - 2500}{59.4 + 2500} = 0.95$$

El valor del factor de reducción Cs, es tomado de la figura47 en el capitulo2, para valores de k =0.92 y hs = 10 cm. Según la figura el valor de Cs =0.1.

- El patio de conexiones tendrá un acabado en cascajo con una resistividad de 2500 Ωm y 10cm de espesor. Reemplazando en las ecuaciones 30 y 31 para las tensiones de paso y de contacto tenemos:

$$E_{t\ 70} = (1000 + 1,5 * 0.1 * 2500) \frac{0,157}{\sqrt{0.1}} \quad \text{tensión de contacto} = 682.65 \text{ V}$$

$$E_{s\ 70} = (1000 + 6 * 0.1 * 2500) \frac{0,157}{\sqrt{0.1}} \quad \text{tensión de paso} = 1.250 \text{ V}$$

REFERENCIA	H.U.C
Factor K	-0,95
Factor de Reducción ( $C_s$ )	0,1
Tensión de Paso (V)	1.250
Tensión de contacto(V)	682.65

Tabla13. Tensiones de paso y contacto permitidas.

#### 9.4 PASO 4: DISEÑO PRELIMINAR.

Un diseño inicial considera una malla rectangular de 24 m por 15 m (360 m<sup>2</sup>), con una separación de cables paralelos de 4 m; también se considera el uso de 12 varillas de 2,4 m de longitud en la periferia de la malla (la densidad de varillas se incrementará a medida que se acerque a los vértices de la malla con el fin de reducir los niveles altos de tensión que allí se presentan. La longitud y diámetro de las varillas se toman siguiendo la norma NTC 2050, en la sección 250-83 del numeral H, Instalación del electrodo de puesta a tierra del sistema en su apartado c.

REFERENCIA	H.U.C
$L_c$ : Longitud de Cable enterrado (m).	138
$L_p$ : Longitud del perímetro de la malla(m)	78
$L_R$ : Longitud Total de Varillas (m).	28.8
$L_r$ : Longitud de una varilla (m)	2.4
L: Longitud Efectiva de Conductor con varillas (m).	166.8

Tabla14. Longitudes para cálculos de diseño.

**Consideración para diseño:**  $L = L_R + L_c$

### 9.5 PASO 5. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.

La ecuación ec(33) es razonablemente precisa para profundidades de la malla de aproximadamente 0,25 m. Para profundidades de malla entre 0,25 y 2,5 m se debe incluir una corrección por profundidad, lo cual resulta en la fórmula de Sverak ec(34):

Reemplazando en la ec(34) tenemos:

$$R_g = 59.4 \left[ \frac{1}{166.8} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 360}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.1 \sqrt{\frac{20}{360}}} \right) \right] = R_g = 1.75 \Omega$$

### 9.6 PASO 6. CALCULO DE MAXIMA CORRIENTE POR LA MALLA.

El estudio de corto circuito determino que la máxima corriente de falla es monofasica con un valor de 10.000 A (dato suministrado por la empresa de distribución de energía Electrocosta), con un factor de depreciación de 0.15%= 1500 A.

### 9.7 PASO 7. CALCULO DEL GPR.

Reemplazamos en la ec(35) y obtenemos:

$$GPR = I_G \cdot R_g = 1500 \cdot 1.75 = 2.535 \text{ V.}$$

REFERENCIA	H.U.C
GPR (V)	2.535

Tabla15. GPR para H.U.C.

Como el potencial de la malla de tierra con respecto a la tierra remota GPR es mayor que la tensión de contacto permitida (en ambos casos), se requiere determinar las tensiones de contacto y de paso que se presentan en la subestación.

## **9.8 PASO 8. CALCULO DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO ESTIMADAS EN LA SUBESTACION DEL H.U.C.**

- **Cálculo de la Tensión de contacto.**

Calculando primero los valores de n y k:

Reemplazando en la ec(41) tenemos:

$$n_a = \frac{2 * 138}{78} = \mathbf{3.53}$$

Reemplazando en la ec(42) tenemos:

$$n_b = \sqrt{\frac{78}{4\sqrt{360}}} = \mathbf{1.01}$$

$n_c = n_d = 1$  para mallas rectangulares.

Reemplazando en la ec(43)

$$n = 3.53 * 1.1 * 1 = \mathbf{3.56}$$

Reemplazando en la ec(44) tenemos :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.1}{0.5}} = \mathbf{1.09}$$

Reemplazando en la ec(45) tenemos:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{D'^2}{16hD} + \frac{(D'+2h)^2}{8D'D} \right) \frac{h}{4D} + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi (2n-1)} \right) = 0.37$$

Reemplazando en la ec(37) tenemos:

$$K_i = 0,644 + 0,148 * 3.56 = 1.17$$

Reemplazando en la ec(40) tenemos:

$$L_M = 138 + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{2.4}{\sqrt{(24^2 + 15^2)}} \right) \right] 28.8 = 178.34 \text{mts}$$

Por lo tanto reemplazando en la ec(36) tenemos:

$$E_s = \frac{59.4 * 1.87 \times 10^3 * 0.37 * 1.17}{178.34} = 331.25 \text{ V}$$

- **Cálculo de la Tensión de Paso.**

Para el enterramiento normal de la malla, donde  $0,25 \text{ m} < h < 2,5 \text{ m}$ , se tiene:

Reemplazando en las ecuaciones 46 y 47 tenemos:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D'+h} + \frac{1}{D'} (1 - 0,5^{n^2}) \right) = 0.6$$

$$E_s = \frac{59.4 * 1.87 * 10^3 * 0.6 * 1.17}{0.75 * 138 + 0.85 * 28.8} = 771.10 \text{ V}$$

REFERENCIA	H.U.C
Tensión de Contacto(V)	331.25
Tensión de Paso (V)	771.10

Tabla16. Tensiones estimadas en la subestación de H.U.C

REFERENCIA	Tensiones Tolerables
Tensión de Paso (V)	1.250
Tensión de contacto(V)	682.65

Tabla17. Tensiones de paso tolerables por el cuerpo humano.

### 9.9 PASO 9. TENSIÓN DE CONTACTO ESTIMADA VS TENSIÓN DE CONTACTO MÁXIMA PERMITIDA.

Si la tensión calculada de contacto o lazo es menor que la tensión tolerable de toque, se continúa al paso 10; si no, se requiere la revisión del diseño de la malla como se indica en el paso 11. por lo tanto se continua al paso 10.

### 9.10 PASO 10. TENSIÓN DE PASO ESTIMADA VS TENSIÓN DE PASO MÁXIMA PERMITIDA.

Si la tensión de paso está por debajo de la tensión tolerable correspondiente, se continúa al paso 12; si no se revisa el diseño como se indica en el paso 11. Por lo tanto se requiere un arreglo al diseño. Por lo tanto se continúa al paso 11.

### 9.11 PASO 11. REVISIÓN DEL DISEÑO PRELIMINAR.

Si cualquiera de las tensiones tolerables se excede, se requiere la revisión y el rediseño de la malla. Este rediseño puede incluir aspectos tales como: menor espaciamiento de conductores, un número mayor de varillas, etc.

De las condiciones del problema tenemos:

**331.25 < 682.65** *tensiones de contacto.*

**771.10 < 1.250** *tensiones de paso.*

De los cálculos se denota que el diseño cumple con las condiciones de seguridad pertinentes. A partir de este se realiza un diseño detallado, para el cual se adjuntan detalles de construcción y de conexionado de equipos.

## **9.12 NOTAS DE INSTALACIÓN DE SECCIONES DE CONDUCTOR CALCULADAS.**

- ❖ Se utilizó soldadura exotérmica<sup>10</sup> para efectuar las uniones del sistema de puesta a tierra, para de esta manera garantizar que la temperatura máxima permitida sea igual a la temperatura de fusión del conductor.
- ❖ Operaciones defectuosas de los relés de protección y errores humanos pueden resultar en excesivos tiempos de interrupción. El tiempo de despeje de la protección de respaldo es usualmente adecuado para dimensionar los conductores. En subestaciones pequeñas este tiempo puede ser de aproximadamente 0.1 segundos.
- ❖ El valor último de la corriente utilizada para determinar el tamaño del conductor debe tener en cuenta los posibles crecimientos de la subestación. Es más económico incrementar el tamaño del conductor en el diseño inicial que tratar de reforzar el número de conductores en un tiempo posterior.
- ❖ Los valores de las corrientes de falla suministrados en la tabla anterior se tomaron del estudio de corto circuito realizado previamente; estos valores

---

<sup>10</sup> Soldadura para conexión homogénea entre conductores. <http://www.at3w.com>

suponen que la corriente total de falla sólo sería disipada por los conductores de la malla (diseño conservativo).

### **9.13 CALCULO DE BOBINA DE CHOQUE.**

La bobina de choque del H.U.C como elemento acoplador, desacoplador, y como protección de sobretensiones es diseñada tratando de manejar el valor mínimo de impedancia ( con  $L= 40 \mu\text{H}$ ), los detalles de la bobina son los siguientes:

- Inductancia:  $40 \mu\text{H}$ .
- Corriente máxima: 150 K.A
- Factor de calidad a 60 HZ= 2
- Factor de calidad a 1 MHZ= 33.026
- Resistencia en C.C=  $0.0076\Omega$
- Capacitancia= 100 p.F
- Cables de salida: 2 # 4/0 AWG y 2 # 2 AWG.
- Peso: 7 Kg.
- Dimensiones: 125x 350 mm.
- Núcleo: aire.

### **9.14 PROCEDIMIENTO E INSTALACION DE LA MALLA DE TIERRA.**

#### **❖ Excavación y preparación de los pozos.**

El trabajo se inicia con la ubicación precisa del punto o línea del suelo a ser removido a partir de la exclusión de la presencia de toda otra canalización o estructura subterránea tanto de los servicios del Hospital como de los servicios externos que ingresan o pasan; la ejecución no obstante, será cuidadosa, dado que pueden hallarse instalaciones no consignadas en los planos.

Luego se procede a la excavación de 6 pozos de un  $1.2 \text{ m}^2$  ( 30 cm de largo x 40 cm de ancho) de área por 50 cm de profundidad, separados a una distancia de 4m

aproximadamente cada uno, desechando todo material de alta resistividad tales como piedras, hormigón, arena, etc. Igualmente se realiza el procedimiento de la adecuación del sistema de la tierra aislada con la excavación de 4 pozos de la misma magnitud.

Se aplica 1 dosis x 1m<sup>3</sup> de FAVIGEL a cada pozo, disolviendo el contenido de las 2 bolsas por separado en unos 20 litros de agua y se vierte en los pozos, hasta su total absorción, repitiéndose la aplicación hasta culminar el pozo. Se procede a enterrar las varillas aplicándole golpes concéntricos a las mismas hasta su total inmersión. Se procede a cavar las zanjas por donde se alojara el cableado, cada zanja tiene aproximadamente 50 cm de profundidad, las zanjas unen a todas las varillas paralelas.

La tierra de los descargadores de sobretension es unida con la tierra del barraje principal y con la tierra del sistema regulado, de igual manera se aplica una dosis de favigel en la tierra del descargador de sobretension y en las varillas de la tierra regulada. Los tres sistemas son unidos por medio de una **bobina de choque de 40 μH)**

#### 9.15 LISTADO DE MATERIALES DE IMPLEMENTACION.

Según las características de la puesta a tierra que se instalo, se previo la adquisición de materiales e insumos, mano de obra y servicios anexos. Solo de muestran los accesorios básicos de implementación, los demás se consideran inherentes al sistema eléctrico de instalación.

REFERENCIA	CANTIDAD
Electrodo vertical de 2.4 metros copperweld.	11
Conectores de cobre estándar de oreja.	11
Conductor de cobre desnudo # 4 AWG THHN.	85 mts
Cable de cobre desnudo #2 AWG THHN.	25 mts

Tubos galvanizados de 3 con accesorios".	15
Caja de registro de cemento.	11
Tapa de concreto para cada registro.	11
Favigel 1Kg.	1
Soldadura exotérmica.( G)	500
Bobina prefabricada.	1
Conectores ponchables # 4/0 AWGTHHN	8
Conectores ponchables # 2 AWG THHN	6

Tabla18. Materiales básicos de implementación de un sistema de tierra.

## **9.16 ACCESORIOS DE ACABADO EXTERIOR.**

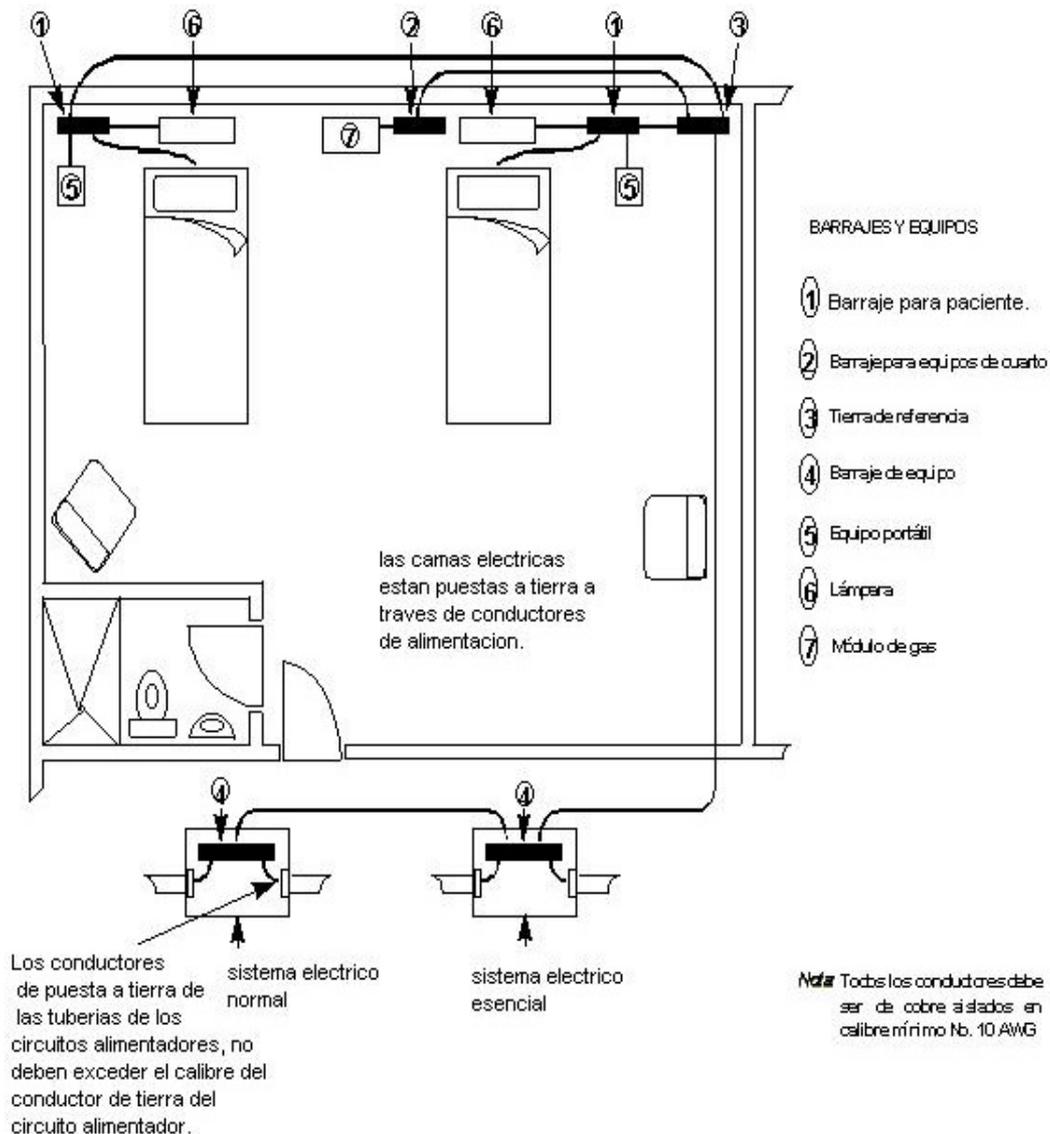
Las características de la caja de registro con tapa, obedecerán a las exigencias y condiciones que demanden el tránsito de las personas por el sitio de puesta a tierra, los niveles de carga y el paso del tiempo.

### **9.16.1 CAJA DE REGISTRO CONSTRUIDA.**

Se construyeron en el sitio como parte del trabajo de instalación en previsión del tránsito del personal. La base de la caja está conformada por concreto, un pequeño armado de hierro y cemento a ras del suelo. La dimensión de la caja de registro es de 30 cmx 40 cm.

## 9.17 ESQUEMA DE CONEXIÓN INTERNA PARA U.C.I EN HUC.

Figura58. Arreglo de camas de UCI.

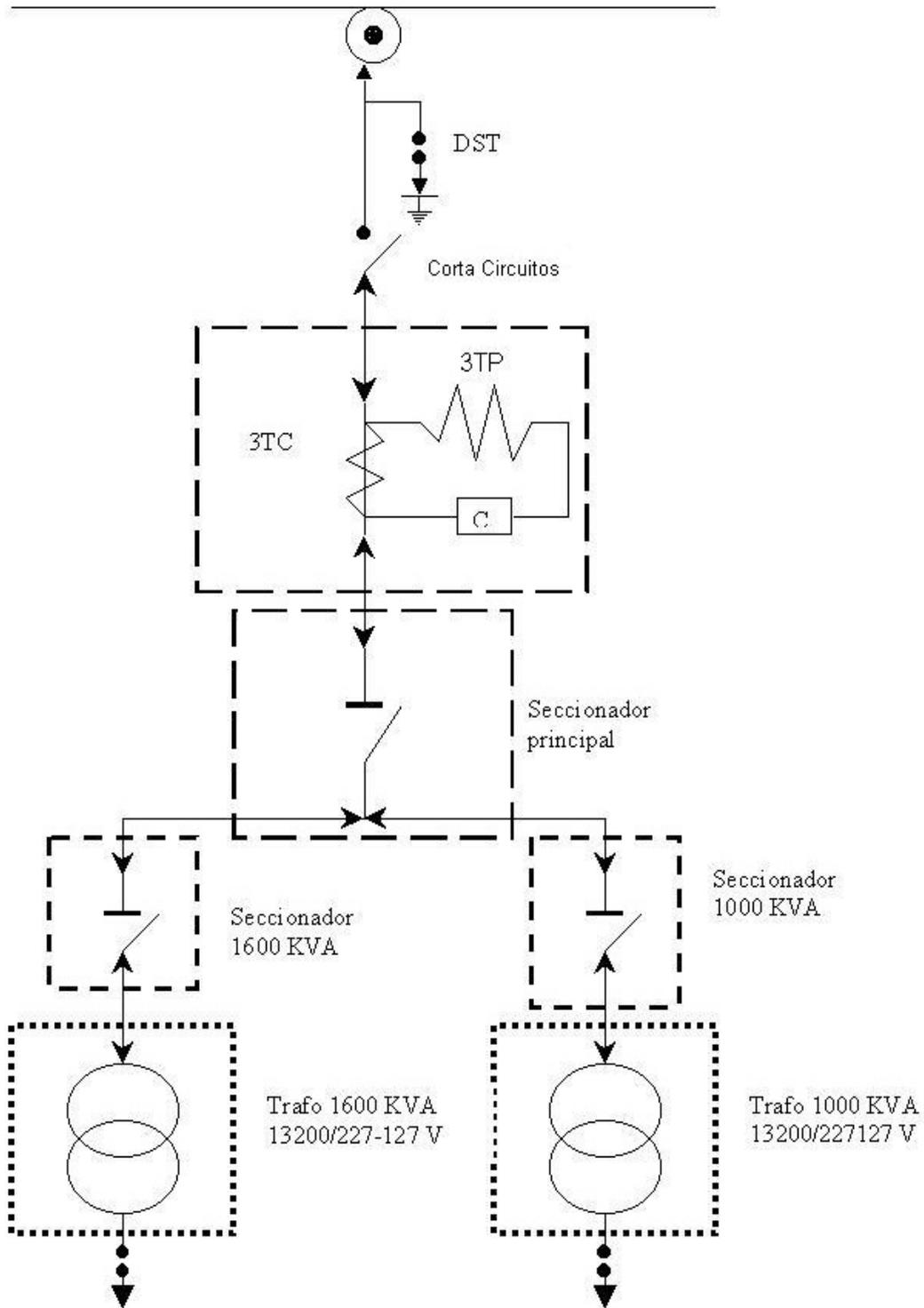


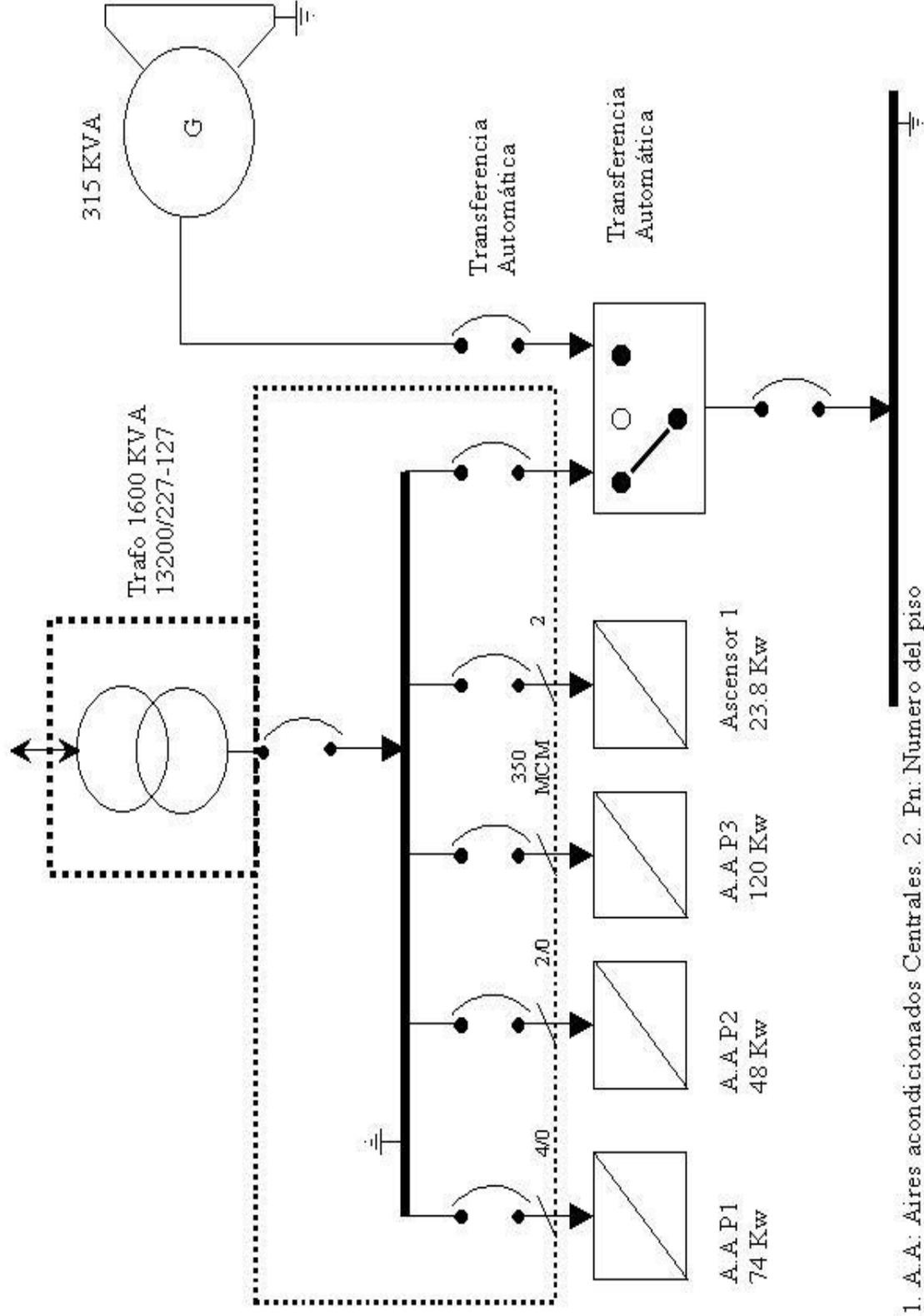
Ministerio de salud de Colombia. "Puesta a tierra en instalaciones hospitalarias".p.25.

El diseño eléctrico para zona de cuidados intermedios y cuidados intensivos se hace teniendo como referencia la norma para puesta a tierra en instalaciones hospitalarias, numeral 3.3.3 de Área de atención crítica, del ministerio de salud de Colombia.

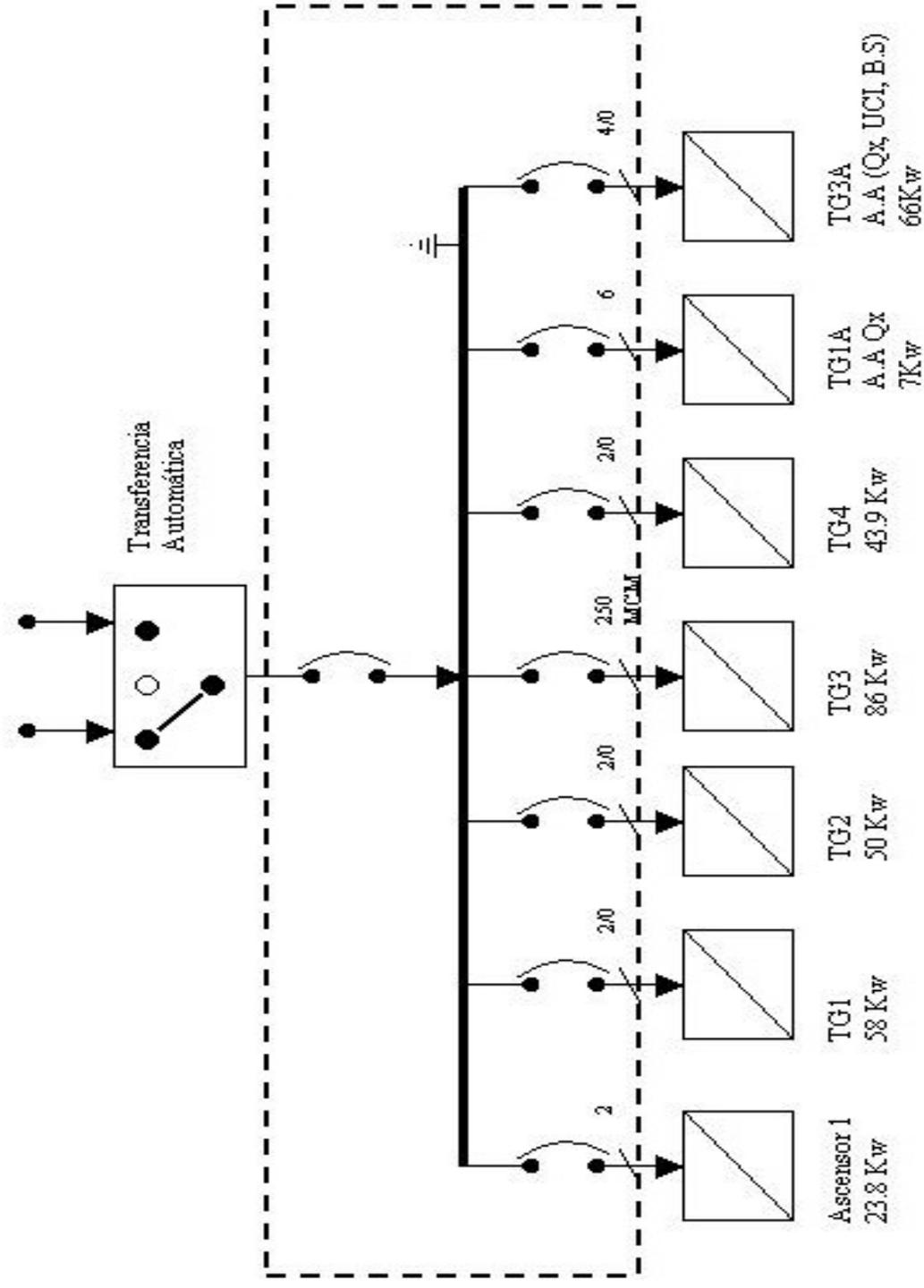
## 9.18 CONEXIONES A LA SUBESTACION Y LOS TABLEROS ELECTRICOS.

Figura60. Diagrama unifilar de sistema eléctrico de H.U.C.



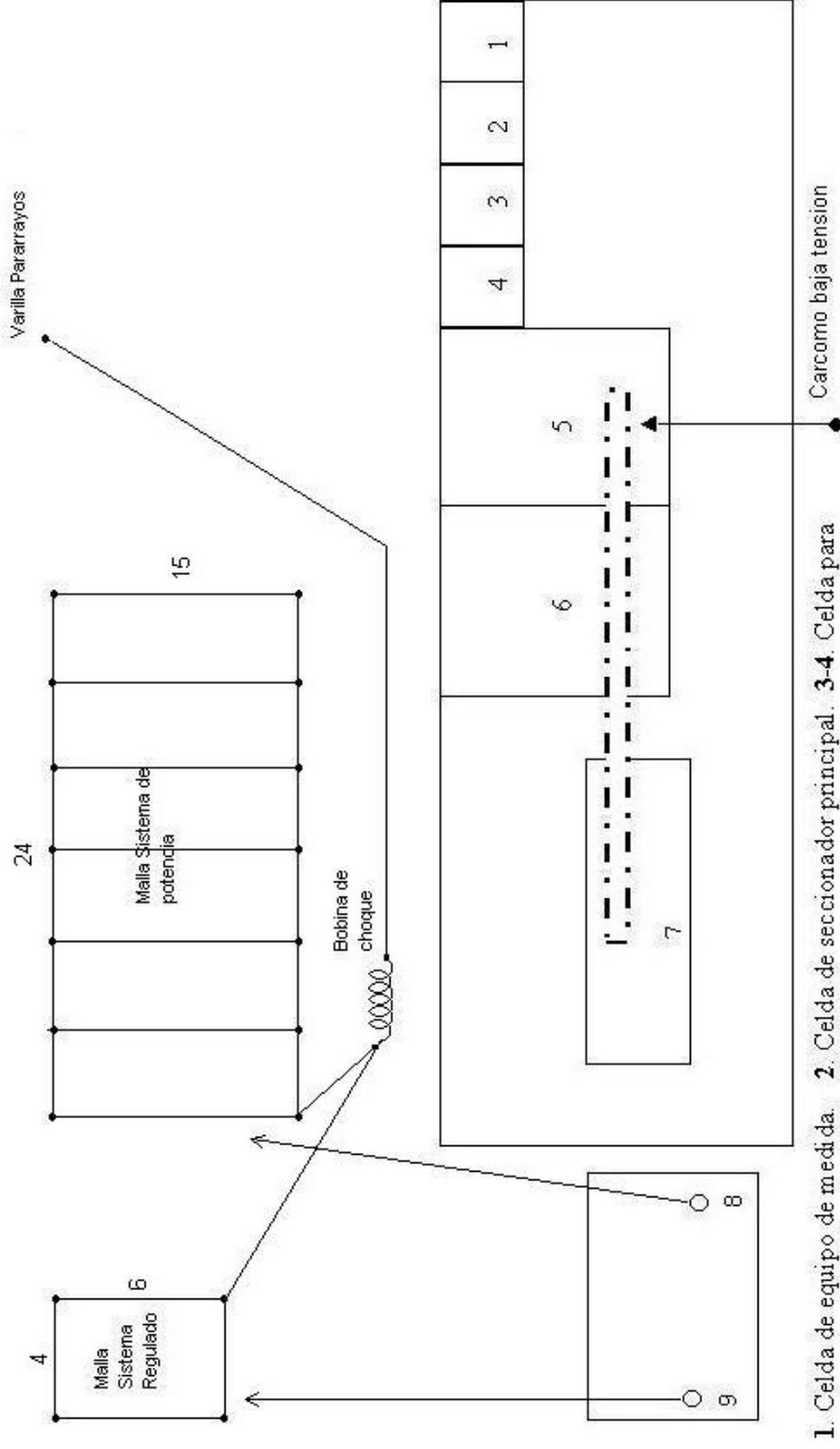


1. A.A: Aires acondicionados Centrales. 2. Pn. Numero del piso



1. TGx: Tableros generales de cada piso. 2. A.A: Aires acondicionados centrales

Figura61. Diagrama esquemático de subestación eléctrica HUC.



1. Celda de equipo de medida. 2. Celda de seccionador principal. 3-4. Celda para seccionador de trafos. de 1600 y 1000 KVA
5. Cuarto para trafo de 1600 KVA. 6. Cuarto para trafo de 1000 KVA. 7. Celda para baja tension. 8. Barra tierra de potencia. 9. Barra tierra regulada

**Nota:** Las dimensiones de los gabinetes deben ser sugeridas basadas en las normas.

**VISTA EN PLANTA DE SUBESTACION.**

Una vez finalizado el relleno se procede al pasado y tendido del conductor aislado de conexión que unirá los electrodos de puesta a tierra con la barra eléctrica de tierra del barraje principal de la subestación.

La parte subterránea en tubería galvanizada de 3" , va por una zanja angosta de 0,3 m de profundidad hasta el tablero de distribución.

❖ **Conexión a los electrodos de la malla:**

Se pela el extremo del conductor aislado una longitud de 0,1m, haciendo tres dobleces paralelos antes de colocarlos junto al extremo limpio de la primera varilla, para sujetarlos con el borne simple.

Las demás varillas son unidad entre si de la misma manera.

❖ **Conexión al borne de tierra normal y regulada del tablero eléctrico.**

Se hace con un terminal o pelando el extremo del conductor aislado que llega para formar una oreja que se colocará entre el perno y la barra fija para luego ajustar.

Una vez hechas las conexiones en ambos extremos del conductor de conexión a tierra, se mide la continuidad eléctrica  $R= 0 \text{ Ohm}$ ; y finalmente se aplica vaselina a la grapa.

Es algunos casos, en donde no se maneja tanta potencia se puede cubrir la unión con cinta aislante.

❖ **Conexión a la barra de tierra de los tableros eléctricos:**

Como en el HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL CARIBE se diseño un sistema normal y un sistema regulado, se colocaron tableros regulados independientes en las zonas de cuidados críticos, cada uno con su acometida al respectivo buitrón y

por ende del lugar a la subestación, cada tablero tenia su respectiva barra de tierra con su conexión a tomas de referencia.

Para los circuitos de tomas y luces normales se aplico de la misma manera, teniendo en cuenta la consideración establecida dado los circuitos independientes.

## 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En esta tesis se ha realizado un análisis teórico – práctico de los sistemas de puesta a tierra y se ha aplicado al diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica del Hospital Universitario del Caribe H.U.C con el objetivo de informar y capacitar a los lectores de este Tutorial sobre todos los temas referentes a los sistemas de puesta a tierra y de diseño del mismo, además de que sirva como una herramienta técnica para la empresa donde se llevo a cabo el desarrollo, por si se requiere de un nuevo diseño o de solución de problemas que se presenten por fallas.

Al momento de realizar medidas de resistencia y resistividad se tiene que tener claro el método a seguir, en este caso se clarificaron todas la medidas tomadas con el método de Wenner y se entendió a la perfección todas las medidas y cálculos realizados.

La conexión de puesta a tierra, consta de componentes interiores y periféricos, que la conectan con los tableros, cada instalación es diferente y se debe optar por seguir la normas de cada caso; las instalaciones eléctricas hospitalarias son unas de mayor cuidado, no solo porque se atenta contra la vida de los pacientes, sino porque los equipos biomédicos que son de alto costo.

El lugar de instalación de la puesta a tierra debe ser apartado del paso del personal, es conveniente que solo personas capacitadas tengan acceso al mismo. Toda puesta a tierra debe ser inspeccionada periódicamente, no solo por las características del terreno sino por seguridad continua.

Una vez instalado un sistema de puesta a tierra, es responsabilidad del diseñador capacitar a todo el personal de manejo de la misma, de todas las pruebas que se pueden hacer para determinar el nivel de operación de la misma.

Del trabajo realizado en la E.S.E HOSPITAL UNIVESITARIO DEL CARIBE, se puede afirmar que se aprendió a construir físicamente un sistema de puesta a tierra, que requiera toda la responsabilidad del caso.

Es recomendable para el diseño de puestas a tierra hospitalarias, que posean sistemas de regulación trabajar con dos mallas de tierra en conjunto, una basada en el diseño de la otra.

Se pudo contemplar un buen diseño para un sistema hospitalario, apoyados en la dirección eléctrica de la firma contratista del proyecto. Esto se vio plasmado en una parte del tutorial, como una forma para que el lector tenga más respaldo y guía técnica a la hora de enfrentar un diseño o un mantenimiento preventivo de un sistema en general.

En todas las etapas del tutorial se deja claro que se siguen las normativas colombianas de para instalaciones eléctricas, RETIE y NTC 2050. Además de seguir el método de la IEEE 80, el lector debe estar capacitado en el diseño de puestas a tierra no solo para entidades hospitalarias, sino para cualquier entidad pública, privada y de prestación de servicios.

Con la finalización de este trabajo de grado, damos pie a que este Tutorial sea utilizado como material de apoyo a todas las personas que quieran fomentar sus conocimientos en los sistemas de puesta a tierra y en el diseño del mismo, teniendo una aplicación práctica. Este facilita el estudio ya que esta presentado en un medio material y físico, además de que esta documentado con diferentes fuentes y tiene anexado un capítulo con las normativa de la puesta a tierra para instalaciones eléctricas hospitalarias del ministerio de salud de Colombia con apoyo en la NTC2050.

Se debe difundir el proyecto entre las diferentes áreas que actúan sobre el mantenimiento de las instalaciones eléctricas, por lo cual se creo un capítulo dedicado a la importancia del mantenimiento de los sistemas de puesta a tierra, para concienciar a los lectores de lo pertinente que es el mantenimiento de cualquier tipo de instalación eléctrica, para tener una vida útil mayor y una

minimización de problemas y averías. Así como el tratamiento de la resistencia de los terrenos con la implementación del producto Favigel que es un producto que se está empezando a implementar en Colombia pero que da buenos resultados y mayor eficiencia con respecto a otros productos similares, así como las ventajas como su fácil aplicación y una muy importante como es la incidencia en el medio ambiente y en los seres vivos, el cual no es perjudicial. Se mostraron todas las técnicas de mejoramiento con este producto por lo cual con lo que mostramos, el lector podrá escoger el que le presente las mayores características y ventajas con respecto a los otros, además de que garantice la mayor eficiencia en la reducción de la resistencia de puesta a tierra y el consecuente aumento de la conductividad del terreno circundante a la misma.

En general esperamos que el trabajo realizado se aproveche al máximo por las personas que harán uso de él, de igual forma como se mencionó en un principio, se desarrolló con el ánimo de conscientizarlos en el hecho de conocer la importancia de las puestas a tierra en una instalación eléctrica, por lo que se brindó lo básico e importante de los conceptos relacionados con las puestas a tierra y deseamos que se promueva la realización de nuevos trabajos basados en esta profunda temática, que es muy extensa y que desarrolla muchos campos y aspectos para que sirvan de fomento para el conocimiento de las nuevas promociones de estudiantes de ingeniería eléctrica.

## 11. BIBLIOGRAFÍA.

- Norma NTC2050 –Norma Técnica Colombiana-ICONTEC1999-Ministerio de desarrollo Ecológico de Colombia.
- RETIE – Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas-Ministerio de Minas y Energía de Colombia-2007.
- NEC – Nacional Electric Code -1999.
- Fundamentos de circuitos eléctricos – Alexander Sadiku - Editorial Mc Graw Hill.
- Curso sistemas puesta a tierra – Electrocosta- Electricaribe-2003.
- Elementos de diseño de subestaciones eléctricas – Enríquez Harper – Editorial Limusa Noriega.
- La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T – Rogelio García Márquez – Editorial Productiva.
- Subestaciones de Alta y Extra Alta tensión – Mejia Villegas: Ingenieros consultores – Editorial HMV Ingenieros.
- <http://iluminacioneinstalaciones/etooldeconstruccionOSHAGlosario.htm>
- [http://caminos.udc.es/gmni/pdf/2004\\_CMNE\\_fiables.pdf](http://caminos.udc.es/gmni/pdf/2004_CMNE_fiables.pdf)
- [http://RESISTIVIDAD TEORIA Y DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Roberto Ruelas.htm](http://RESISTIVIDAD_TEORIA_Y_DISEÑO_DE_SISTEMAS_DE_PUESTA_A_TIERRA_Roberto_Ruelas.htm).
- IEEE - Institution of Electrical Engineers - Standard 80-2000.
- Colección de Cuadernos Técnicos de Schneider Electric España S.A.
- Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas – ING Ignacio Aguilero.
- Conferencia Sistemas de tierras electrotécnicas-CEC-Alejandro Cid Borrego.
- <http://www.tecsup.edu.pe/webuds/web/principal?accion=virtual&area=7>.

## 12. ANEXOS.