

**UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**



**FACULTAD DE INGENIERÍAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TESIS DE GRADO PREVIA A LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**“EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE  
LA SUBESTACIÓN OBRAPÍA CON NIVELES DE TENSIÓN DE 69kV y 13.8  
kV PERTENECIENTE A LA E.E.R.S.S.A, PARA CUMPLIR CON LOS  
PARÁMETROS ESTABLECIDOS POR LA NORMA IEEE Std. 80-2000 (Guide  
for Safety in AC Substation Grounding)”**

**AUTOR:**

**Juan Andrés Bustamante Cuenca**

**DIRECTOR:**

**Ing. Hernán Guillén Coello**

**CUENCA – ECUADOR**

**2011**

## **DECLARATORIA**

Los conceptos vertidos, análisis realizados, resultados y conclusiones en este trabajo, son de absoluta responsabilidad del Autor.

A través de la presente declaratoria cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de la Propiedad Intelectual, por su reglamento y normativa institucional vigente.

Cuenca, Junio de 2011.

---

*Juan Andrés Bustamante Cuenca*

## **CERTIFICACIÓN**

El presente trabajo de tesis previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico fue guiado satisfactoriamente por el Ing. Hernán Guillén Coello, quien autoriza su presentación para continuar con los trámites correspondientes.

---

Ing. Hernán Guillén Coello

**DIRECTOR DE TESIS**

## **DEDICATORIA**

*En todas las batallas que nos presenta la vida, siempre es importante contar con ayuda de las personas que más nos aman; por esta razón dedico este trabajo a mis padres quienes siempre han demostrado amor, afecto y cariño.*

*A mis hermanas Emily y Magaly, por permitirme ser guía en su vida y a todos mis familiares y amigos que siempre estuvieron junto a mí en esta etapa de mi vida.*

**Juan Andrés**

## **AGRADECIMIENTO**

*Con mucha satisfacción mi agradecimiento primeramente a Dios por permitirme culminar una etapa más de mi vida.*

*A mi Madre Verónica, quien con su paciencia, cariño y ternura me ha brindado calor en los días de desvelo y ha estado siempre a mi lado como amiga.*

*A mi Padre Juan, por su infinito sacrificio para hacer de mí una persona brillante y quien ha sabido guiarme por el camino correcto.*

*A mis hermanas Emily y Magaly, a mi novia Janyna quienes con su apoyo incondicional siempre estuvieron a mi lado.*

*A mi familia y amigos, que siempre han estado en los momentos más difíciles.*

*A mi Director y al personal del departamento de subestaciones de la E.E.R.S.S.A, en especial al Ing. Cornelio Castro y al Ing. Marcos Valarezo que han compartido sus conocimientos para lograr la realización de este documento.*

**Juan Andrés**

## Tabla de contenido

<i>INDICE DE TABLAS</i> .....	<i>X</i>
<i>INDICE DE FIGURAS</i> .....	<i>XII</i>
<i>GLOSARIO</i> .....	<i>XIV</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	<i>XV</i>
<i>JUSTIFICACIÓN DEL TEMA</i> .....	<i>XVII</i>

<b>CAPITULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS</b> .....	<b>1</b>

1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.1 Objeto de la Puesta a Tierra.....	3
1.1.2 Definición de Puesta a Tierra.....	3
1.2. DEFINICIONES .....	3
1.3. NORMATIVA EXISTENTE PARA LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA .....	9
1.3.1 Norma IEEE Std. 80-2000, Guide for Safety in AC Substation Grounding .....	9
1.4. MALLAS DE TIERRA.....	13
1.4.1 Propósito de la malla de tierra .....	13
1.4.2 Conexión a tierra de los equipos eléctricos .....	14
1.4.3 Elementos que constituyen una malla de tierra .....	14

1.4.3.1	Electrodos de tierra.....	15
1.4.3.2	Conductor de tierra.....	16
1.4.3.3	Conexiones.....	17
1.4.3.4	Conductor de protección y conductor de servicio.....	18
1.4.4	Naturaleza de una puesta a tierra.....	20
1.4.5	Importancia en la medición de la resistencia de puesta a tierra.....	21
1.5.	CRITERIO DE VOLTAJE TOLERABLE.....	22
1.5.1	Tensión de Paso.....	22
1.5.2	Tensión de Contacto.....	22
1.5.3	Valores Máximos Admisibles de las Tensiones de Paso y de Contacto .....	24
1.5.4	Valores Reales de las Tensiones de Paso y de Contacto.....	25
1.5.5	Determinación de los factores <b><i>Ks, Ki, Km</i></b> y n.....	27
1.6.	RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	29
1.6.1	Definición.....	29
1.6.2	Factores que influyen en la resistividad del terreno.....	30
1.6.2.1	Naturaleza del terreno.....	30
1.6.2.2	Humedad.....	31
1.6.2.3	Temperatura.....	32
1.6.2.4	Estratigrafía.....	33
1.6.2.5	Salinidad.....	33
1.6.2.6	Variaciones estacionales.....	34
1.6.2.7	Compactación del terreno.....	34
1.6.3	Importancia en la medición de la resistividad.....	35

1.7. MÉTODOS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA RESITENCIA DE PUESTA A TIERRA.....	35
1.7.1 Incremento del área ocupada por la malla .....	36
1.7.2 Tratamiento del Terreno .....	38
1.7.2.1 Tratamiento con sales .....	39
1.7.2.2 Tratamiento con geles.....	40
1.7.2.3 Procedimiento Ledoux para la mejora de tomas de tierra .....	41
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>43</b>
<b>EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA .....</b>	<b>43</b>
2.1. INTRODUCCIÓN.....	43
2.2. CONDICIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	44
2.2.1 Antecedentes.....	44
2.2.2 Levantamiento del Sistema de Puesta a Tierra .....	45
2.2.3 Análisis del sistema de puesta a tierra actual.....	45
2.3. MEDICION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA Y RESISTIVIDAD DEL TERRENO .....	47
2.3.1 Equipo de Medición.....	48
2.3.2 Métodos de Medición de la Resistividad del Terreno .....	49
2.3.2.1 Método de Wenner .....	49
2.3.2.2 Método de Schlumberger .....	51
2.3.3 Métodos de Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra.....	52
2.3.3.1 Método de Caída de Potencial .....	52
2.3.3.2 Método de Intersección de Curvas .....	53

2.3.3.3	Método de la Pendiente .....	58
2.3.4	Recomendaciones generales para efectuar las Mediciones .....	59
2.4.	MEDIDAS DE CAMPO EN LA SUBESTACIÓN OBRAPÍA .....	62
2.4.1	Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra.....	62
2.4.1.1	Método de Intersección de Curvas .....	63
2.4.1.2	Método de la Pendiente .....	64
2.4.2	Cálculo de la Resistividad del Terreno .....	68
2.5.	CÁLCULO DE LAS TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO .....	70
2.5.1	Tipos de falla a tierra .....	70
2.5.2	Cálculo del Factor de Decremento, <b>Df</b> .....	72
2.5.3	Cálculo del Factor de División de la Corriente de Falla <b>Sf</b> .....	73
2.5.4	Cálculo de la Corriente Máxima de Malla, <b>IG</b> .....	76
2.5.5	Cálculo de las Tensiones Admisibles de Paso y de Contacto .....	76
2.5.6	Cálculo de las Tensiones Reales de Paso y de Contacto.....	78
2.6.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	81
 <b>CAPITULO III.....</b>		<b>84</b>
<b>ALTERNATIVA DE DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA EN BASE A LA NORMA IEEE STD. 80-2000.....</b>		<b>84</b>
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	84
2.2.	CONSIDERACIONES PRINCIPALES DE DISEÑO.....	85
2.3.	DISEÑO DE LA MALLA DE TIERRA .....	86
2.4.	DISEÑO ALTERNATIVO DE LA MALLA DE PUESTA TIERRA EN LA SUBESTACIÓN OBRAPÍA .....	91
2.4.1.	Malla de tierra rectangular sin varillas .....	92

2.4.2. Malla de tierra rectangular con varillas en el perímetro .....	99
2.4.3. Malla de tierra rectangular con varillas en el perímetro y dentro de la malla .....	106
2.5. COMPARACIÓN DE LOS DISEÑOS .....	111
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>113</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>113</b>
4.1. CONCLUSIONES.....	113
4.2. RECOMENDACIONES .....	115
<b><i>BIBLIOGRAFÍA</i>.....</b>	<b>117</b>
<b><i>ANEXOS</i>.....</b>	<b>121</b>

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. 1. Valores de resistencia de puesta a tierra en subestaciones.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 1. 2. Dimensiones de los electrodos de tierra o varillas copperweld .....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 1. 3. Calibre recomendados de conductores de cobre para mallas de tierra. ....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 1. 4. Secciones nominales para conductores de protección.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 1. 5. Sección nominal para conductores de puesta a tierra de servicio .....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 1. 6. Resistividad según la naturaleza del terreno .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 1. 7. Efecto de la humedad en la resistividad del terreno .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 1. 8. Efecto de la temperatura en la resistividad del terreno .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 1. 9. Efecto de la sal en la resistividad del terreno .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 1. 10. Dosificación de los compuestos para el procedimiento Ledoux.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 2. 1. Valor de la resistencia de puesta a tierra con el Método de Intersección de Curvas .....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 2. 2. Distancia XY (electrodo en prueba-electrodo de corriente) a partir de la distancia XZ (electrodo en prueba- electrodo de potencial).....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 2.3. Valores de la resistencia de puesta a tierra por prueba con el Método de la Pendiente.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 2. 4. Valor de resistencia de puesta a tierra con el Método de la Pendiente .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 2. 5. Valor de Resistividad del Terreno .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 2. 6. Factores de Decremento .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 2. 7. Datos de las líneas de transmisión.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 2. 8. Impedancias equivalentes hilo de guarda-torres .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 2. 9. Resistividad de diferentes tipos de Terreno.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 2. 10. Valores de las Tensiones Admisibles de Paso y de Contacto .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 2. 11. Valores de los Factores <math>K_s</math>, <math>K_i</math>, <math>K_m</math> y <math>n</math>.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 2. 12. Valores de las Tensiones Reales de Paso y de Contacto .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 2. 13. Tabla de verificación de la malla de puesta a tierra de la Subestación Obrapía .....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 3. 1. Constantes de Materiales.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 3. 2. Valores de los Factores <math>K_s</math>, <math>K_i</math>, <math>K_m</math> y <math>n</math> de la malla sin varillas de tierra .</i>	<i>98</i>

<i>Tabla 3. 3. Valores de las Tensiones Reales de Paso y de Contacto de la malla sin varillas de tierra.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 3. 4. Valores de los Factores <b>Ks, Ki, Km</b> y n de la malla con varillas en el perímetro .....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 3. 5. Valores de las Tensiones Reales de Paso y de Contacto de la malla con varillas en el perímetro .....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 3. 6. Valores de los Factores <b>Ks, Ki, Km</b> y n de la malla con varillas en el perímetro y dentro de la malla.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 3. 7. Valores de las Tensiones Reales de Paso y de Contacto de la malla con varillas en el perímetro y dentro de la malla .....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 3. 8. Tabla de comparación de resultados de la malla de puesta a tierra de la Subestación Obrapia, con los distintos diseños alternativos.....</i>	<i>112</i>

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Relaciones entre valores reales de la corriente de falla y valores de <math>IF</math>, <math>IfyDf</math> para la duración de la falla <math>tf</math>.</i>	6
<i>Figura 2. Elementos que constituyen una malla de tierra.</i>	15
<i>Figura 3. Conexión atornillada</i>	18
<i>Figura 4. Conexión exotérmica.</i>	18
<i>Figura 5. Componentes de la resistencia de tierra en un electrodo de tierra</i>	20
<i>Figura 6. Tensión de Paso.</i>	23
<i>Figura 7. Tensión de Toque o de Contacto.</i>	23
<i>Figura 8. Resistividad de un cubo de terreno de 1m de arista</i>	30
<i>Figura 9. Terreno formado por capas.</i>	33
<i>Figura 10. Incremento del área ocupada por la malla.</i>	36
<i>Figura 11. Reducción de la superficie de la retícula.</i>	37
<i>Figura 12. Tratamiento de un terreno con sal.</i>	39
<i>Figura 13. Compuestos QUIBACSOL Y GEM para el tratamiento del terreno.</i>	40
<i>Figura 14. Compuesto SETACSOL para el tratamiento del terreno.</i>	41
<i>Figura 15. Subestación Obrapía.</i>	43
<i>Figura 16. Estructura metálica no aterrizada</i>	46
<i>Figura 17. Conductor de tierra existente en la malla.</i>	46
<i>Figura 18. Conexión del conductor de protección en mal estado</i>	47
<i>Figura 19. Comprobador de Tierra Modelo AEMC 4500</i>	48
<i>Figura 20. Método de Medición Wenner</i>	50
<i>Figura 21. Variación de posición en los electrodos.</i>	50
<i>Figura 22. Método de Schlumberger.</i>	52
<i>Figura 23. Método de la caída de potencial para medir la resistencia de un sistema de puesta a tierra</i>	53
<i>Figura 24. Disposición de los electrodos para el método de intersección de curvas</i>	54
<i>Figura 25. Curva de los valores de R obtenidos en función de la distancia XY.</i>	55
<i>Figura 26. Distancia entre el punto X y el punto de electrodo equivalente G.</i>	55
<i>Figura 27. Curva de los valores de R en función de <math>\lambda</math>.</i>	56

<i>Figura 28. Curva de los valores de R en función de <math>\lambda</math>.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 29. Método de la pendiente.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 30. Electrodo de corriente y potencial a 90° entre sí.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 31. Trenzado de cables de los electrodos de prueba.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 32. Resultado gráfico del Método de Intersección de Curvas.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 33. Resultado por prueba de la resistencia de puesta a tierra de la malla con el Método de la Pendiente.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 34. Distancia mínima alejada de la subestación existente para realizar las mediciones de resistividad del terreno.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 35. Simulación de la corriente de falla con máxima generación en el programa SPARD POWER 1.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 36. Malla rectangular sin varillas de tierra.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 37. Malla rectangular con varillas de tierra.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 38. Malla rectangular con varillas de tierra en el perímetro y dentro de la malla de tierra.....</i>	<i>106</i>

## GLOSARIO

Símbolo	Descripción
$\rho$	Resistividad del terreno, [ $\Omega \cdot m$ ]
$\rho_s$	Resistividad de la capa superficial, [ $\Omega \cdot m$ ]
$I_f$	Corriente de falla simétrica en una subestación, [A]
$A$	Área total rodeada por la malla de tierra, [ $m^2$ ]
$C_s$	Factor de decremento de la capa superficial
$d$	Diámetro del conductor de la malla, [m]
$D$	Espaciamiento entre conductores paralelos, [m]
$D_f$	Factor de decremento para determinar $I_G$
$E_m$	Tensión de contacto real, [V]
$E_s$	Tensión de paso real, [V]
$E_{paso50kg}$	Tensión de paso admisible por un ser humano con peso de 50 kg, [V]
$E_{paso70kg}$	Tensión de paso admisible por un ser humano con peso de 70 kg, [V]
$E_{contacto50kg}$	Tensión de contacto admisible en un ser humano con peso de 50 kg, [V]
$E_{contacto70kg}$	Tensión de contacto admisible por un ser humano con peso de 70 kg, [V]
$h$	Profundidad de los conductores de la malla
$h_s$	Espesor de la capa superficial, [m]
$I_G$	Corriente máxima de malla que fluye entre la malla de tierra y sus alrededores, [A]
$I_g$	Corriente Simétrica de malla, [A]
$k$	Factor de reflexión entre diferentes resistividades
$K_h$	Factor de corrección que enfatiza el efecto de la profundidad de la malla
$K_i$	Factor de corrección por geometría de la malla
$K_{ii}$	Factor de corrección por efecto de las varillas de tierra
$K_m$	Factor de espaciamiento para la tensión de contacto
$K_s$	Factor de espaciamiento para la tensión de paso
$L_C$	Longitud total del conductor de la malla, [m]
$L_M$	Longitud efectiva de $L_C + L_R$ para la tensión de contacto, [m]
$L_R$	Longitud total de las varillas de tierra, [m]
$L_r$	Longitud de cada varilla de tierra, [m]
$L_s$	Longitud efectiva de $L_C + L_R$ para la tensión de paso, [m]
$L_T$	Longitud total efectiva de los conductores del sistema de tierra, incluida la malla y las varillas de tierra, [m]
$L_x$	Máxima longitud del conductor de la malla en la dirección x, [m]
$L_y$	Máxima longitud del conductor de la malla en la dirección y, [m]
$n$	Factor geométrico compuesto por $n_a$ , $n_b$ , $n_c$ y $n_d$
$n_R$	Número de varillas de tierra localizadas en el área
$R_g$	Resistencia de puesta a tierra, [ $\Omega$ ]
$S_f$	Factor de división de la corriente de falla (split factor)
$t_f$	Duración de la corriente de falla, [s]

## INTRODUCCIÓN

En el presente Trabajo de Grado se da a conocer varios aspectos técnicos que deben ser considerados en un sistema de puesta a tierra aplicado a Subestaciones; relacionados específicamente con los procedimientos de pruebas que se debe seguir para la verificación de un adecuado funcionamiento del sistema de puesta a tierra.

Los métodos que se describirán para la evaluación y diagnóstico de la malla de tierra, son utilizados con la finalidad de obtener valores que sean parámetros suficientes como para conocer la efectividad de la malla de tierra, desde el punto de vista de referencia y protección de los equipos instalados en la subestación.

Además, el desarrollo de este Trabajo de Grado cubre una alternativa de diseño de la malla de tierra en base a la descripción y aplicación de los conceptos y recomendaciones definidos por la norma IEEE Std. 80-2000.

Una de las principales preocupaciones con que se encuentra el diseñador, es comprobar en campo que el diseño presentado para su construcción cumpla realmente con las condiciones mínimas de protección y seguridad exigidas por las normas. Al mismo tiempo, existen sitios que son corrosivos que con el pasar de los años produce una disminución de la efectividad de la malla de tierra. Por estas razones, es que existe el interés en revisar los componentes que conforman la malla de tierra de la subestación.

Adherirse a la norma minimiza los riesgos de seguridad y proporciona criterios para un diseño seguro, ya que estos reglamentos se han desarrollado a través de los años por las experiencias reales obtenidas por parte de las industrias, con lo que es fundamental familiarizarse con dicha norma para el correcto desenvolvimiento del presente Trabajo de Grado.

El Trabajo de Grado está dividido en cuatro capítulos, los cuales en forma documental son presentados de la siguiente manera: los conceptos y criterios del sistema de puesta a tierra en las subestaciones se describen en el capítulo 1, los procedimientos y técnicas de evaluación de la malla de tierra se cubren en el capítulo 2, los aspectos prácticos del diseño del sistema de tierra se describen en el capítulo 3 y las respectivas conclusiones y recomendaciones en el capítulo 4. El material de apoyo está organizado desde el Anexo A hasta el Anexo G.

## **JUSTIFICACIÓN DEL TEMA**

Los sistemas eléctricos conectados a tierra generalmente presentan algunas debilidades, entre las cuales se puede contar con la sensibilidad a los cambios bruscos en las condiciones de operación, es decir, las perturbaciones en la alimentación eléctrica o los fenómenos eléctricos transitorios.

Para evitar y atenuar la peligrosidad de estas perturbaciones en la vida y funcionamiento de los equipos eléctricos, se provee la estabilidad, continuidad de funcionamiento y la protección de los equipos con dispositivos que eviten el ingreso de estos transitorios a los sistemas en fracciones de segundo y sean dispersados por una ruta previamente asignada como es el SISTEMA DE PUESTA A TIERRA; siendo el primer dispositivo protector no solo de equipos eléctricos sensibles, sino también de la vida humana evitando desgracias o pérdidas que lamentar.

Se tiene como expectativa que un sistema o puesta a tierra en general, posea suficiente capacidad de dispersión de determinados valores de corriente hacia el suelo, sin permitir que los potenciales en la superficie de éste, tengan niveles peligrosos para la seguridad de las personas por causa de una falla y aseguren la operación de protección a las instalaciones contra descargas atmosféricas.

Los sistemas de puesta a tierra se corroen con el pasar de los años debido al gran contenido de humedad y sales del suelo, así como sus altas temperaturas, produciendo una disminución de la efectividad de la malla de tierra.

Es por esto que, la NETA (International Electrical Testing Association) recomienda que para mantener un sistema en correctas condiciones se deben realizar comprobaciones de los electrodos de conexión a tierra cada tres años.

En vista que, en la Subestación Obrapía no se ha realizado ninguna prueba de campo en lo que se refiere a medir la resistencia de puesta a tierra, la evaluación y diagnóstico del mismo es de gran importancia para obtener información y datos del estado actual de la malla de tierra, verificando realmente si cumple con las condiciones mínimas de protección y seguridad exigidas por las norma IEEE Std. 80-2000.

Estas son, entre otras, las razones de la necesidad de evaluar, diagnosticar y el diseñar un buen sistema de puesta a tierra, así como el de su mantenimiento.

## CAPITULO I

### SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

#### 1.1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de puesta a tierra, llamado a veces sencillamente “puesta a tierra”, es el conjunto de medidas que se han de tomar para conectar una pieza eléctricamente conductora a tierra. El sistema de puesta a tierra es una parte esencial de las redes de energía, tanto en niveles de alta como de baja tensión. (MARKIEWICZ Henryk y KLAJN Antoni, 2003)<sup>1</sup>

Es bien sabido que la mayoría de los sistemas eléctricos necesitan ser aterrizados y que ésta práctica ha venido desarrollándose progresivamente con el pasar de los años, por tanto, la necesidad de aterrizar dichos sistemas constituye un aspecto importante para su funcionamiento. Su importancia radica en que tiene como objeto principal de limitar la tensión que, con respecto a tierra puedan presentar las masas metálicas, es decir, que cualquier sitio del sistema eléctrico normalmente accesible a personas que puedan transitar o permanecer allí, no deben estar sometidas a potenciales inseguros y peligrosos en condiciones normales de funcionamiento o cuando se presente alguna falla en el sistema.

No obstante, el valor de estos potenciales no son constantes en todos los terrenos, viéndose influenciada por corrientes telúricas u otras anomalías del substrato. Tampoco la resistividad del terreno es igual y uniforme para los distintos terrenos, dependiendo de los materiales que lo conforman.

---

<sup>1</sup>MARKIEWICZ Henryk y KLAJN Antoni, *Puesta a Tierra y EMC, Sistemas de Puesta a Tierra Fundamentos de Cálculo y Diseño*, [www.leonardo-energy.org](http://www.leonardo-energy.org)

Ni bien para un mismo tipo de terreno, los valores de la resistividad se mantendrían constantes a lo largo del año, variando desde valores mínimos en épocas lluviosas y húmedas, a valores máximos durante los periodos secos.

Un sistema de puesta a tierra en general, está diseñado bajo el criterio de la mínima resistencia de aterrizamiento, no obstante, esto no garantiza necesariamente seguridad, ya que no existe una relación simple entre la resistencia de conexión a tierra y la máxima corriente de falla a la cual una persona puede estar expuesta, por lo tanto, se debe evaluar el comportamiento de un sistema de puesta a tierra en su conjunto.

Los sistemas de puesta a tierra en las subestaciones eléctricas se instalan con la finalidad de garantizar las condiciones de seguridad de los seres vivos y permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas, minimizando así daños en el sistema. Las principales funciones de un sistema de tierra son básicamente las siguientes:

**a. Seguridad**

- Mantener las tensiones de contacto y de paso dentro de límites razonables bajo condiciones de falla.
- Para asegurar que los seres vivos presentes en los alrededores de las subestaciones no queden expuestos a potenciales inseguros.
- Que el criterio de diseño sea mantenido sobre la vida del proyecto de la instalación a pesar de adiciones y modificaciones.

**b. Protección del Equipo**

- Proporcionar una trayectoria de baja impedancia, para facilitar la operación satisfactoria de los equipos de protección en condiciones de falla.

Es así, que mediante el desarrollo del presente Trabajo de Grado, se tendrá la oportunidad de exponer más claramente los conceptos que intervienen en lo que se refiere a puestas a tierra en las subestaciones y una necesidad de que estos conocimientos sean traspasados a los diseñadores e instaladores de tal modo que pueda lograrse una mayor comprensión del tema en estudio.

### **1.1.1 Objeto de la Puesta a Tierra**

“Las puestas a tierra se establecen con el objetivo principal de limitar la tensión que, con respecto a tierra, pueden presentar en un momento dado las partes metálicas de los equipos, eliminar o disminuir el riesgo presente en caso de una avería en el material utilizado y asegurar la actuación correcta de las protecciones”.<sup>2</sup>

### **1.1.2 Definición de Puesta a Tierra**

La definición que realiza la norma IEEEStd. 80-2000 sobre puesta a tierra es: “Tierra o sistema de tierra es una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra”.

## **1.2. DEFINICIONES**

Es conveniente definir algunos términos que tienen relación con el tema de puesta a tierra. Las definiciones que a continuación se mencionan están establecidas de acuerdo a las especificaciones IEEE Std. 80-2000 “Guide for Safety in AC Substation Grounding”, las cuales utilizaremos durante el desarrollo del presente Trabajo de Grado:

---

<sup>2</sup>TOLEDANO G., José, MARTINEZ REQUENA, Juan, *Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas*, Cuarta Edición, Editorial Thomson Paraninfo, Madrid, 2004, p. 1.

**Aterrizado o puesta a tierra:** es un sistema, circuito o equipo provisto de una tierra con el propósito de establecer un circuito de retorno a tierra y mantener su potencial casi igual al potencial del terreno.

**Aterrizaje:** es una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipos se conecta a tierra.

**Aumento del potencial de tierra (GPR):** es el máximo potencial eléctrico que una subestación de malla aterrizada puede alcanzar, relativo a una distancia de un punto aterrizado que se asume como el potencial de tierra remoto.

**Circuito de retorno a tierra:** es un circuito en el cual la tierra o un cuerpo conductor equivalente, se utiliza para completar el circuito y permitir la circulación de corriente desde o hacia la fuente de corriente.

**Compensación de c.d. (d.c. offset):** es la diferencia entre la onda simétrica de corriente y la onda real de corriente durante una condición transitoria del sistema de potencia. Matemáticamente, la corriente de falla real puede ser dividida en dos partes, una componente simétrica alterna y una componente unidireccional (c.d.).

**Conductor de protección:** es el conductor usado para conectar las partes conductivas de los equipos, canalizaciones y otras cubiertas, entre sí y con el o los electrodos de puesta a tierra.

**Conductor de puesta a tierra:** es el conductor usado para interconectar el reticulado de la malla de puesta a tierra.

**Conductor de servicio:** el conductor de servicio se usa para conectar un equipo o el circuito puesto a tierra de un sistema de cableado a uno o varios electrodos de puesta a tierra.

**Contacto directo:** es el contacto accidental de personas con un conductor activo o con una pieza conductora que habitualmente está en tensión.

**Contacto indirecto:** es el contacto de una persona con masas metálicas, accidentalmente puestas bajo tensión siendo esto el resultado de un defecto de aislamiento.

**Contacto a tierra:** conexión accidental de un conductor con la masa terrestre (tierra), directamente a través de un elemento extraño.

**Corriente a tierra:** es una corriente fluyendo dentro o fuera del terreno o su equivalente trabajando como aterrizaje.

**Corriente de falla asimétrica:** es el valor eficaz (rms) de la onda de corriente asimétrica, integrada, integrada en el intervalo de tiempo de falla (ver Figura 1).

$$I_F = D_f \times I_f [1]$$

Dónde:

$I_F$  = Es la corriente de falla asimétrica [A].

$I_f$  = Es el valor rms de la corriente simétrica de falla a tierra [A].

$D_f$  = Es el factor de decremento.

**Corriente máxima de malla:** es un valor de diseño, se define como sigue:

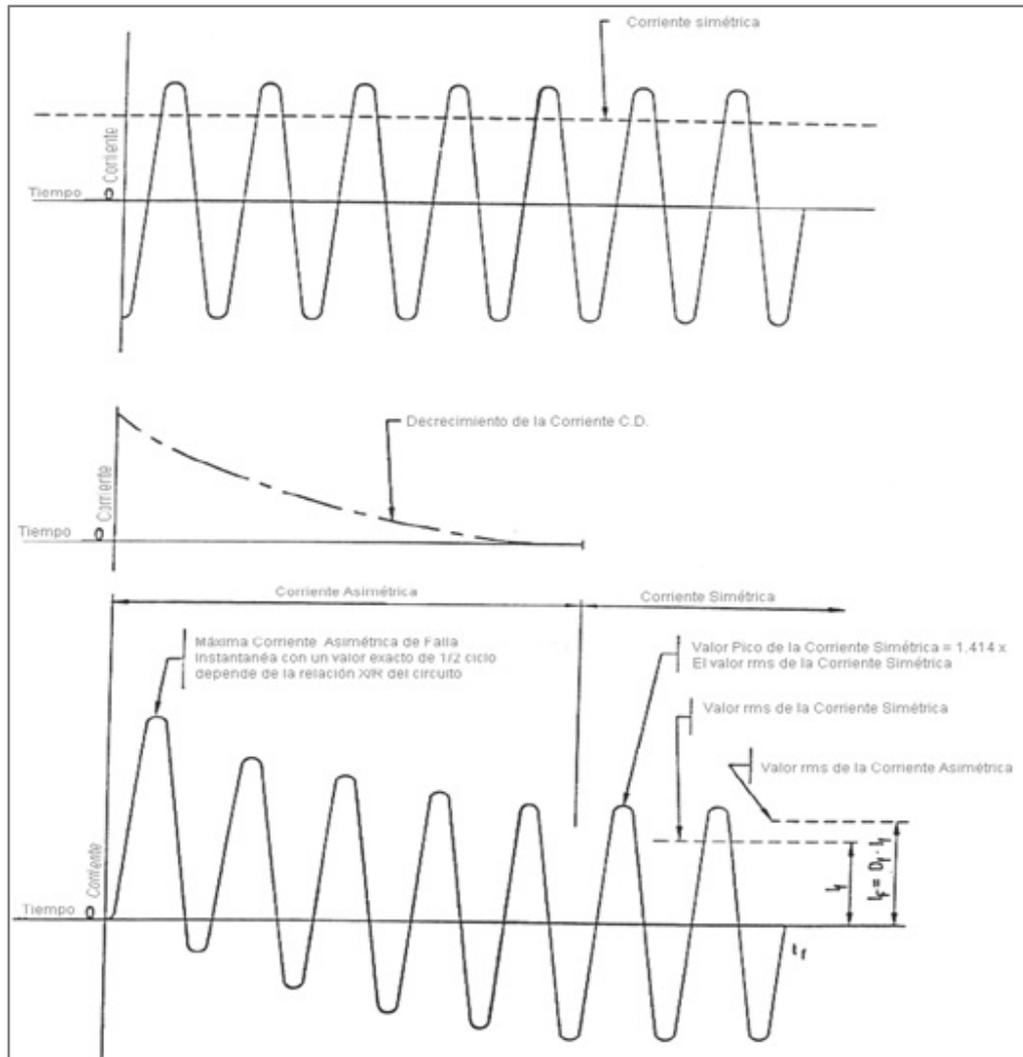
$$I_G = D_f \cdot I_g [2]$$

Dónde:

$I_G$  = Es la corriente de falla máxima en la malla de tierra [A].

$D_f$  = Es el factor de decremento.

$I_g$  = Es el valor rms de la corriente simétrica de la malla de tierra [A].



**Figura 1. Relaciones entre valores reales de la corriente de falla y valores de  $I_F$ ,  $I_f$  y  $D_f$  para la duración de la falla  $t_f$ . (Fuente: Norma IEEE Std. 80-2000).**

**Electrodo de puesta a tierra:** es un conductor introducido en la tierra y se usa para recoger o disipar corriente, desde o hacia el interior del terreno.

**Electrodo auxiliar de tierra:** es un electrodo de tierra con limitaciones de operación. Su función principal es distinta a la de conducir la corriente de falla a tierra hacia el terreno.

**Factor de decremento ( $D_f$ ):** es un factor de ajuste que se usa conjuntamente con los parámetros de la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos de puesta a tierra.

Determina el equivalente rms de la onda asimétrica de corriente para una duración de falla dada,  $t_f$ , tomando en cuenta para el efecto la compensación c.d. inicial y su atenuación durante la falla.

**Factor de división de la corriente de falla ( $S_f$ ):** es un factor que representa la parte de la corriente de falla que fluye entre la malla de tierra y sus alrededores.

$$S_f = \frac{I_g}{3I_o} = \frac{I_g}{I_f} [3]$$

Dónde:

$S_f$  = Es el factor de división de la corriente de falla.

$I_g$  = Es el valor rms de la corriente simétrica de la malla de tierra [A].

$I_o$  = Es la corriente de falla de secuencia cero [A].

**Aumento del potencial de tierra (GPR):** es el máximo potencial eléctrico que una subestación con malla de puesta a tierra puede alcanzar respecto a un punto.

NOTA.- Bajo condiciones normales, el equipo eléctrico puesto a tierra opera con potencial de tierra cercano a cero. Esto es, el potencial de un conductor neutro aterrizado es casi idéntico al potencial de tierra de referencia. Durante una falla a tierra, la parte de la corriente de falla que circula por la malla de tierra en la subestación causa el incremento de potencial con respecto a la tierra de referencia.

**Malla de tierra:** es un sistema horizontal de electrodos en la tierra que consiste de un número de interconexiones, conductores desnudos ocultos en la tierra, proporcionando una tierra común para los equipos eléctricos o estructuras metálicas, comúnmente en una instalación específica.

NOTA.- Las mallas enterradas horizontalmente cercanas a la superficie de las tierras son también efectivas en controlar los gradientes de potencial en la superficie. Una malla típica comúnmente se complementa con un número de varillas a tierra y pueden, además, conectarse a los electrodos de tierra auxiliares para reducir su resistencia con respecto a la tierra remota.

**Masa o carcasa:** es la caja metálica exterior que contiene a un aparato eléctrico, presentando un punto, denominado terminal o borne en el cual se realiza la conexión a tierra.

**Material superficial:** es un material instalado sobre el suelo que consta de roca, grava, asfalto o materiales hechos por el hombre, etc. Los materiales superficiales, dependen de la resistividad del material, los cuales pueden impactar significativamente la corriente del cuerpo por las tensiones de contacto y de paso, involucrando los pies de la persona.

**Resistencia de dispersión:** es la resistencia que opone la puesta a tierra al paso de la corriente eléctrica. Conviene que sea mínima para brindar protección.

**Sistema de aterrizaje:** comprende todas las interconexiones aterrizadas instaladas en un área específica.

**Tensión de Paso:** es la diferencia de potencial en la superficie terrestre que experimenta una persona a una distancia de un metro con el pie sin tener contacto con cualquier objeto aterrizado.

**Tensión de Contacto:** es la diferencia de potencial entre el aumento del potencial de la tierra y el potencial de la superficie en un punto donde una persona se encuentra de pie y al mismo tiempo tenga una mano en contacto con una estructura aterrizada.

**Tensión de Transferencia:** es un caso especial de tensión de contacto, donde se transfiere un voltaje dentro o fuera de la subestación desde o hacia un punto externo remoto al sitio de la subestación.

**Tierra:** Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra.

### **1.3. NORMATIVA EXISTENTE PARA LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA**

Las normas proporcionan orientación e información pertinente a las prácticas de diseño seguro de puesta a tierra y establecen los límites de diseño que deben satisfacerse para seguridad de las personas y las instalaciones.

Dentro del análisis de los sistemas de puesta a tierra existen diferentes normas a nivel mundial. Para el estudio del presente Trabajo, se ha basado principalmente en la norma IEEE Std. 80-2000 “Guide for Safety in AC Substation Grounding”

#### **1.3.1 Norma IEEE Std. 80-2000, Guide for Safety in AC Substation Grounding<sup>3</sup>**

La norma IEEE generalmente es una guía detallada sobre aspectos técnicos más importantes para el aterrizaje en Subestaciones y Sistemas Eléctricos, e incluyen formulaciones necesarias para realizar los cálculos en lo referente al sistema de puesta a tierra.

El propósito de ésta norma es dar delineamientos e información pertinente para sistemas de tierra seguros en el diseño de subestaciones de A.C. Los principales propósitos específicos de la norma son:

---

<sup>3</sup>IEEE Std. 80-2000, “Guide for Safety in AC Substation Grounding”, IEEE, 2000.

- a. Establecer, como base para el diseño, los límites seguros de las diferencias de potencial que puedan existir en una subestación en condiciones de falla, entre los puntos que pueden entrar en contacto con el ser humano.
- b. Revisar las prácticas de aterrizaje de subestaciones y sistemas eléctricos con referencia especial a la seguridad y desarrollar criterios para el diseño seguro.
- c. Dar un procedimiento para el diseño de sistemas prácticos de aterrizaje basados en esos criterios.
- d. Desarrollar métodos analíticos como ayuda para el entendimiento y solución de los problemas típicos de gradientes.

La norma establece en sus diferentes cláusulas las siguientes exigencias generales pertinentes para los sistemas de tierra:

## **Clausulas**

### ***9. Principales consideraciones del diseño***

***9.3 Electrodo de tierra principal y auxiliar.*** En general, la mayoría de sistemas de aterrizaje utilizan dos grupos de electrodos de tierra. El primer grupo de electrodos de tierra es diseñado para propósitos de aterrizaje y el segundo grupo de electrodos de tierra son electrodos que incluyen varias estructuras metálicas subterráneas instaladas para otros propósitos que no sea aterrizaje.

***9.4 Aspectos básicos del diseño de la malla.*** Para cimentar las ideas y conceptos básicos, los casos siguientes pueden servir como manual para iniciar un diseño de la típica malla a tierra:

- a. El conductor correspondiente a la malla de puesta a tierra, debe rodear el perímetro para encerrar mucha área como sea práctico. Encerrando más área reduce la resistencia de la malla a tierra.

- b. Dentro de la malla, los conductores se extienden comúnmente en líneas paralelas y donde sea práctico, a lo largo de las estructuras o fila de equipos para proporcionar conexiones cortas a tierra.
- c. Una malla de puesta a tierra para una subestación puede incluir conductores de cobre desnudo # 4/0 AWG, enterrados de 0,3m a 0,5m debajo del nivel, con un espaciamiento de 3m a 15m de distancia. En las conexiones de cruce, los conductores deben estar empalmados de una forma segura. Las varillas o electrodos de tierra pueden estar en las esquinas de la malla y en los puntos de unión a lo largo del perímetro. Las varillas de tierra también se pueden instalar en equipos importantes, especialmente cerca de los pararrayos.
- d. El sistema de malla sería extendido sobre toda la subestación y con frecuencia más allá del límite de la cerca metálica.

**9.6 Conexión a la malla.** Conductores con la adecuada ampacidad y resistencia mecánica deben usarse para la conexión entre:

- a. Todos los electrodos de tierra, como las redes de conexión a tierra, tuberías metálicas de gas o agua, etc.
- b. Sobre todo las partes metálicas conductoras a tierra que podrían llegar a energizarse accidentalmente, tal como estructuras metálicas, carcasas de máquinas, tanques de transformadores, protectores, etc.
- c. Todas las fuentes de corriente de falla tales como pararrayos, banco de capacitores, transformadores y, donde sea apropiado, neutros de máquinas y circuitos de potencia.

## **14. Evaluación de la resistencia de tierra**

**14.1 Necesidades usuales.** Un buen sistema de aterrizaje provee una baja resistencia hacia la Tierra remota para minimizar el incremento de potencial a tierra. Los valores aceptables para un buen sistema de tierra recomendables en subestaciones son los indicados en la Tabla 1.1.

<b>Tabla 1. 1. Valores de resistencia de puesta a tierra en subestaciones</b>	
<b>Denominación</b>	<b>Resistencia de tierra</b>
Subestaciones de transmisión y subtransmisión	1 $\Omega$ o menos
Subestaciones de distribución pequeñas	desde 1 $\Omega$ hasta 5 $\Omega$

**Fuente: Norma IEEE Std. 80-2000, Guide for Safety in AC Substation Grounding.**

### ***17. Áreas de especial interés***

Los siguientes puntos considerados como áreas de especial interés deben ser aterrizados:

- a. Áreas de servicio.
- b. Las carcasas metálicas de los equipos eléctricos, ya sean estos: transformadores de potencia, transformadores de medida, interruptores, banco de capacitores, motores, entre otros.
- c. Estructuras de los tableros de distribución de alumbrado y fuerza.
- d. Soportes metálicos de cuchillas desconectadoras, aisladores de soporte, etc.
- e. Cerca metálica de la subestación.
- f. Bajante del hilo de guarda.
- g. Los pararrayos.
- h. Circuitos de comunicación.
- i. Los neutros de los transformadores.
- j. Tuberías metálicas.

Para el desarrollo del presente Trabajo de Grado se ha considerado varios puntos importantes a encontrarse intrínsecamente en la norma, para lo cual se prestó atención a los aspectos prácticos del diseño de un sistema de tierra encontrados en las clausulas 9 a la 13 y los procedimientos y técnicas de evaluación para la valoración de los sistemas de tierra que se describen en las clausulas 14 a la 19.

En general, las reglamentaciones, normas y recomendaciones de instituciones como IEEE, NEC, ANSI e IEC contienen las bases para implementar las mejores soluciones para minimizar daños y mantener acotados los riesgos eléctricos con el objeto de preservar vidas y bienes.

#### **1.4. MALLAS DE TIERRA**

La malla de tierra es un sistema de conductores desnudos con espacios estrechos que permiten conectar los equipos que componen un sistema eléctrico a un medio de referencia como lo es, la tierra.

##### **1.4.1 Propósito de la malla de tierra**

En general, para lograr un correcto desempeño y seguridad contra el riesgo de accidentes fatales, las mallas de tierra tienen los siguientes propósitos:

- a. Proporcionar protección a los seres vivos contra el contacto accidental con partes metálicas que estén energizadas en una instalación y asegurar la operación de las protecciones.
- b. Proteger las instalaciones, permitiendo la conducción a tierra las descargas atmosféricas.
- c. Uniformar el potencial en toda el área de la instalación, previniendo contra incidentes peligrosos que puedan surgir durante una falla eléctrica.

Es primordial considerar la malla de tierra de una subestación como un sistema completo y asociado al sistema eléctrico.

### **1.4.2 Conexión a tierra de los equipos eléctricos**

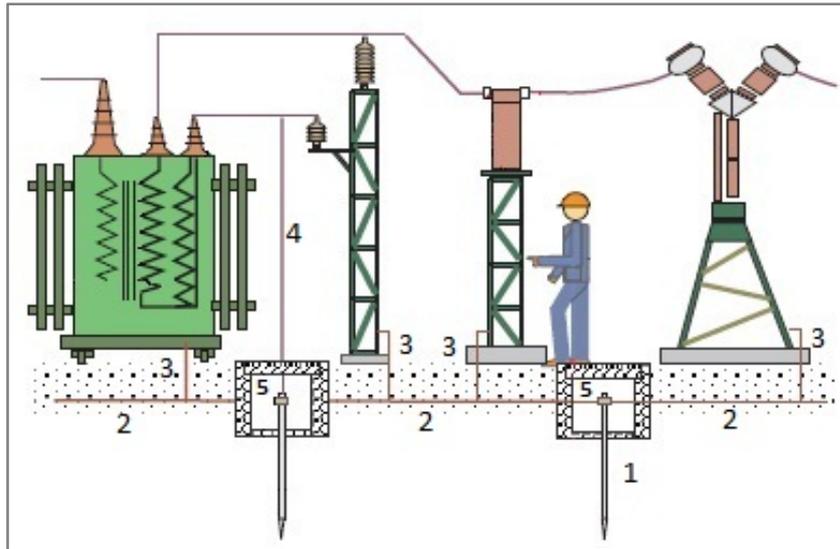
A la malla de tierra construida debajo del terreno donde se encuentra instalada una subestación, deben conectarse las siguientes partes del sistema:

1. El neutro de los transformadores de potencia
2. Los pararrayos.
3. Las carcasas metálicas de los equipos eléctricos, ya sean estos: transformadores de potencia, transformadores de medida, interruptores, banco de capacitores, motores, entre otros.
4. Estructuras de los tableros de distribución de alumbrado y fuerza.
5. Soportes metálicos de cuchillas desconectadoras, aisladores de soporte, mallas de protección, etc.
6. Estructuras metálicas en general.

### **1.4.3 Elementos que constituyen una malla de tierra**

Una malla de tierra en su conjunto puede estar formada por distintos elementos(ver Figura 2), entre los principales que la conforman son los siguientes:

1. Electrodo o varillas de tierra (varillas copperweld).
2. Conductor de tierra.
3. Conductores de protección.
4. Conductores de servicio.
5. Conexiones.



**Figura 2. Elementos que constituyen una malla de tierra. (Fuente: Publicación Técnica Schneider, Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra, 2001).**

### 1.4.3.1 Electrodo de tierra

Se los conoce también como electrodos verticales. Son el componente del sistema de puesta a tierra que está en contacto directo con el terreno y así proporciona un medio para conducir la corriente de falla a tierra.

Los electrodos de tierra están contruidos de acero revestidas de cobre, dotados de propiedades eléctricas y mecánicas apropiadas para responder satisfactoriamente a las condiciones que los afectan, manteniendo sus características originales por un periodo de tiempo relativamente largo. Se requiere utilizar varillas tipo *copperweld* de las medidas indicadas en la Tabla 1.2.

Estos electrodos deben estar convenientemente separados a una distancia no menor de dos veces su longitud, y a una distancia máxima de un metro más de la cerca protectora de la subestación.

<b>Tabla 1. 2. Dimensiones de los electrodos de tierra o varillas copperweld</b>	
<b>Diámetro [mm]</b>	<b>Largo [m]</b>
15,88 (5/8")	2,44 (8 pies)
19,05 (3/4")	3,05 (10 pies)

**Fuente: HARPER ENRIQUEZ, Gilberto, Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas, 2005**

### 1.4.3.2 Conductor de tierra

En la malla de tierra se debe usar un conductor de cobre y solo cuando sea necesario se podrá usar aluminio. En cualquier caso la sección del conductor de tierra se calcula dividiendo la corriente máxima de falla a tierra entre la densidad de corriente del material usado, es decir:

$$S = \frac{I}{\delta} [4]$$

Dónde:

$S$  = Es el calibre del conductor [ $mm^2$ ].

$I$  = Es la corriente máxima de falla a tierra [ $A$ ].

$\delta$  = Es la densidad de corriente del material usado [ $A/mm^2$ ].

En subestaciones eléctricas se aconseja más por motivos mecánicos, la utilización del conductor de cobre calibre mínimo de 4/0 AWG. La magnitud de la falla puede determinar eventualmente secciones mayores del conductor.

Para cálculos rápidos se puede emplear la Tabla 1.3., que relaciona la corriente máxima de falla a tierra con el calibre de conductor (empleando el sistema americano de designación de calibre).

<b>Tabla 1. 3. Calibre recomendados de conductores de cobre para mallas de tierra.</b>	
<b>Corriente máxima de falla a tierra en [A]</b>	<b>Calibre AWG o MCM</b>
Hasta 400	1/0
De 400 a 5000	2/0
De 5001 a 7000	3/0
De 7001 a 8500	4/0
De 8501 a 10000	250
De 10001 en adelante	500

**Fuente: HARPER ENRIQUEZ, Gilberto, Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas, 2005**

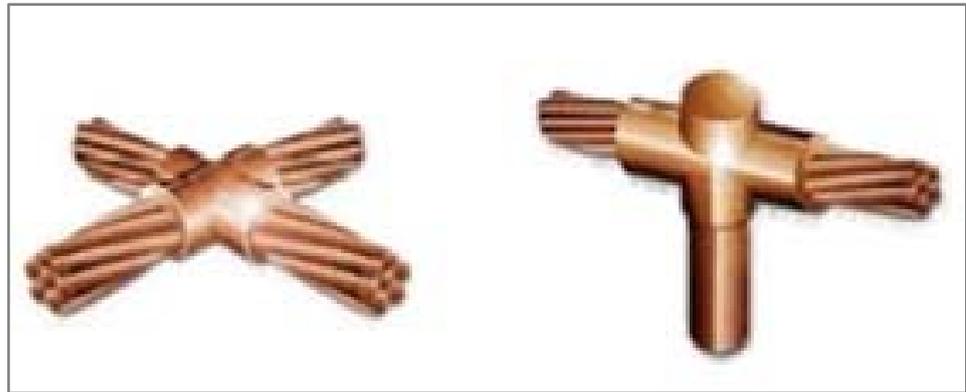
### 1.4.3.3 Conexiones

Las conexiones son el punto débil de todos los circuitos eléctricos, en especial los de puesta a tierra, sujetos al envejecimiento y corrosión. La capacidad de un circuito de puesta a tierra de proteger la seguridad de las personas dependerá de la calidad de las conexiones realizadas, se pueden exaltar las más importantes:

- a. **Conectores atornillados:** son piezas metálicas usadas en el empalme de conductores, estos deben ser desmontables y de bronce, con sistema de presión por rosca, como se ilustra en la Figura 3.
- b. **Conexión exotérmica:** es un proceso de soldadura en caliente que elimina la conexión al formar unión molecular, entre el elemento metálico de conexión y el conductor. Se construyen para una duración como mínimo igual a la de la edificación y equipos que ha de proteger. (ver Figura 4).



**Figura 3. Conexión atornillada (Fuente: ROJAS Gregor, Manual de Sistemas de Puesta a Tierra, 2007).**



**Figura 4. Conexión exotérmica (Fuente: ROJAS Gregor, Manual de Sistemas de Puesta a Tierra, 2007).**

#### **1.4.3.4 Conductor de protección y conductor de servicio**

Los *conductores de protección* aseguran que las partes conductivas expuestas, tales como los tableros eléctricos, el tanque de los transformadores o interruptores, carcasas metálicas y en general toda la estructura metálica de la subestación permanezcan aproximadamente al mismo potencial durante condiciones de falla eléctrica.

Mientras tanto que el *conductor de servicio* se usa para conectar un equipo o el circuito puesto a tierra de un sistema de cableado a uno o varios electrodos de puesta a tierra.

Es esencial, que el calibre escogido del conductor sea capaz de llevar el valor total de la corriente de falla, por la duración estimada, sin perjuicio para el conductor o para sus uniones y puede ser macizo o prensado, aislado o desnudo, de cobre u otro material resistente a la corrosión y no debe tener en toda su longitud ningún empalme o unión.

La sección para los conductores de protección y conductores de servicio común en instalaciones, no debe ser inferior al valor dado en la Tabla 1.4. y Tabla 1.5., respectivamente:

<b>Tabla 1. 4. Secciones nominales para conductores de protección</b>		
<b>Sección nominal de los conductores activos en [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Sección nominal de los conductores de protección en [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Calibre nominal de los conductores de protección AWG</b>
1,5	1,5	16
2,54	1,5	16
4	2,5	14
6	4	12
10	6	10
16	6	10
25	10	8
35	10	8
50	16	6
70	16	6
95 hasta 185	25	4
240 hasta 300	35	2
400 o más	50	1

**Fuente: ROJAS Gregor, Manual de Sistemas de Puesta a Tierra, 2007**

<b>Tabla 1. 5. Sección nominal para conductores de puesta a tierra de servicio</b>		
<b>Sección nominal del</b>	<b>Sección nominal del</b>	<b>Calibre nominal de los</b>

conductor de acometida en $[mm^2]$	conductor de servicio en $[mm^2]$	conductores de protección AWG
Hasta 6	4	12
Entre 10 y 25	10	8
Entre 35 y 70	16	6
Entre 95 y 120	35	2
Entre 150 y 240	50	1
Entre 300 y 400	70	2/0

Fuente: ROJAS Gregor, Manual de Sistemas de Puesta a Tierra, 2007

#### 1.4.4 Naturaleza de una puesta a tierra

En un sistema de puesta a tierra, la resistencia ofrecida al paso de la corriente eléctrica a través de un electrodo hacia el terreno (ver Figura 5), tiene realmente tres componentes principales:

1. Resistencia del electrodo.
2. Resistencia de contacto entre el electrodo y el terreno.
3. Resistencia del terreno mismo.

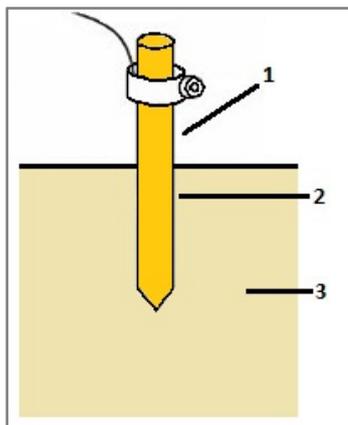


Figura 5. Componentes de la resistencia de tierra en un electrodo de tierra (Fuente: Norma RA 6-015 “Medida de la Resistencia de Puesta a Tierra”, 2005).

1. **Resistencia del electrodo:** Es una resistencia la cual es despreciable de la resistencia total. Los elementos que son empleados comúnmente para conexiones a tierra son: varillas, tubos, masas de metal, estructuras, entre otros.

2. **Resistencia de contacto entre el electrodo y la superficie del terreno:** Se puede despreciar si el electrodo está exento de cualquier cubierta aislante como tintas, pinturas, grasa, y si la tierra está bien compactada en la zona de contacto de sus paredes.
3. **Resistencia del terreno:** ésta es realmente la componente que influye en el valor de la resistencia de una puesta a tierra y depende básicamente de la resistividad del suelo y de la distribución de la corriente proveniente del electrodo.

#### **1.4.5 Importancia en la medición de la resistencia de puesta a tierra**

La medición de la resistencia o impedancia de puesta a tierra, es necesaria por diferentes razones, entre ellas:

- a. Determinar la resistencia actual de las conexiones a tierra.
- b. Verificar la necesidad de un nuevo Sistema de Puesta a Tierra.
- c. Determinar cambios en el Sistema de Puesta a Tierra actual. Se verifica si es posible o no incorporar nuevos equipos o utilizar el mismo sistema de puesta a tierra para protección contra descargas atmosféricas y otros.
- d. Determinar los valores de tensión de paso y de contacto y su posible aumento que resulta de una corriente de falla en el sistema.
- e. Diseñar protecciones para el personal y los circuitos de potencia y comunicación.

#### **1.5. CRITERIO DE VOLTAJE TOLERABLE**

La posibilidad de que el cuerpo humano sea recorrido por la corriente eléctrica constituye un riesgo cotidiano en nuestra vida. En la sociedad industrial, la electricidad

representa un riesgo invisible pero presente en la mayor parte de las actividades humanas. Su uso generalizado y la propia costumbre hacen que muchas veces nos comportemos como si no representara ningún peligro. Nos olvidamos que la corriente eléctrica siempre presenta un determinado riesgo que nunca hay que olvidar.

Es así, que las personas que trabajan o desempeñan tareas de mantenimiento y operación de sistemas eléctricos, tienen como percance común el toque accidental de partes metálicas energizadas.

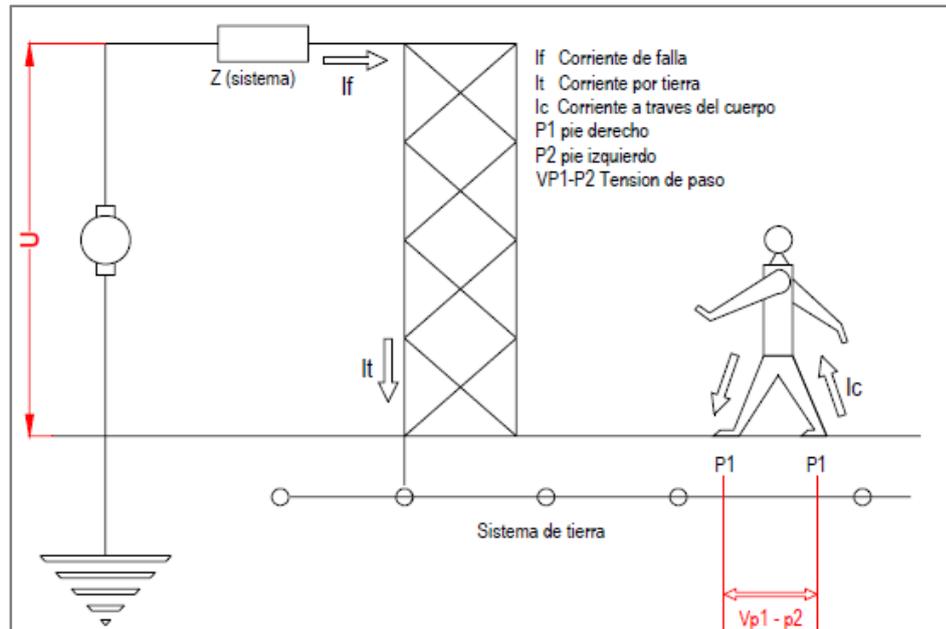
En una subestación, durante una condición de falla producto de una descarga atmosférica, fluyen altos valores de corriente a través de la conexión a tierra, lo cual origina el desarrollo de tensiones de paso y de contacto, las cuales se describen a continuación.

#### **1.5.1 Tensión de Paso**

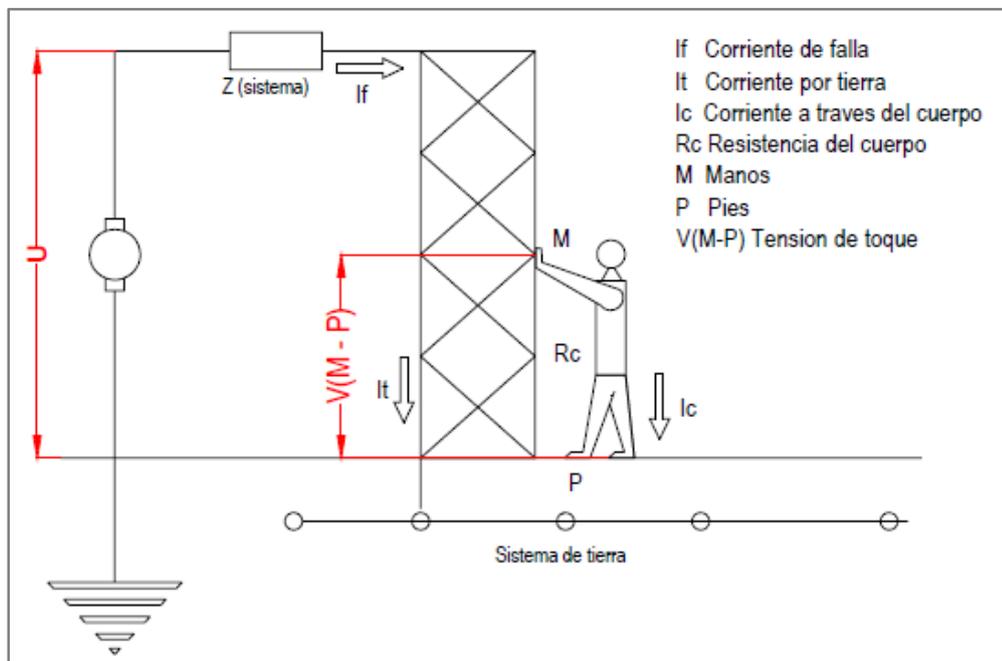
Según la normativa de la IEEE 80-2000, “La tensión de paso (ver Figura 6), es la diferencia de potencial en la superficie terrestre que experimenta una persona a una distancia de un metro con el pie sin tener contacto con cualquier objeto aterrizado”.

#### **1.5.2 Tensión de Contacto**

La normativa IEEE 80-2000 define la tensión de contacto o de toque como sigue; “La tensión de contacto (ver Figura 7), es la diferencia de potencial entre el aumento del potencial de la tierra y el potencial de la superficie en un punto donde una persona se encuentra de pie y al mismo tiempo tenga una mano en contacto con una estructura aterrizada”.



**Figura 6. Tensión de Paso. (Fuente: ROJAS Gregor, Manual de Sistemas de Puesta a Tierra, 2007)**



**Figura 7. Tensión de Toque o de Contacto. (Fuente: ROJAS Gregor, Manual de Sistemas de Puesta a Tierra, 2007)**

### 1.5.3 Valores Máximos Admisibles de las Tensiones de Paso y de Contacto<sup>4</sup>

La seguridad de una persona depende en prevenir que ésta, absorba una cantidad crítica de descarga eléctrica, antes de que la falla se elimine. La tensión máxima de conducción de cualquier circuito accidental no debe exceder los límites que se indican a continuación, en las ecuaciones [5], [6], [7] y [8]:

$$E_{paso50kg} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ para un peso corporal de 110 lb} \quad [5]$$

$$E_{paso70kg} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ para un peso corporal de 155 lb} \quad [6]$$

Simultáneamente, el límite de la tensión de contacto o toque es:

$$E_{toque50kg} = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ para un peso corporal de 110 lb} \quad [7]$$

$$E_{toque70kg} = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ para un peso corporal de 155 lb} \quad [8]$$

En donde la ecuación [9], hallada de una forma empírica da el valor de  $C_s$

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} [9]$$

Dónde:

$E_{paso}$  = Es la tensión de paso [V].

$E_{toque}$  = Es la tensión de toque o de contacto [V].

$C_s$  = Es el factor reductor de la capacidad normal.

---

<sup>4</sup>Tomado de la norma *IEEE Std. 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Grounding"*, IEEE, 2000, p. 27

$t_s$  = Es la duración del golpe de corriente [seg].

$\rho_s$  = Es la resistividad del material superficial [ $\Omega \cdot m$ ].

$\rho$  = Es la resistividad del terreno abajo del material superficial [ $\Omega \cdot m$ ].

$h_s$  = Es la altura del material superficial [m].

#### 1.5.4 Valores Reales de las Tensiones de Paso y de Contacto<sup>5</sup>

Según la normativa de la IEEE 80-2000, “Los valores de tensión de paso se obtienen como producto del factor geométrico,  $K_s$ ; el factor correctivo,  $K_i$ ; la resistividad del suelo,  $\rho$ ; y la corriente promedio en por unidad de la longitud efectiva del conductor del sistema de aterrizaje enterrado ( $I_G/L_s$ )”. La tensión de contacto se ve expresada en la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} [10]$$

Dónde:

$E_s$  = Es la tensión de paso [V].

$\rho$  = Es la resistividad del terreno abajo del material superficial [ $\Omega \cdot m$ ].

$K_s$  = Es el factor de espaciamiento para la tensión de paso.

$K_i$  = Es el factor de corrección para la geometría de la malla.

$I_G$  = Es la corriente máxima de falla [A].

$L_s$  = Es la longitud efectiva del conductor de la malla, para la tensión de paso [m].

Para mallas con o sin varillas de aterrizaje, la longitud enterrada efectiva,  $L_s$ , se calcula de la siguiente manera:

$$L_s = 0,75 \cdot L_c + 0,85 \cdot L_R [11]$$

Dónde:

---

<sup>5</sup>Tomado de la norma IEEE Std. 80-2000, “Guide for Safety in AC Substation Grounding”, IEEE, 2000, p.91-94

$L_c$  = Es la longitud total del conductor en una malla [m].

$L_R$  = Es la longitud total de todas las varillas de aterrizaje [m].

Mientras que, los valores de tensión de contacto se obtienen como producto del factor geométrico,  $K_m$ ; el factor correctivo,  $K_i$ , la resistividad del suelo,  $\rho$ ; y la corriente promedio en por unidad de la longitud efectiva del conductor del sistema de aterrizaje enterrado ( $I_G/L_M$ ). La tensión de contacto se ve expresada en la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} [12]$$

Dónde:

$E_m$  = Es la tensión de contacto [V].

$K_m$  = Es el factor de espaciamento para la tensión de contacto.

$L_M$  = Es la longitud efectiva del conductor de la malla, para la tensión de contacto [m].

Para mallas sin varillas de aterrizaje o mallas con tan solo algunas varillas dispersas a lo largo de la malla, pero ninguna colocada en las esquinas o sobre todo en el perímetro de la malla, la longitud enterrada efectiva,  $L_M$ , es:

$$L_M = L_c + L_R [13]$$

Para mallas con varillas de aterrizaje en las esquinas, así como a lo largo de su perímetro y sobre toda la malla, la longitud enterrada efectiva,  $L_M$ , es:

$$L_M = L_c + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R [14]$$

Dónde:

$L_r$  = Es la longitud de cada varilla de aterrizaje [m].

$L_x$  = Es la longitud máxima de los conductores de malla en dirección de x [m].

$L_y$  = Es la longitud máxima de los conductores de malla en dirección de y [m].

### 1.5.5 Determinación de los factores $K_s$ , $K_i$ , $K_m$ y $n$ <sup>6</sup>

Para la determinación de los factores, es necesario tener en cuenta las siguientes definiciones:

$h$  = Es la profundidad a la que se encuentra enterrada la malla de tierra [m].

$D$  = Es el espaciamiento entre conductores paralelos [m].

$n$  = Es el número efectivo de conductores paralelos en una malla.

$d$  = Es el diámetro del conductor de malla [m].

$K_{ii}$  = Es el factor de ponderación correctivo, que se ajusta para efectos de conductores internos.

$K_h$  = Es el factor de ponderación correctivo, que hace hincapié en los efectos de la profundidad de la malla.

El factor de espaciamiento para la tensión de paso,  $K_s$ , es:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad [15]$$

El factor de corrección para la geometría de la malla,  $K_i$ , es:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad [16]$$

El factor de espaciamiento para la tensión de contacto,  $K_m$ , es:

---

<sup>6</sup>Tomado de la norma *IEEE Std. 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Grounding"*, IEEE, 2000, p.91-94

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] [17]$$

El factor de ponderación correctivo,  $K_{ii}$ , para mallas con varillas de aterrizaje a lo largo de su perímetro, o para mallas con varillas de aterrizaje en sus esquinas, o ambos, es  $K_{ii} = 1$ .

Mientras que para mallas sin varillas de aterrizaje o mallas con pocas varillas de aterrizaje, ninguna de ellas colocada en las esquinas o en el perímetro, tenemos que:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{2/n}} [18]$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} h_o = 1m \text{ (profundidad de referencia de la malla)} [19]$$

El número efectivo de conductores paralelos en una malla dada,  $n$ , es:

$$n = n_a + n_b + n_c + n_d [20]$$

Dónde:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_P}$$

$n_b = 1$  para mallas cuadradas.

$n_c = 1$  para mallas cuadradas y rectangulares.

$n_d = 1$  para mallas cuadradas, rectangulares y en forma de "L".

Para mallas que presentan una forma distinta, tenemos:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} [21]$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0,7 \cdot A / L_x \cdot L_y} [22]$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} [23]$$

Dónde:

$L_p$  = Es la longitud perimetral de la malla [ $m$ ].

$A$  = Es el área de la malla de tierra [ $m^2$ ].

$D_m$  = Es la distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la malla [ $m$ ].

## 1.6. RESISTIVIDAD DEL TERRENO

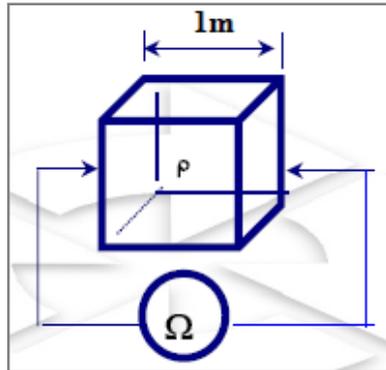
La resistencia a tierra de un electrodo o sistema de electrodos no depende únicamente de la profundidad y el área de contacto de los mismos, sino que además está relacionada con las características propias del terreno.

### 1.6.1 Definición

Se define como resistividad del terreno a “La dificultad que encuentra el paso de la corriente eléctrica un cubo de terreno de un metro de arista (ver Figura 8). Su unidad de medida es el ohmio-metro [ $\Omega \cdot m$ ] y se representa con la letra  $\rho$ .”<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup>TOLEDANO G., José, MARTINEZ REQUENA, Juan, *Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas*, Cuarta Edición, Editorial Thomson Paraninfo, Madrid, 2004, p. 3.



**Figura 8. Resistividad de un cubo de terreno de 1m de arista  
(Fuente: TECSUP virtu@l, Instalación de Puesta a Tierra)**

## 1.6.2 Factores que influyen en la resistividad del terreno

### 1.6.2.1 Naturaleza del terreno

Los terrenos son una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos, esta mezcla hace que los terrenos se consideren buenos, regulares o malos conductores en función de su naturaleza. La Tabla 1.6., describe algunos valores de resistividad para diferentes tipos de terreno.

Tabla 1. 6. Resistividad según la naturaleza del terreno		
NATURALEZA DE LOS SUELOS	RESISTIVIDAD [ $\Omega \cdot m$ ]	
	MÍNIMA	MÁXIMA
Suelos orgánicos y pantanosos	---	30
Lodo	20	100
Húmedo	10	150
Arcillas Plásticas	---	50
Arcillas Compactas	100	200
Arena arcillosa	50	500
Arena silicosa	200	3000
Suelo con piedra	1500	3000
Suelo con piedra cubierto con hierba	300	500
Calcáreo blanco	100	400
Calcáreo compacto	100	5000
Granito y arena	100	1000

**Fuente: HARPER Gilberto, Manual del Técnico en Subestaciones Eléctricas, 2008.**

En la Tabla 1.6., se puede observar que a medida que la roca es más compacta y más antigua, la resistividad es mayor. Los suelos de grano muy fino son muy buenos conductores por lo general, mejores que los de grano medio, y éstos a su vez mejores que los de grano grueso.

### 1.6.2.2 Humedad

La resistividad del terreno se ve influenciada de una manera significativa cuando existe la presencia de humedad en el suelo, apreciablemente cuando este valor cae por debajo del 20% del peso de éste, produciendo que la resistencia del terreno disminuya con el aumento de humedad.

Su valor varía con el clima, época del año y profundidad y para reducir el riesgo de accidentes fatales durante las fallas de fase a tierra, generalmente, se provee de una capa de grava sobre el área de la malla construida, que constituye el propio piso de la subestación. En la Tabla 1.7., se exhiben los efectos típicos de la humedad sobre el terreno.

<b>Tabla 1. 7. Efecto de la humedad en la resistividad del terreno</b>		
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD % POR PESO</b>	<b>RESISTIVIDAD [<math>\Omega \cdot m</math>]</b>	
	<b>TERRENO SUPERFICIAL</b>	<b>ARCILLA ARENOSA</b>
<b>0</b>	10 X 10 <sup>6</sup>	10 X 10 <sup>6</sup>
<b>2.5</b>	2500	1500
<b>5</b>	1650	430
<b>10</b>	530	220
<b>15</b>	210	130
<b>20</b>	120	100
<b>30</b>	100	80

**Fuente: GREGOR Rojas, Manual de Sistemas de Puesta a Tierra, 2007.**

Se puede observar que al estar secos en ambos tipos de terreno las resistividades son alrededor de 10 Mega ohm-m, siendo buenos aislantes. Sin embargo, con un contenido de humedad del 30%, se aprecia un decrecimiento drástico en la resistividad del terreno.

### 1.6.2.3 Temperatura

La temperatura del terreno a profundidades normales de colocación de la malla de puesta a tierra afecta mucho en la resistividad del terreno y por ende a la resistencia del sistema de puesta a tierra. Cuando el terreno se enfría por debajo de 0°C, la resistividad aumenta muy rápidamente.

Si la magnitud de la corriente de cortocircuito es muy elevada, puede modificar el comportamiento de los electrodos de tierra, ya que da lugar a calentamientos alrededor de los conductores enterrados, que provocan la evaporación del agua, disminuyendo con esto la humedad en el terreno y perjudicando el sistema de puesta a tierra. En la Tabla 1.8., se muestra el efecto de la temperatura en la resistividad del terreno.

<b>Tabla 1. 8. Efecto de la temperatura en la resistividad del terreno</b>		
<b>TEMPERATURA</b>		<b>RESISTIVIDAD</b> [ $\Omega \cdot m$ ]
<b>°C</b>	<b>°F</b>	
20	68	72
10	50	99
0 a -5	32 (agua)	138
	32 (hielo)	300
	23	790
-15	14	3300

**Fuente: GREGOR Rojas, Manual de Sistemas de Puesta a Tierra, 2007.**

Se puede notar que la resistividad continúa aumentando conforme baja la temperatura por debajo del punto de congelación.

#### 1.6.2.4 Estratigrafía

Los terrenos están conformados por diferentes capas de agregados y por lo tanto poseen diferentes valores de resistividad (ver Figura 9).

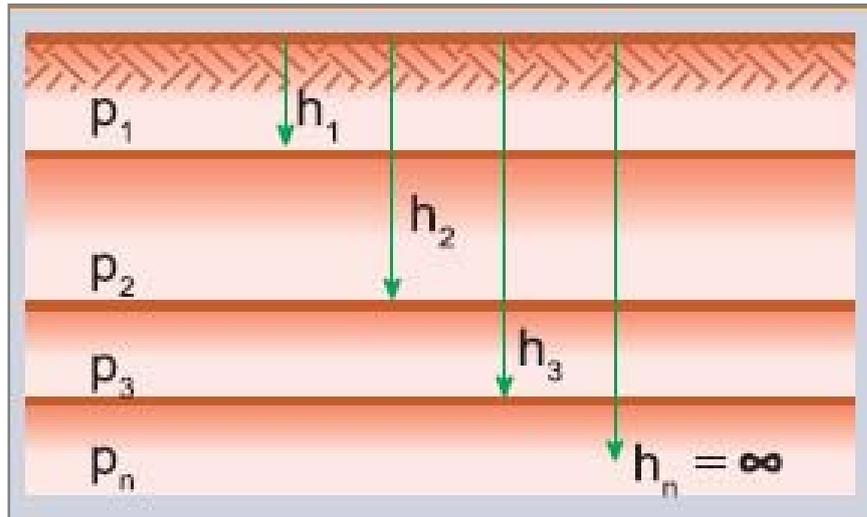


Figura 9. Terreno formado por capas (Fuente: PROCOBRE, Mallas de Tierra, 2010)

El desconocimiento 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.

La resistividad media o aparente, será una combinación de la resistividad de las diferentes capas que conforman el terreno.

#### 1.6.2.5 Salinidad

Al hablar de la influencia de compuestos químicos, especialmente de sales solubles y ácidos en la resistividad del terreno, se encuentra que afectan directamente en su valor.

Un terreno puede mejorar sensiblemente su valor de resistividad, únicamente añadiéndole sales, es decir, al aumentar la salinidad de un terreno su resistividad disminuye significativamente. La Tabla 1.9., muestra el efecto de la sal en la resistividad del terreno.

<b>Tabla 1. 9. Efecto de la sal en la resistividad del terreno</b>	
<b>% DE SAL AGREGADA POR PESO DE HUMEDAD</b>	<b>RESISTIVIDAD [<math>\Omega \cdot m</math>]</b>
0	107
0.1	18
1	4.6
5	1.9
10	1.3
20	1

**Fuente: GREGOR Rojas, Manual de Sistemas de Puesta a Tierra, 2007.**

#### **1.6.2.6 Variaciones estacionales**

Es lógico pensar, que la resistividad del terreno variará considerablemente en las diferentes épocas del año, esto es particularmente cierto en aquellos lugares donde hay variaciones extremas de temperatura, lluvia, temporadas secas y otras variaciones estacionales. Para conseguir mantener el valor de la resistividad lo más uniforme a lo largo del año, es conveniente instalar profundamente los electrodos en el terreno y proteger lo más posible el terreno de las intemperies del tiempo.

#### **1.6.2.7 Compactación del terreno**

La resistividad del terreno disminuye, cuando la compactación del terreno es grande. Al colocar los electrodos se producirá una separación entre la varilla y el terreno, por lo que es necesario compactarlo para que exista un buen contacto entre varilla-terreno.

### **1.6.3 Importancia en la medición de la resistividad**

La medición de la resistividad del terreno es de gran importancia para predecir los siguientes propósitos:

- a. Estimación de la Resistencia de Puesta a Tierra de una estructura o un sistema.
- b. Estimación de gradientes de potencial, incluyendo tensiones de paso y de contacto.
- c. Diseño de sistemas de protección.

Conocer la resistividad del terreno es esencialmente necesario para determinar el diseño de la conexión a tierra de instalaciones nuevas para poder satisfacer las necesidades de resistencia de tierra.

### **1.7. MÉTODOS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.**

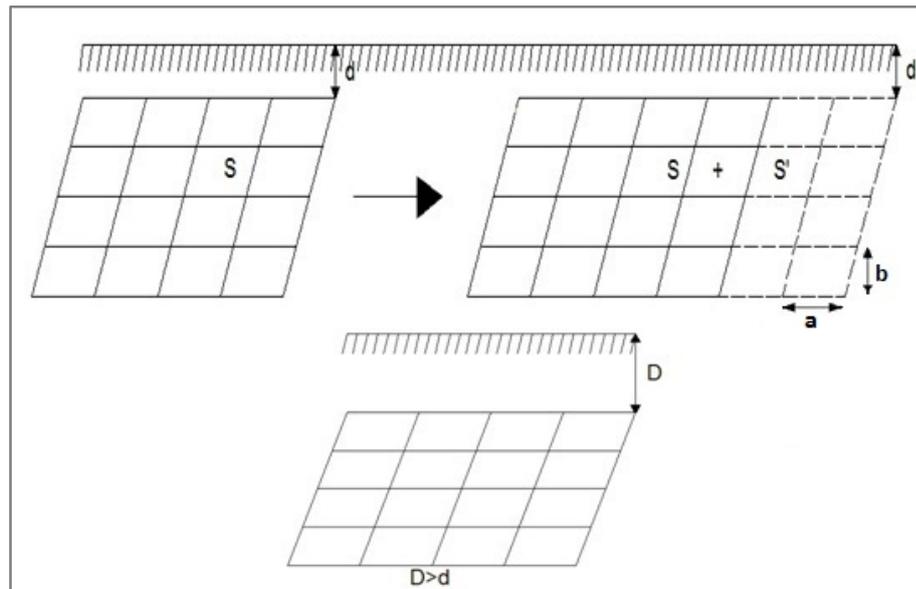
En caso que la medición de la resistencia de puesta a tierra muestre que el valor es muy alto, es preciso modificar el aterramiento para obtener menor resistencia de puesta a tierra. En la práctica existen distintos métodos con esta finalidad, siendo dos los más importantes para el mejoramiento de la resistencia, en subestaciones en servicio:

1. Incremento del área ocupada por la malla.
2. Tratamiento del terreno.

Existe una reducción notable en la resistencia del terreno con la aplicación de estos procesos; pero no se puede determinar en qué medida será la reducción, ya que esto dependerá de cada región. Es aconsejable conocer los distintos métodos para evitar diseños antieconómicos.

### 1.7.1 Incremento del área ocupada por la malla<sup>8</sup>

Esto puede lograrse aumentando la superficie de la malla o su profundidad, dentro del terreno (ver Figura 10).



**Figura 10. Incremento del área ocupada por la malla. (Fuente: REQUENA MARTÍNEZ Juan, Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas, 2004)**

Para el aumento de superficie ocupada por la malla, debe tenerse en consideración los siguientes puntos principales:

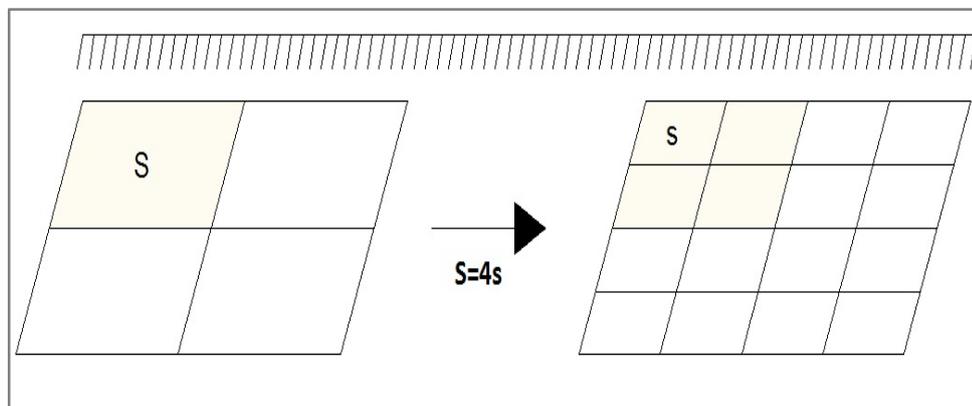
- a. La sección mínima del conductor de puesta a tierra está determinado en función de la corriente de cortocircuito y de su tiempo de duración, por lo que se recomienda que el aumento de la superficie ocupada por la malla se realice con el mismo calibre con el cual fue diseñada la malla de tierra. Debe utilizarse como calibre mínimo el # 4/0 AWG, según norma IEEE Std. 80-2000.

---

<sup>8</sup>TOLEDANO G., José, MARTINEZ REQUENA, Juan, *Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas*, Cuarta Edición, Editorial Thomson Paraninfo, Madrid, 2004, p. 223.

- b. El espaciamiento entre conductores (a) y (b), ver Figura 10, inicialmente se toman entre 3m a 15m.<sup>9</sup> Estos valores se adoptarían como un valor inicial en el mejoramiento de la malla de tierra, pero dependiendo de los valores obtenidos en el desarrollo del nuevo cálculo, los mismos se podrían modificar de manera que se obtenga una malla de tierra más segura.
- c. La conexión entre conductores de tierra, preferentemente deben ser exotérmica debido a sus ventajas que ofrece contra las conexiones atornilladas.
- d. Se recomienda colocar varillas de tierra en la base de los pararrayos y neutros de transformadores, si el diseño de ampliación de la malla de tierra lo requiera.

Otra manera efectiva de reducir la resistencia de puesta a tierra es, con la reducción de la superficie de las retículas de la malla de tierra o de la separación de los conductores de la red general de tierra como se ilustra en la Figura 11. Se toma en consideración los mismos puntos mencionados con anterioridad.



**Figura 11. Reducción de la superficie de la retícula. (Fuente: REQUENA MARTÍNEZ Juan, Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas, 2004)**

<sup>9</sup>Tomado de la norma *IEEE Std. 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Grounding"*, IEEE, 2000, p.88.

## 1.7.2 Tratamiento del Terreno<sup>10</sup>

En esta parte se va a describir los tratamientos químicos que surgen como medios de mejora para disminuir la resistividad del terreno, sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos.

Para elegir el tratamiento químico de un Sistema de Puesta a Tierra, se deben considerar los siguientes factores:

- a. Alto porcentaje de reducción inicial
- b. Facilidad para su aplicación
- c. Tiempo de vida útil (del tratamiento y de los elementos del sistema de tierra)
- d. Facilidad en su reactivación
- e. Estabilidad (mantener la misma resistencia durante varios años)

Además, las sustancias que se usan para un eficiente tratamiento químico deben tener las siguientes características: no ser corrosivas, alta conductividad eléctrica, químicamente estables en el terreno y ser inofensivas para la naturaleza.

Entre los principales tipos de tratamiento químico para reducir la resistencia de una puesta a tierra, se tiene:

1. Tratamiento con sales
2. Tratamiento con geles
3. Procedimiento Ledoux para la mejora de tomas de tierra

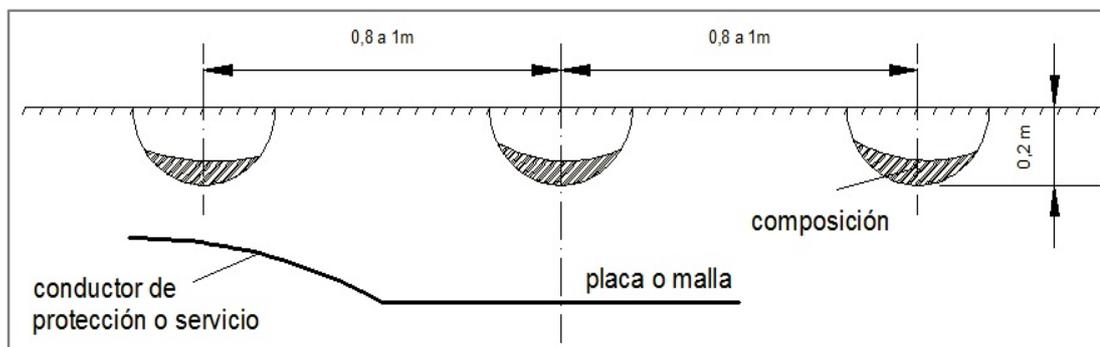
### 1.7.2.1 Tratamiento con sales

---

<sup>10</sup> TOLEDANO G., José, MARTINEZ REQUENA, Juan, *Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas*, Cuarta Edición, Editorial Thomson Paraninfo, Madrid, 2004, p. 237 – 243.

El procedimiento del tratamiento con sales, es que se entierra una sal en una excavación poco profunda alrededor del electrodo o conductor enterrado (ver Figura 12), ésta puede ser: cloruro sódico, carbonato de sosa, sulfato de cobre, sulfato de magnesio, la bentonita, etc., se la llena con la dosis especificada en los catálogos de los compuestos químicos y se riega con agua.

El relleno ideal debe compactarse fácilmente, ser no corrosivo y a la vez buen conductor. Debido que en periodos lluviosos se arrastra la sal por las aguas lluvias, se debe realizar nuevamente el tratamiento al cabo de dos años.



**Figura 12. Tratamiento de un terreno con sal. (Fuente: MARTINEZ REQUENA, Juan, Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas, 2004).**

Para mejorar el valor de resistencia de puesta a tierra se recomienda colocar compuestos químicos en el terreno, como por ejemplo: QUIBACSOL o GEM (GroundEnchancing Material) de ERITECH (ver Figura 13), que lo que hacen es mejorar el grado de humedad del terreno utilizando sustancias químicas, aumentando la conductividad eléctrica del terreno.



**Figura 13. Compuestos QUIBACSOL Y GEM para el tratamiento del terreno. (Fuente: ERITECH y QUIBACSOL, Productos).**

Estos son compuestos adecuados para todo tipo de tomas de tierra, especialmente para aquellas que deben disponer siempre de una resistencia extraordinariamente baja y fiable (ordenadores, sistemas de protección, maquinaria e instrumentación electrónica, viviendas, estaciones de transformación, pararrayos, antenas, etc.).

Son de gran utilidad para mejorar los resultados obtenidos tanto en Puestas a Tierra de nueva ejecución como en el mantenimiento de Puestas a Tierra ya instaladas.

Las instrucciones de uso, así como sus aplicaciones, características y beneficios, de los compuestos químicos mencionados anteriormente se encuentran detalladas en el Anexo B.

#### **1.7.2.2 Tratamiento con geles**

Consiste en tratar el terreno con dos soluciones acuosas que se mezclan y conjuntamente forman un gel. Son compuestos gelatinosos que permite al terreno mantener una estabilidad química y eléctrica por aproximadamente 4 a 6 años.

El método de aplicación consiste en incorporar a la zanja los electrolitos que aglutinados bajo la forma de un gel, mejoren la conductividad de la tierra y retengan la humedad, por un período prolongado. De esta manera se garantiza una efectiva reducción de la resistencia eléctrica y una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones climáticas.

### **1.7.2.3 Procedimiento Ledoux para la mejora de tomas de tierra**

Es un tratamiento por abonado electrolítico, consiste en utilizar electrolitos a base de sulfato cálcico (yeso y anhidrita) convenientemente tratados y estabilizados, cuya solubilidad es muy pequeña, no es contaminante ni agresivo en el terreno donde se aplica. Tiene una eficacia durante 10 años sin ningún tipo de mantenimiento.

El tratamiento consiste en extender en la superficie del terreno el compuesto, según la dosificación ilustrada en la Tabla 1.10. El agua de lluvia disuelve el electrolito y lo retiene por absorción en la superficie de los granos de roca. Gracias a su dificultad de baja solubilidad, permite que penetre poco a poco en el terreno garantizando una perdurabilidad. Existe un compuesto adaptado para cada tipo de terreno, un ejemplo de abonado electrolítico, es el compuesto para la mejora de las tomas de tierra SETACSOL (ver Figura 14), son fáciles de utilizar, económicos y garantizan una baja resistividad.



**Figura 14. Compuesto SETACSOL para el tratamiento del terreno.  
(Fuente: SETACSOL, Productos).**

<b>Tabla 1. 10. Dosificación de los compuestos para el procedimiento Ledoux</b>		
<b>Tipo de Compuesto</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Dosis <i>kg/m<sup>2</sup></i></b>
<b>A 62 SA</b>	Terrenos arenosos, de gran o mediana porosidad, magros y exentos de calcáreo como los rocosos, graníticos, arenosos y cuencas fluviales	7 a 8
<b>B 80 ARF</b>	Terrenos arcillosos, casi desprovistos de cal: granitos descompuestos poco profundos y ricos en arcilla, terrenos pantanosos.	5 a 6
<b>C 85 ARC</b>	Terrenos calizos, arcillas fuertes ricas en cal.	6 a 8
<b>D 55 CA</b>	Terrenos descarnados o recubiertos por una ligera capa de tierra de labranza <sup>11</sup>	7 a 8
<b>E 92 GR</b>	Es complementaria y se utiliza para rellenado de los intersticios de los suelos que presentan cavidades.	50 a 100

**Fuente: Autor**

---

<sup>11</sup> Labranza: Es el laboreo del suelo anterior a la siembra con maquinaria (arados) que corta e invierte total o parcialmente los primeros 15cm de suelo

## CAPITULO II

### EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

La Subestación Obrapía con niveles de tensión de 69kV y 13.8kV y con una potencia de 10 MVA (ver Figura 15), perteneciente a la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (E.E.R.S.S.A), se encuentra ubicada en la zona sur-occidental, en la ciudad de Loja, Ecuador. Ésta posee cuatro líneas de subtransmisión y seis alimentadores de distribución.



**Figura 15. Subestación Obrapía. (Fuente: Autor).**

En la actualidad la Subestación, tiene 35 años de servicio, lo cual implica que los equipos y sistemas están cumpliendo su tiempo de vida útil. El Sistema de Puesta a Tierra de la subestación, también puede verse afectado por los factores ambientales que presenta la propia naturaleza.

Por lo tanto, debido a los años en servicio que presenta la Subestación Obrapía, la evaluación y diagnóstico del sistema de puesta a tierra es de gran importancia para obtener información y datos actuales de la resistividad del terreno y la resistencia de puesta a tierra, verificando de esta manera si cumple o no, con las normas y estándares establecidos en la actualidad.

Los sistemas de puesta a tierra en las subestaciones eléctricas, una vez que cumplen los valores estándares establecidos por las normas, garantizan las condiciones de seguridad para los seres vivos, permiten a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas y minimizan daños en el sistema.

## **2.2. CONDICIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

### **2.2.1 Antecedentes**

El sistema de puesta a tierra de la Subestación Obrapía, fue realizado en el año de 1975. Está compuesta por una malla de tierra, la misma que se encuentra interconectada con todos los equipos y estructuras presentes en dicha subestación.

La malla de tierra se encuentra colocada a una profundidad de 50cm y está constituida por:

- **Conductor de tierra:** cable de cobre desnudo calibre # 1/0 AWG.
- **Conductor de protección y de servicio:** cable de cobre desnudo calibre # 1/0 AWG.

La unión que se da entre los conductores de tierra está realizada mediante conexiones atornilladas. Desde el año en que fue diseñada la malla de tierra hasta el momento no se han realizado pruebas de campo que determinen el estado actual de funcionamiento de la malla de puesta a tierra. Además, solo se posee los planos de diseño de la malla de tierra en los cuales se describen la posición exacta de los conductores de tierra y el área cubierta por la malla dentro de la subestación.

### **2.2.2 Levantamiento del Sistema de Puesta a Tierra**

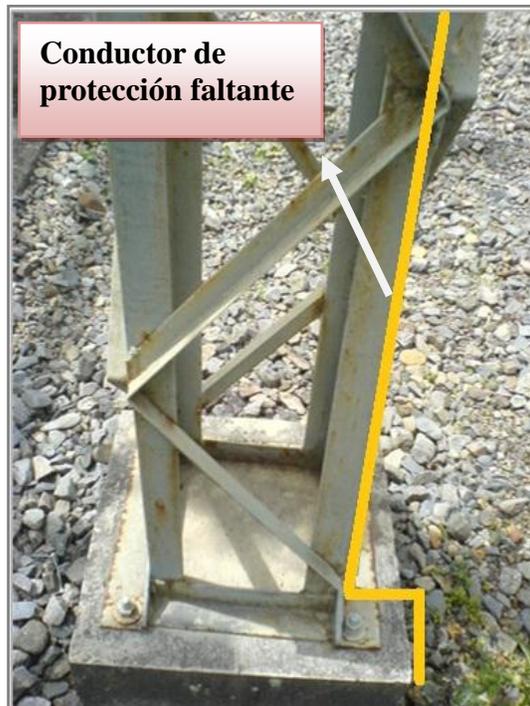
Para realizar un análisis del sistema de puesta a tierra de la Subestación Obrapía, se ha partido del levantamiento del mismo, el cual incluye la ubicación exacta de los elementos que constituyen una malla de tierra, como son: conductores de protección y conductores de de servicio, y un análisis respectivo de la condición física de sus materiales.

Los planos de la ubicación de la malla de tierra y el diagrama unifilar de la Subestación Obrapía se encuentran en el Anexo A.

### **2.2.3 Análisis del sistema de puesta a tierra actual**

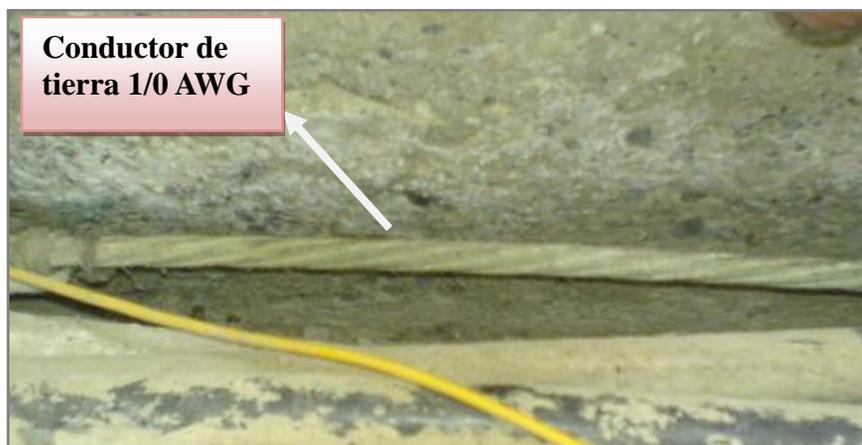
Para el análisis del sistema actual se realizó un recorrido por la subestación, observando los componentes del sistema de puesta a tierra, en referencia a la norma IEEE Std.80-2000. El sistema de puesta a tierra instalado en la Subestación Obrapía, presenta los siguientes inconvenientes:

- a. No todas las estructuras metálicas que se encuentran en la subestación, tienen su conductor de protección respectivo (estructuras de soporte de los aisladores tipo campana para 69kV); por ende, no coinciden con la disposición de puesta a tierra indicada en el plano inicial de construcción de la malla. Esto se puede observar en la Figura 16.



**Figura 16. Estructura metálica no aterrizada (Fuente: Autor).**

- b. La norma IEEE Std. 80-2000 dentro de la clausula 9.4, que se refiere a aspectos básicos del diseño de la mallade tierra, propone en su inciso c), el incluir en la malla, conductores de tierra calibre # 4/0 AWG de material de cobre desnudo. La malla existente en la subestación está construida con conductor # 1/0 AWG, por lo cual no cumple con este inciso. (ver Figura 17).



**Figura 17. Conductor de tierra existente en la malla. (Fuente: Autor).**

- c. Se realizó un chequeo completo de todas las conexiones de puesta a tierra (conductores de protección y conductores de servicio), en el cual se detectó que los conectores de la puesta a tierra de los conductores de protección, se encuentran en mal estado (oxidados), por lo que no tendrán una buena superficie de contacto (ver Figura 18).



**Figura 18. Conexión del conductor de protección en mal estado (Fuente: Autor).**

### **2.3. MEDICION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA Y RESISTIVIDAD DEL TERRENO**

Dado que la resistividad del terreno es un factor determinante en el valor de la resistencia de puesta a tierra de un sistema, es necesario desde el punto de vista técnico, partir de un estudio comprobatorio de las características eléctricas del terreno para evaluar un sistema de tierra.

Se deben efectuar pruebas periódicas para verificar si la resistencia permanece constante o varía. Si esta aumenta a valores muy altos, se debe pensar en instalar electrodos adicionales, incrementar el contenido de humedad o darle tratamiento químico al terreno; estos métodos de mejoramiento de la resistencia de tierra se analizarán posteriormente.

### 2.3.1 Equipo de Medición

Para realizar el estudio pertinente de la malla de tierra en la Subestación Obrapía, se ha utilizado el instrumento de medida: **MEDIDOR DIGITAL DE TIERRAS AEMC MODELO 4500**, con el cual cuenta la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (E.E.R.S.S.A).El instrumento de medida está constituido por cuatro electrodos de prueba y sus respectivos conductores. Para más información técnica acerca del instrumento de medida, recurrir al Anexo C.

En la Figura 19, se muestra el instrumento mencionado anteriormente con sus respectivos accesorios.



**Figura 19. Comprobador de Tierra Modelo AEMC 4500 (Fuente: Manual de Especificaciones del instrumento de medida, 2004)**

## 2.3.2 Métodos de Medición de la Resistividad del Terreno

### 2.3.2.1 Método de Wenner<sup>12</sup>

Este método consiste en calcular la resistividad aparente del terreno colocando en el suelo los cuatro electrodos, o picas, en línea recta a distancias iguales entre sí. La separación entre ellas debe ser al menos 3 veces superior a la profundidad a la que están clavadas (ver Figura 20).

El Dr. Frank Wenner de la Oficina de los estándares de USA, desarrollo la teoría basada en esta prueba en 1915. El demostró que, si la profundidad (b) a la que se clava el electrodo de prueba se mantiene pequeña comparado con la distancia (a) entre electrodos, se aplica la siguiente fórmula:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad [24]$$

Dónde:

$\rho$  = Es la resistividad aparente del terreno [ $\Omega \cdot m$ ].

$a$  = Es la distancia entre electrodos [m].

$R$  = Es la resistencia de puesta a tierra medida [ $\Omega$ ].

A menudo, los resultados de las medidas se ven distorsionadas por piezas de metal enterradas, por tanto, siempre se debe efectuar una segunda medida girando 90° el eje de los electrodos o picas y comparar los resultados, como se ilustra en la Figura 21.

---

<sup>12</sup> Tomado del Manual Técnico “*Medidor Digital de Tierras AEMC modelo 4500*”, 2004, p.12

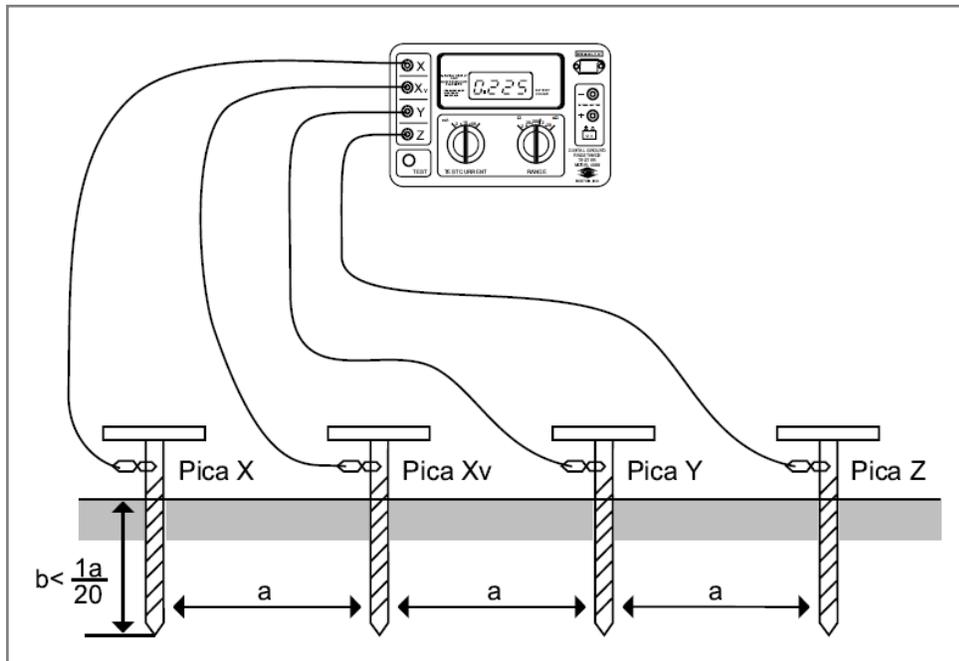


Figura 20. Método de Medición Wenner. (Fuente: Manual del instrumento de medida AEMC, 2004)

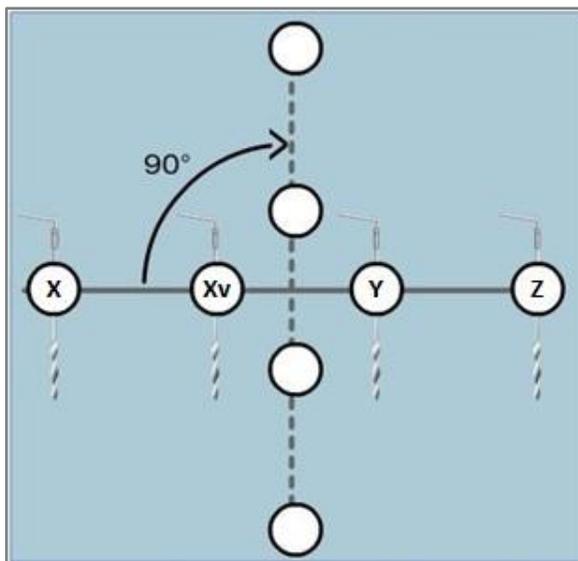


Figura 21. Variación de posición en los electrodos. (Fuente: Demostración Virtual del Fluke 1625, 2004)

### 2.3.2.2 Método de Schlumberger<sup>13</sup>

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 se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancias múltiples ( $ns$ ) de la separación base de los electrodos internos.

Tal como se muestra en la Figura 22., los cuatro electrodos se ubican sobre un mismo eje; se inyecta corriente al terreno a través de los electrodos de corriente externos y se mide la diferencia de potencial entre los electrodos de potencial internos.

Si la profundidad de enterramiento de los electrodos es pequeño comparado con su separación  $s$ ,  $ns$ , entonces la resistividad medida se puede calcular de la siguiente manera:

$$\rho = \pi \cdot ns(ns + s) \frac{R}{s} [25]$$

Dónde:

$\rho$  = Es la resistividad aparente del terreno [ $\Omega \cdot m$ ].

$ns$  = Es la distancia entre el electrodo de corriente y el electrodo de potencial [ $m$ ].

$s$  = Es la distancia entre los electrodos de potencial [ $\Omega$ ].

---

<sup>13</sup> Tomado del Manual Técnico PROCOBRE, “*Mallas de Tierra*”, 2010. [www.procobre.org](http://www.procobre.org)

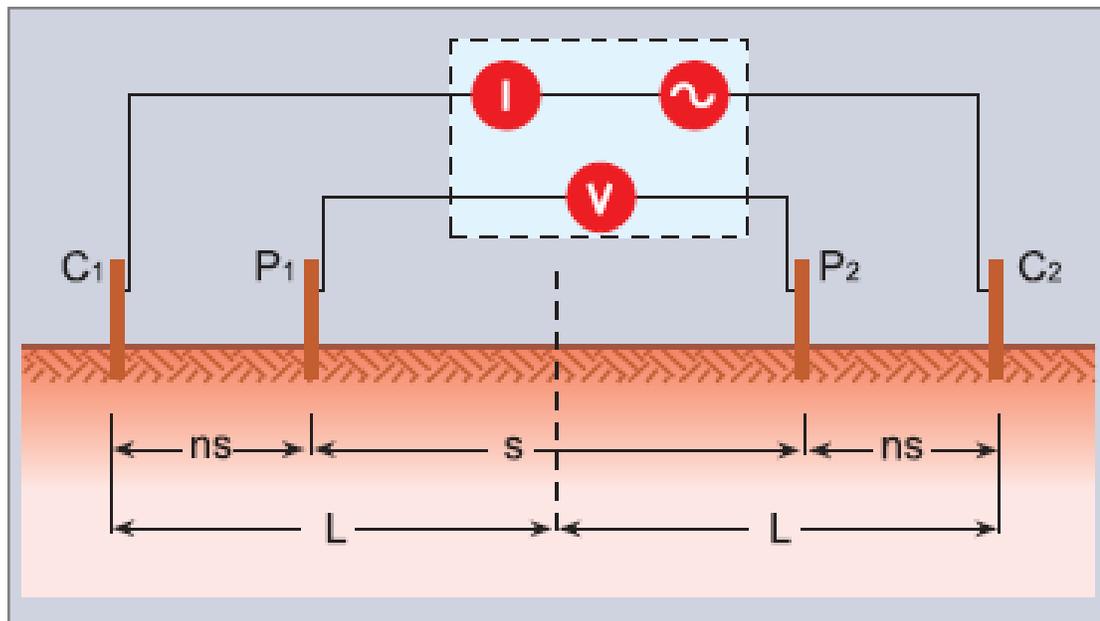


Figura 22. Método de Schlumberger. (Fuente: Manual PROCOBRE, Mallas de Tierra, 2010)

### 2.3.3 Métodos de Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra

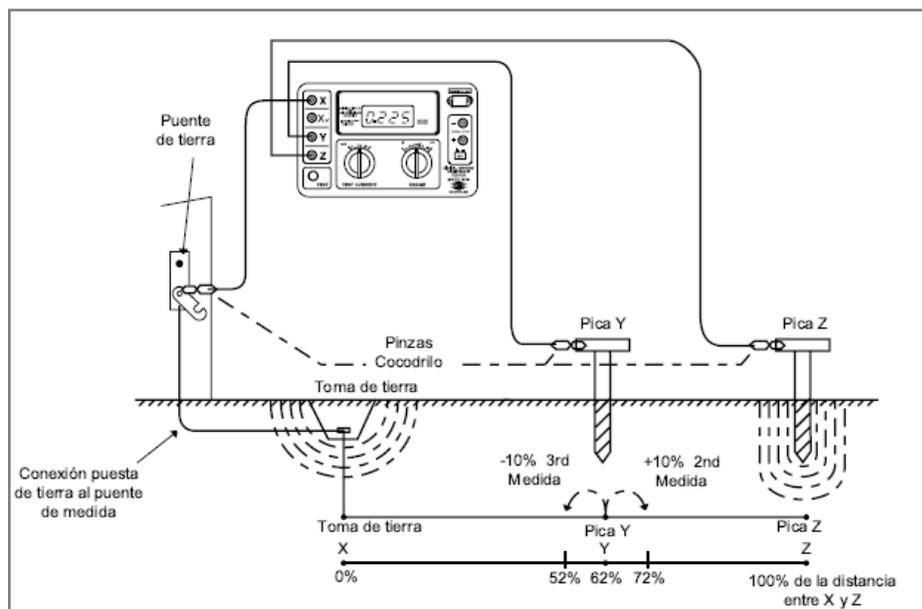
#### 2.3.3.1 Método de Caída de Potencial<sup>14</sup>

El método de comprobación de caída de potencial es conocido también como el método de las dos picas, el método de los tres puntos ó el método del 62%, y se utiliza para medir la resistencia total de un sistema de puesta a tierra.

Para realizar la comprobación a través de éste método, se necesitan dos electrodos auxiliares de conexión a tierra en el terreno, uno es el electrodo de corriente (Z) que va colocado a una distancia de 6,5 veces el lado mayor de la malla, y otro es el electrodo de potencial (Y), ubicado al 62% de la distancia total a la que fue colocado el electrodo de corriente; éstas se colocan en línea recta y alejadas del electrodo de tierra (X) bajo prueba en el terreno, y se toman las lecturas.

<sup>14</sup> Tomado del Manual Técnico "Medidor Digital de Tierras AEMC modelo 4500", 2004, p.10

El instrumento de medida: MEDIDOR DIGITAL DE TIERRAS AEMC MODELO 4500, genera una corriente conocida entre el electrodo externo de corriente (Z) y el electrodo de tierra bajo prueba (X), mientras que se mide el potencial de caída de tensión entre el electrodo auxiliar interno de potencial (Y) y el electrodo de tierra (X); utilizando la ley de Ohm ( $V = IR$ ), el comprobador de tierra, calcula automáticamente el valor total de la resistencia de puesta a tierra. En la Figura 23, se indica el diagrama de conexión para la comprobación de la resistencia según el método caída de potencial.



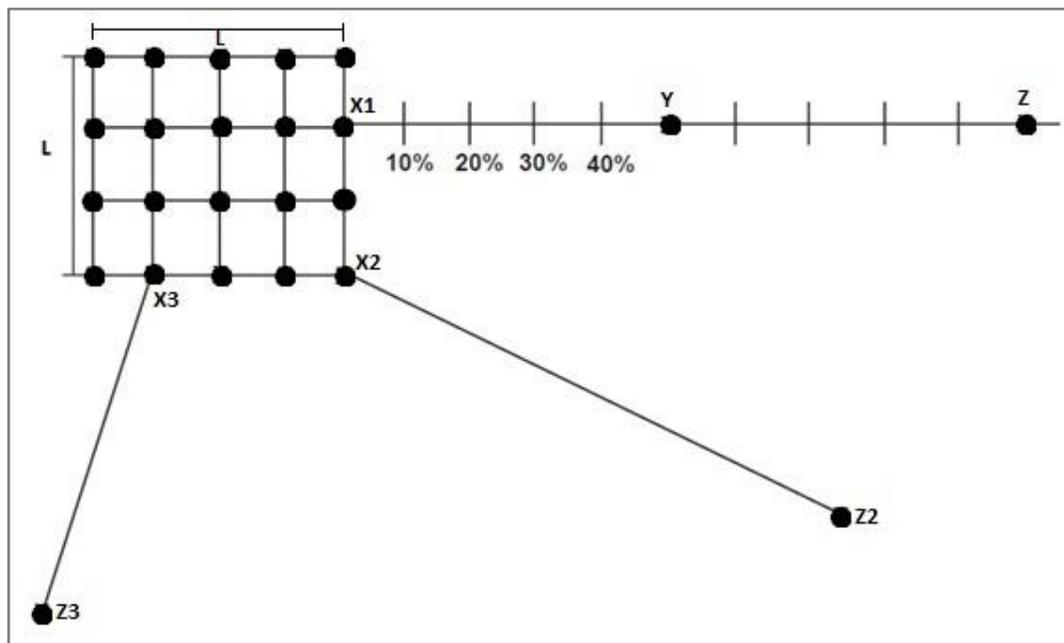
**Figura 23. Método de la caída de potencial para medir la resistencia de un sistema de puesta a tierra. (Fuente: Manual de instrucciones del instrumento de medida, 2004)**

### 2.3.3.2 Método de Intersección de Curvas<sup>15</sup>

En la comprobación con el método de caída de potencial podríamos tener problemas de limitación de espacio para la situación de los electrodos auxiliares, por lo que otro método aceptable en la comprobación de la resistencia de puesta a tierra es el método de la intersección de curvas.

<sup>15</sup> GRANERO Andrés, publicación técnica Schneider, “Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra”, 2001, p. 17-19

Este método elige el electrodo de tierra (X1), ver Figura 24, de forma arbitraria dentro del sistema de electrodos, se lleva el electrodo de corriente (Z) lo más lejos posible que se pueda, tomando ciertas consideraciones que se indican más adelante. Situando al electrodo de potencial (Y) al 10%, 20%, 30%, etc., hasta el 90% de la distancia XZ, se realiza todas las medidas determinándose así varias lecturas de resistencia (con error). Se repite este proceso a diferentes valores de Z, obteniendo nuevos juegos de valores todos diferentes, formando curvas de valores de R en función de la distancia XY, como se ilustra en la Figura 25.



**Figura 24. Disposición de los electrodos para el método de intersección de curvas (Fuente: CENTRO DE FORMACIÓN SCHNEIDER, Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra, 2001)**

Para el desarrollo del presente método, se introduce un nuevo concepto, el valor  $\lambda$ , que es la distancia entre el punto X y el punto de electrodo equivalente del sistema (G), ver Figura 26.

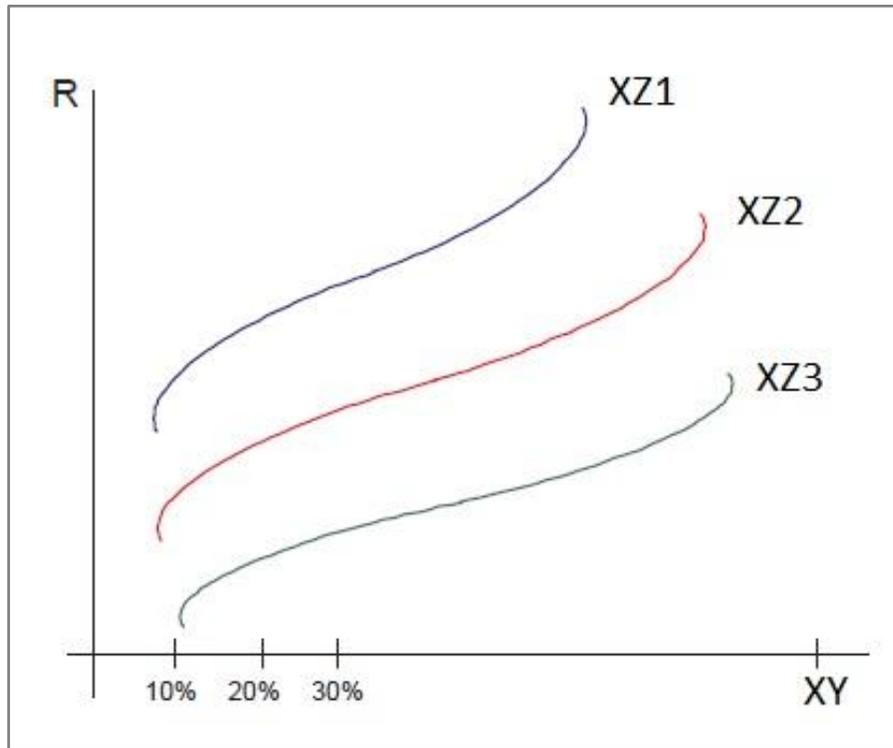


Figura 25. Curva de los valores de  $R$  obtenidos en función de la distancia  $XY$ . (Fuente: CENTRO DE FORMACIÓN SCHNEIDER, Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra, 2001)

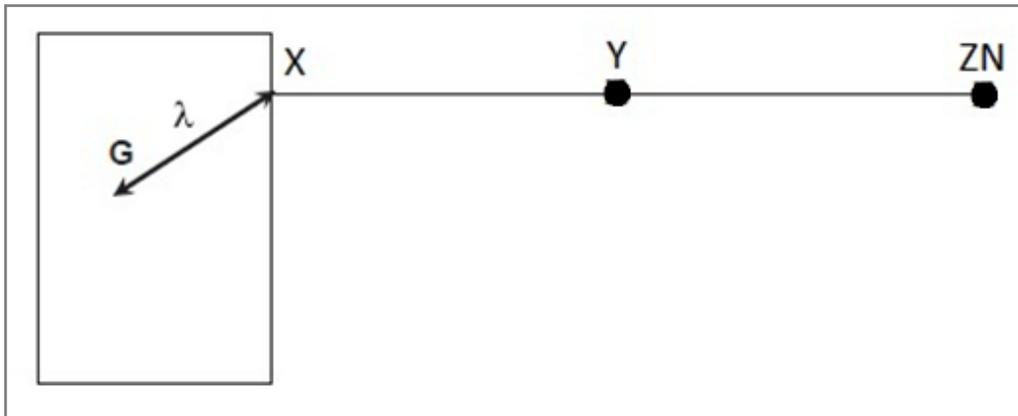


Figura 26. Distancia entre el punto  $X$  y el punto de electrodo equivalente  $G$ . (Fuente: CENTRO DE FORMACIÓN SCHNEIDER, Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra, 2001)

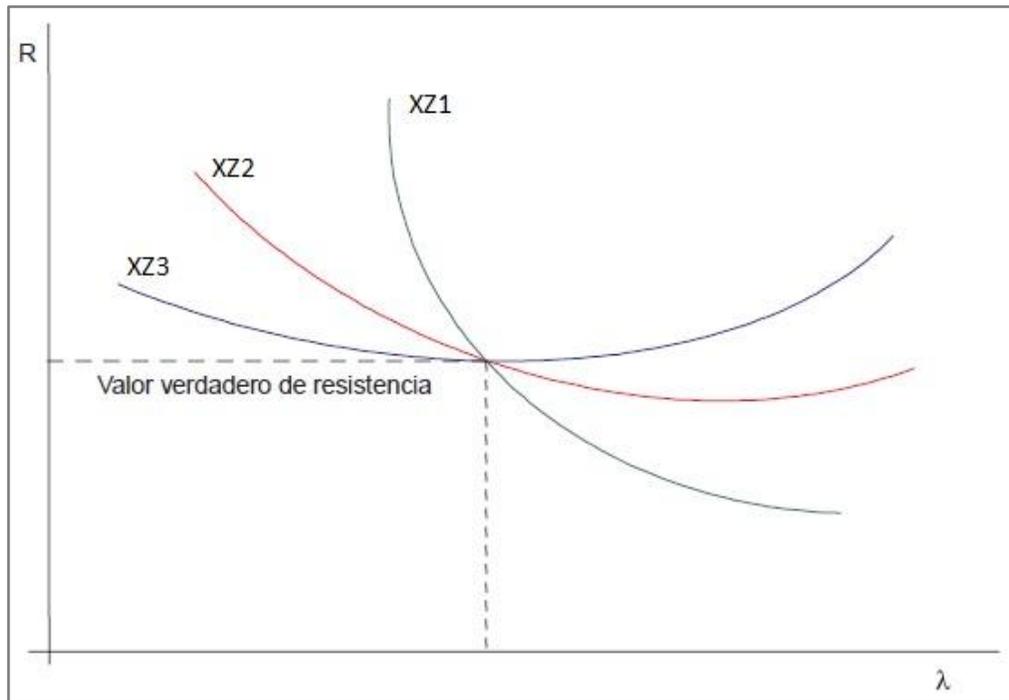
Se realizara la transformación siguiente, utilizando la regla del 61,8%:

$$\lambda + XY = 61,8\%(\lambda + XZN)$$

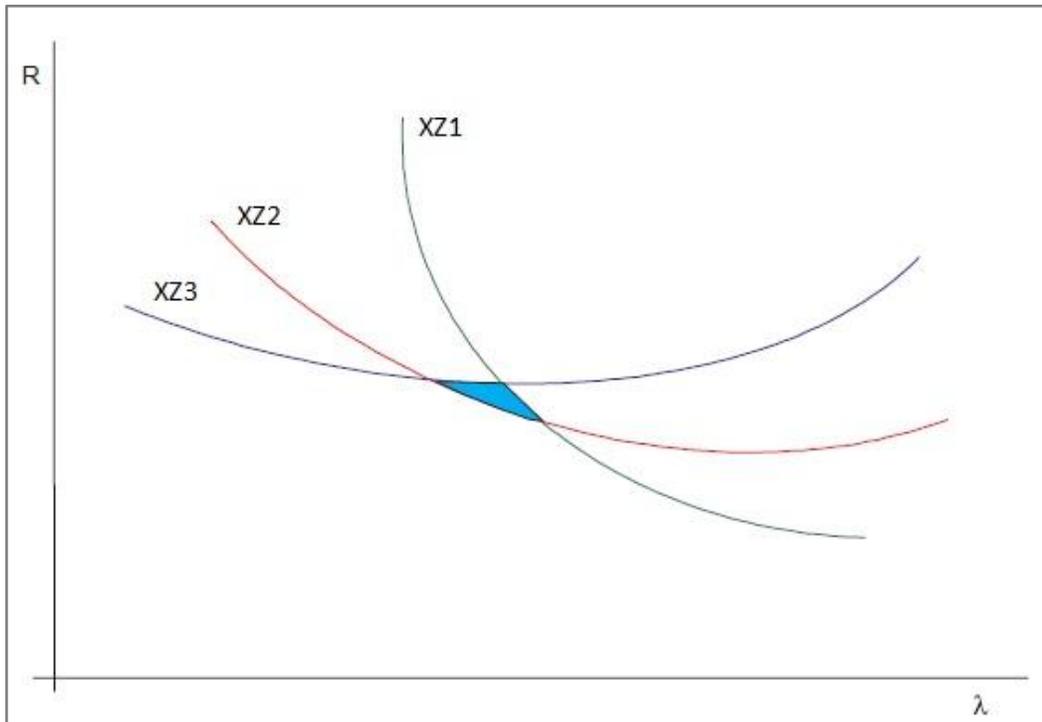
$$\lambda = \frac{0,618XZN - XY}{1 - 0,618}$$

$$\lambda = 1,617XZN - 2,617XY \quad [26]$$

Para cada una de las tres curvas anteriores, sabiendo XZ y los diferentes valores de XY obtendremos una curva R en función de  $\lambda$ , utilizando la ecuación [26], y el verdadero valor de resistencia será el punto de intersección o centro del área comprendida entre curvas, como se puede observar en las Figuras 27 y 28, respectivamente.



**Figura 27. Curva de los valores de R en función de  $\lambda$ . (Fuente: CENTRO DE FORMACIÓN SCHNEIDER, Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra, 2001)**



**Figura 28. Curva de los valores de R en función de  $\lambda$ . (Fuente: CENTRO DE FORMACIÓN SCHNEIDER, Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra, 2001)**

Se debe tener en cuenta ciertas *limitaciones* en la aplicación de este método, las cuales son las siguientes:

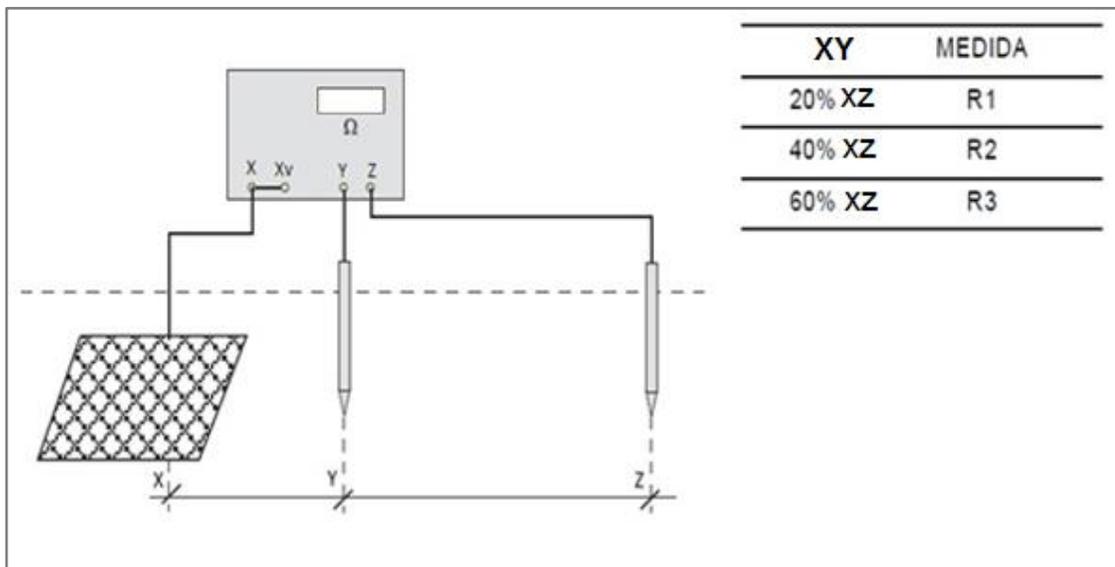
- a. En primer lugar, el valor de Z no puede ser inferior a ciertos límites. La experiencia indica que, tratándose de una malla cuadrada de lado L, no debe ser inferior a este valor.
- b. Tampoco debe ser mayor que ciertos límites pues, además de conspirar contra el objetivo del método, las curvas se aplanan mucho dificultando la determinación del triángulo. Un valor conveniente puede ser el electrodo Z, ubicado a menor o igual a 2L.

Para el caso de mallas de formas diferentes al cuadrado deberá emplearse sentido común dentro de los límites anteriores y, si la forma de la toma de tierra es irregular, se la considerará inscrita en un cuadrado. El inconveniente que tiene este método es que, si bien resuelve el problema de la viabilidad de la medición, es muy laborioso.

### 2.3.3.3 Método de la Pendiente<sup>16</sup>

El método de la pendiente se utiliza en sistemas de electrodos que cubren una gran área, donde la posición del centro geométrico de la malla es desconocido o también se utiliza donde el área disponible para colocar los electrodos de prueba es restringida.

Para el correcto desarrollo del método de la pendiente se tomarán lecturas situando la pica Y a las distancias: 20%, 40% y 60% desde el electrodo X. Estas lecturas son: R1, R2 y R3 respectivamente, ver Figura 29.



**Figura 29. Método de la pendiente. (Fuente: CENTRO DE FORMACIÓN SCHNEIDER, Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra, 2001)**

<sup>16</sup> GRANERO Andrés, publicación técnica Schneider, “Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra”, 2001, p. 16

Se introduce un valor conocido como  $\mu$ , que representa el cambio de pendiente de la curva resistencia-distancia, calculándolo de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} [27]$$

Para el valor de  $\mu$  hallado, aparece un valor de PT/C en las tablas del Dr. TAGG, hallado en Anexo D. Multiplicar dicho valor de PT/C por XZ y obtener la distancia XY. Se coloca el electrodo de potencial a la distancia XZ hallada, y se toma la lectura. Esta lectura es la resistencia de tierra del electrodo bajo prueba, y éste será el resultado.

Se debe tener en cuenta que si el valor de  $\mu$ , es mayor que en la tabla de PT/C, existente en el Anexo D, habrá que colocar el electrodo de corriente Z a mayor distancia.

### 2.3.4 Recomendaciones generales para efectuar las Mediciones<sup>17</sup>

Asegurar medidas validas en sistemas grandes de tierra, requiere usar de técnicas e instrumentos apropiados. La manera de realizar las mediciones de campo de los sistemas de tierra en subestaciones eléctricas, hacen que éstas pruebas sean más delicadas y complejas que sobre una simple barra de tierra. A continuación se presentan puntos que deben tomarse en cuenta para efectuar adecuadamente una medición de resistencia de puesta a tierra:

- a. Las mediciones se efectuaran en días en los que el terreno se presente seco, teniéndose así la situación más desfavorable en la conexión a tierra.

---

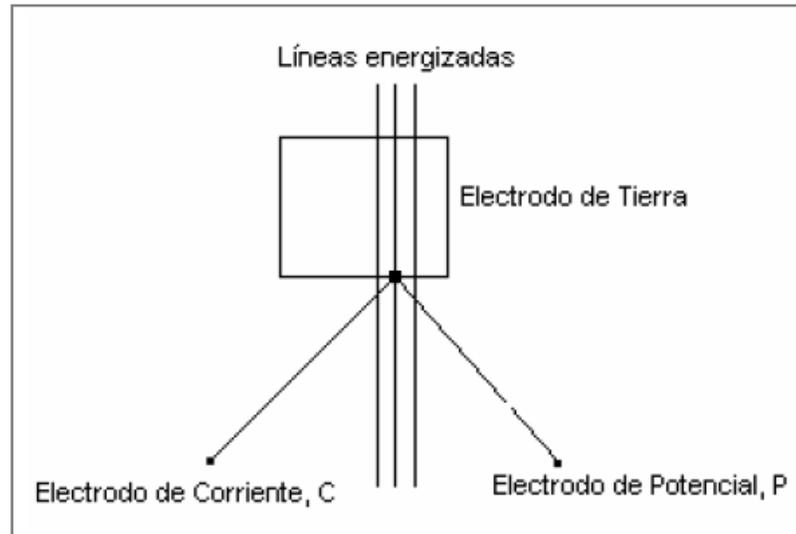
<sup>17</sup> AGULLEIRO, Ignacio, MARTÍNEZ, Miguel, “*Técnicas Modernas para la Medición de Sistemas de Puesta a Tierra en Zonas Urbanas*”, <http://www.lu3hba.com.ar/ARTICULOS%2010/Medicion%20de%20Sistema%20de%20Puesta%20a%20Tierra.pdf>

- b. Los conductores, conectores y los extremos exteriores de los electrodos auxiliares del equipo de medición, deben estar en buen estado de conservación
- c. En caso de realizar mediciones en áreas donde se encuentren enterrados objetos metálicos (tuberías, varillas, etc.) se requiere realizar mediciones ortogonales, para poder así eliminar la influencia de estos objetos en la medición.
- d. Para la medida de resistencia de puesta a tierra, se recomienda que la instalación debe estar desenergizada y el electrodo de tierra desconectado del sistema eléctrico. “De no ser posible la desenergización total de la instalación y la desconexión completa del electrodo de tierra, debe seguirse un procedimiento de seguridad rigurosamente organizado, que contemple los siguientes aspectos”<sup>18</sup>
  - Una persona a cargo del trabajo.
  - Comunicación entre todos quienes participan en la prueba, vía radio o teléfono portátil.
  - Uso de guantes de goma y calzado adecuado.
  - Suspensión de la prueba durante una tormenta eléctrica u otras condiciones severas de tiempo.
- e. En caso de que el terreno este muy seco, es recomendable humedecer los electrodos, especialmente el electrodo de corriente, para obtener un buen contacto entre el electrodo auxiliar y el terreno.
- f. La presencia de líneas energizadas de alta tensión en las cercanías del área donde se está llevando a cabo la medición, afecta la calidad de la misma, en particular cuando se está midiendo de forma paralela a la línea energizada.

---

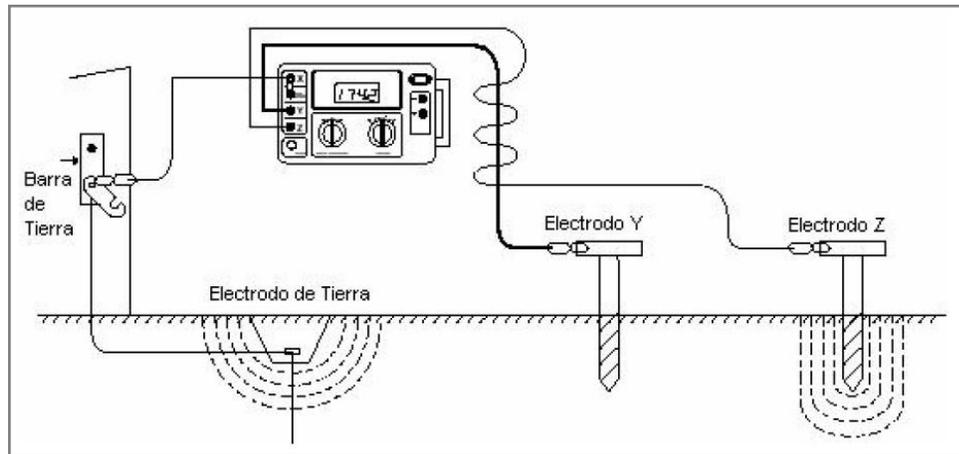
<sup>18</sup> Recomendaciones tomadas del Manual PROCOBRE, “*Mallas de Tierra*”, 2010, [www.procobre.org](http://www.procobre.org)

Para evitar esta interferencia, se debe realizar la medición en una dirección perpendicular a la línea energizada, incluso se puede medir abriendo los electrodos de corriente y potencial unos  $90^\circ$ , como se ilustra en la Figura 30.



**Figura 30. Electrodos de corriente y potencial a  $90^\circ$  entre sí. (Fuente: AGULLEIRO Ignacio, Técnicas Modernas para la Medición de Sistemas de Puesta a Tierra en Zonas Urbanas, 2009)**

- g. Durante la ejecución de las medidas de campo, el ruido excesivo puede interferir con la medición debido a la gran longitud de los cables de los electrodos de prueba. El voltaje de interferencia debe estar dentro de la tolerancia del equipo de medición; de no ser así se puede utilizar la siguiente técnica:
- Trenzar los cables que van hasta los electrodos de prueba. Esto puede cancelar los voltajes de modo común entre los dos conductores. En la Figura 31., se ilustra el proceso.



**Figura 31. Trenzado de cables de los electrodos de prueba. (Fuente: AGULLEIRO Ignacio, Técnicas Modernas para la Medición de Sistemas de Puesta a Tierra en Zonas Urbanas, 2009)**

- h. Instruir al personal para la realización de las pruebas de campo y acoger las medidas de seguridad necesarias.

## **2.4. MEDIDAS DE CAMPO EN LA SUBESTACIÓN OBRAPÍA**

### **2.4.1 Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra**

Para realizar la medición de la resistencia de puesta a tierra, se ha empleado dos variaciones del método de caída de potencial, siendo los métodos a utilizarse los siguientes:

1. El método de intersección de curvas, y
2. El método de la pendiente.

Para lo cual, las mediciones de campo se realizaron con el instrumento de medida: MEDIDOR DIGITAL DE TIERRAS AEMC MODELO 4500, con el cual se determinará la resistencia total de puesta a tierra de la malla y la resistividad del terreno en la Subestación Obrapía.

**NOTA.-** No se utilizó el método mediante medidor tipo pinza, debido a que éste método es usado para comprobar las resistencias de conexiones de tierra individuales en sistemas con conexiones de tierra en paralelo y no es aplicable para mallas de subestaciones.

#### 2.4.1.1 Método de Intersección de Curvas

Debido a la limitación de espacio presente en la subestación, se optó por la realización del método de Intersección de Curvas. El procedimiento de medición a seguir y su ficha técnica a elaborar se presentan en el Anexo E.

Analizando la Figura 32, que es el resultado gráfico obtenido de la medición de la resistencia de puesta a tierra de la malla con el Método de Intersección de Curvas, se obtiene que el verdadero valor de resistencia es el centro del área comprendida entre los valores del factor lambda igual a:  $\lambda=80$  m y  $\lambda=120$  m, siendo el resultado el siguiente:

<b>Tabla 2. 1. Valor de la resistencia de puesta a tierra con el Método de Intersección de Curvas</b>	
<b>Resistencia (ohm)</b>	<b>Lambda <math>\lambda</math> (m)</b>
0,228	100

**Fuente: Autor.**

Con el resultado del factor lambda encontrado en la Tabla 2.1., se procede a calcular la distancia XY necesaria para realizar mediciones de mantenimiento en lo posterior; esto con ayuda de la ecuación [26].

El valor calculado de distancia XY, con su respectiva distancia XZ se presenta a continuación:

<b>Tabla 2. 2. Distancia XY (electrodo en prueba- electrodo de corriente) a partir de la distancia XZ (electrodo en prueba- electrodo de potencial)</b>	
<b>Distancia XZ (m)</b>	<b>Distancia XY (m)</b>
90	17
100	24
110	30

**Fuente: Autor.**

#### **2.4.1.2 Método de la Pendiente**

El método de la pendiente, designado en su mayor parte para sistemas de electrodos que cubren una gran área, es utilizado para determinar la resistencia de puesta a tierra de la malla en la subestación.

Se describe paso a paso el procedimiento de medición a seguir y se tiene la ficha técnica a elaborar para obtener los resultados necesarios para su respectivo análisis, en el Anexo D. Los resultados obtenidos, se resumen en la Tabla 2.2.

<b>Tabla 2.3. Valores de la resistencia de puesta a tierra por prueba con el Método de la Pendiente</b>					
<b>VALORES</b>	<b>u</b>	<b>PT/C</b>	<b>XZ al 100% (m)</b>	<b>XY (m)</b>	<b>R (ohm)</b>
<b>PRUEBA 1</b>	1,000	0,5416	180	<b>97</b>	<b>0,231</b>
<b>PRUEBA 2</b>	0,500	0,6288	144	<b>91</b>	<b>0,210</b>

**Fuente: Autor.**

Obteniendo la gráfica (resistencia obtenida por prueba en función de la distancia XY al 100%, ver Figura 33) con ayuda de los resultados presentados en la Tabla 2.2., se realiza el respectivo análisis y como se observa los puntos resultantes de estos datos son semejantes y no muy distantes.

Por lo tanto, se opta como el valor real de resistencia de puesta a tierra de la malla en la subestación, al valor medido en la PRUEBA 1 con la distancia XZ a 180m, debido a que éste valor fue medido con las limitaciones del método en estudio.

<b>Tabla 2. 4. Valor de resistencia de puesta a tierra con el Método de la Pendiente</b>	
<b><i>Resistencia (ohm) =</i></b>	<b>0,231 <math>\Omega</math></b>

**Fuente: Autor**



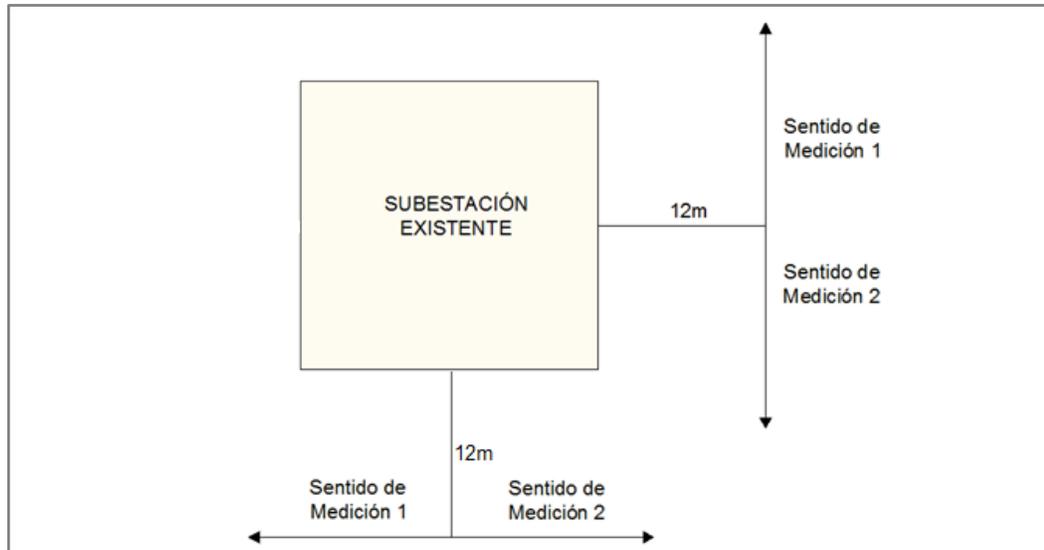
Figura 32. Resultado gráfico del Método de Intersección de Curvas. (Fuente: Autor).



Figura 33. Resultado por prueba de la resistencia de puesta a tierra de la malla con el Método de la Pendiente. (Fuente: Autor).

### 2.4.2 Cálculo de la Resistividad del Terreno

Para medir la resistividad del terreno en una subestación existente, se debe realizar al menos dos sentidos de mediciones, en direcciones alejadas como mínimo 12m del perímetro de la malla<sup>19</sup> (ver Figura 34).



**Figura 34. Distancia mínima alejada de la subestación existente para realizar las mediciones de resistividad del terreno. (Fuente: SOLON DE MEDEIROS, Medidas Eléctricas, 1979).**

En vista, que en la subestación en estudio existe limitación de espacio para efectuar las medidas, se optó por realizar el cálculo de la resistividad del terreno aproximando con el Método de Sverak. La ecuación está dada por:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] [28]$$

<sup>19</sup>DE MEDEIROS FILHO, Solon, *Fundamentos de Medidas Eléctricas Incluido Medicao de Resistencia de Terra e Resistividade do Solo*, Editora Universitaria RECIFE, Pernambuco, 1979, p. 301-302.

Dónde:

$R_g$  = Resistencia total de puesta a tierra de un sistema de tierra [ $ohm$ ]

$\rho$  = Valor medio de la resistividad del terreno [ $ohm \cdot m$ ]

$L_T$  = Longitud total del conductor enterrado (conductores horizontales y electrodos verticales)[ $m$ ]

$h$  = Profundidad de la malla de tierra [ $m$ ]

$A$  = Área de la malla de tierra [ $m^2$ ]

Los datos que se consideró para el cálculo son:

$R_g = 0,231 \Omega$  (Tomado como resultado de la Tabla 2.3.)

$L_T = 1571 m$  (Se obtiene de la suma de la longitud de los conductores horizontales de la malla de puesta a tierra existente, ver Anexo A)

$A = 8464 m^2$  (Se obtiene multiplicando el largo y ancho de la malla de puesta a tierra existente, 92m x92m)

$h = 0,5 m$

El valor de la resistividad del terreno de la Subestación Obrapía, es la indicada en la Tabla 2.4.

<b>Tabla 2. 5. Valor de Resistividad del Terreno</b>	
$\rho =$	<b><math>42\Omega \cdot m</math></b>

**Fuente: Autor.**

Considerando el resultado calculado, según la Tabla 1.6 se ve que el área posee una resistividad característica de *un terreno orgánico húmedo*, el cual es propio del terreno existente en la Subestación Obrapía.

## 2.5. CÁLCULO DE LAS TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO<sup>20</sup>

Según la normativa IEEE Std. 80-2000, los valores de tensión de paso y de contacto se obtienen según las ecuaciones [10] y [12] indicadas en el capítulo 1. Previamente para el desarrollo de las ecuaciones [10] y [12], se necesita el cálculo de varios factores como son: factor de decremento  $D_f$ , factor de división de corriente de falla  $S_f$ , y la corriente máxima de falla a tierra  $I_G$ . Además para determinar el valor correcto de dicha corriente de falla, se necesita:

- a. Determinar el tipo de falla posible a tierra que produzca el máximo flujo de corriente entre la malla del sistema de tierra y la tierra adyacente.
- b. Determinar, el máximo valor efectivo de la corriente simétrica de falla a tierra  $I_f$  entre la malla de tierra y la tierra circundante en el instante de iniciarse la falla.

### 2.5.1 Tipos de falla a tierra

En los sistemas eléctricos pueden ocurrir diferentes tipos de falla, siendo dos las principales fallas a tierra:

- a. Fallas línea a tierra y
- b. Fallas línea-línea a tierra.

El máximo valor de corriente de falla a tierra, fue determinado mediante la simulación del sistema equivalente de la Subestación Obrapía a máxima generación (ver Figura 35) con ayuda del programa SPARD POWER 1<sup>21</sup>. La máxima corriente de falla a tierra fue la provocada por una falla línea-línea a tierra, presente en la Fase C, del barraje de 13.8kV. El valor de la corriente de falla es,  $I_f = 3,432 \text{ kA}$

---

<sup>20</sup>Tomado de la IEEE Std. 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Grounding", IEEE, 2000, Anexo B, p.129-134.

<sup>21</sup>Programa de simulación que posee el departamento de Subestaciones en la E.E.R.S.S.A.

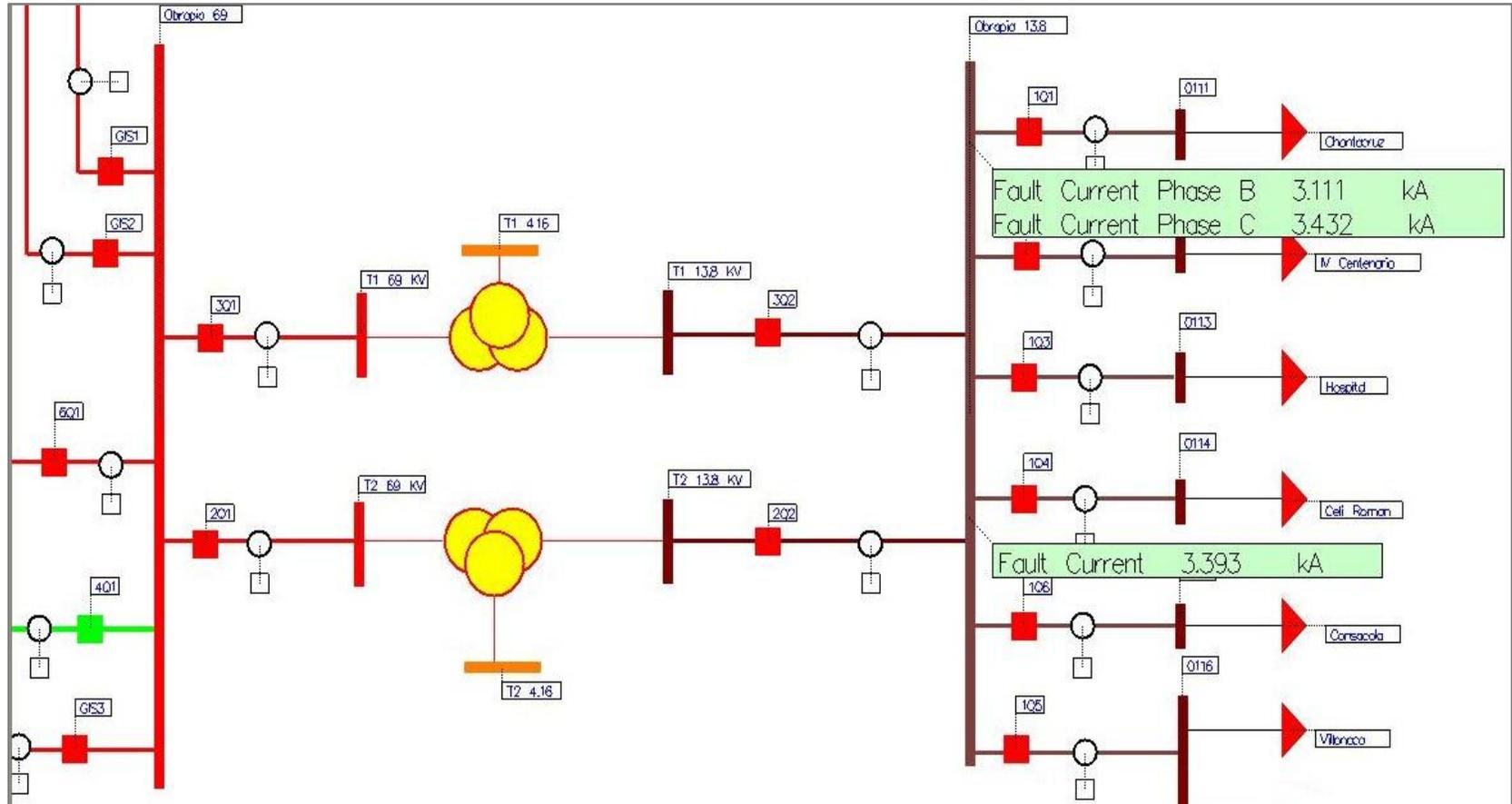


Figura 35. Simulación de la corriente de falla con máxima generación en el programa SPARD POWER 1. (Fuente: Autor).

### 2.5.2 Cálculo del Factor de Decremento, $D_f$ <sup>22</sup>

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

La norma IEEE Std. 80-2000 enuncia que debido a que los cortocircuitos suceden en forma aleatoria con respecto a la onda de tensión y como el contacto puede existir en el momento en el que se inicia la falla, se hace necesario suponer una onda de corriente de falla a tierra asimétrica desplazada 100% durante el tiempo del choque eléctrico. Como los datos experimentales para fijar el comienzo de fibrilación están basados en corrientes senoidales simétricas de amplitud constante, es necesario determinar la magnitud efectiva  $I_F$  de una corriente senoidal equivalente a la onda de falla asimétrica. El valor de  $I_F$  se determina por la siguiente expresión:

$$I_F = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} = D_f I_f [29]$$

El factor de decremento está determinado por:

$$D_f = \frac{1}{I_f} \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} [30]$$

Dónde:

$I_f$  = Es el valor rms de la corriente simétrica de falla a tierra [A]

$t_f$  = Duración de la falla dada [seg]

$I_F$  = Es la corriente de falla asimétrica [A]

$D_f$  = Es el factor de decremento

---

<sup>22</sup>Tomado de la IEEE Std. 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Grounding", IEEE, 2000, p. 83-85.

Al aplicar la ecuación [30], resultan para el factor de decremento  $D_f$  los valores que a continuación se indican:

<b>Tabla 2. 6. Factores de Decremento</b>	
<b>DURACIÓN DE LA FALLA Y DEL CHOQUE ELÉCTRICO <math>t_f</math> [seg]</b>	<b>FACTOR DE DECREMENTO <math>D_f</math></b>
0,08	1,65
0,10	1,25
0,20	1,20
0,25	1,10
0,5 o más	1,00

**Fuente: RAÚLL José, Diseño de Subestaciones Eléctricas, 1987.**

Para el valor de duración de la falla  $t_f$ , se considera un tiempo de apertura de la protección de 50ms (valor concedido por el departamento de Subestaciones de la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A), más un tiempo de demora de actuación de la misma de 8 ciclos (133,4ms), dando un total de

$$t_f = 0,1834 \text{ seg}$$

Por lo tanto, tomado la interpolación lineal respectiva de los valores de la Tabla 2.5., el factor de decremento es:

$$D_f = 1,21$$

### 2.5.3 Cálculo del Factor de División de la Corriente de Falla $S_f$ <sup>23</sup>

Este factor representa la parte de la corriente de falla que fluye entre la malla de tierra y sus alrededores.

<sup>23</sup> RAÚLL MARTÍN, José, *Diseño de Subestaciones Eléctricas*, Primera Edición, Editorial McGraw-Hill, México, 1987, p. 220-221.

La proporción de la corriente que se deriva por los cables de guarda es función de su impedancia, de la resistencia de puesta a tierra de las torres, del vano medio entre las torres, de la distancia cable de guarda-conductor de fase, de la presencia o no de otros cables de guarda y de la resistencia de puesta a tierra de la subestación.

Se propone una metodología aproximada que permite estimar la magnitud de dicha corriente, considerando una impedancia equivalente vista desde la malla de tierra de la subestación. El procedimiento a seguir es el siguiente:

**Resistencia equivalente de los hilos de guarda:** El número de líneas de transmisión que llegan a la Subestación Obrapía son cinco, de las cuales solo 4 líneas poseen hilo de guarda. El hilo de guarda es de acero de diámetro 5/16” y su impedancia es  $Z_1 = 3,19 \Omega/km$ <sup>24</sup>. La impedancia equivalente de hilos de guarda-torres, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Z = \sqrt{Z_1 R_2} [31]$$

Dónde:

$Z$  = Es la impedancia equivalente de hilos de guarda-torres [ $\Omega$ ]

$Z_1$  = Es la impedancia propia del hilo de guarda [ $\Omega/km$ ]

$$R_2 = \frac{R_{torre}}{\text{valor promedio de torres}} [\Omega]$$

Para el cálculo necesario, se consideró que la resistencia aproximada de las estructuras de las líneas de transmisión,  $R_{torre}$  no deben ser mayor a 20  $\Omega$ , valor máximo de resistencia de puesta a tierra adoptado por las normas NTC 2050 e IEC 60364-4-442.<sup>25</sup> El valor de torres por km de hilo de guarda, se calculo promediando con

---

<sup>24</sup> Tomado de EMCOCABLES, “Catálogo Eléctrico y de telecomunicaciones”, [www.emcocables.com](http://www.emcocables.com)

<sup>25</sup> Tomado de la norma RA6-015, “Medida de la resistencia de Puesta a Tierra”, 2005.

el total de estructuras que existen en los diferentes tramos de la línea de transmisión y la longitud total de la misma. Los resultados se presentan a continuación:

<b>LINEA DE TRANSMISIÓN</b>	<b>Resistencia aproximada de la torre <math>R_{torre} [\Omega]</math></b>	<b>Longitud de la línea [km]</b>	<b>Total de torres en la línea de transmisión [#]</b>	<b>Valor promedio de torres por km de hilo de guarda [torres/km]</b>
OBRAPIA-SUR	20	5,0496	28	6
OBRAPIA-SAN CAYETANO	20	2,186	29	13
OBRAPIA-CATAMAYO	20	18,063	69	4
OBRAPIA-LOJA	20	0,796	5	5

**Fuente: Autor**

Aplicando la ecuación [31], las impedancias equivalentes hilo de guarda-torres de las diferentes líneas de transmisión se resumen en la siguiente tabla:

<b>LINEA DE TRANSMISIÓN</b>	<b>Impedancia equivalente hilo de guarda-torres <math>Z [\Omega]</math></b>
OBRAPIA-SUR	2,824
OBRAPIA-SAN CAYETANO	1,918
OBRAPIA-CATAMAYO	3,458
OBRAPIA-LOJA	3,093

**Fuente: Autor**

La impedancia total equivalente resulta del cálculo en paralelo de todos los hilos de guarda, dando como resultado:

$$Z_{eq} = 0,775 \Omega$$

**Cálculo del factor de división de la corriente de falla:** este factor se calculará utilizando la siguiente ecuación:

$$S_f = \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R} [32]$$

Dónde:

$Z_{eq}$  = Es la impedancia equivalente en paralelo de los hilos de guarda-torres [ $\Omega$ ]

$R$  = Es la resistencia de puesta a tierra de la malla [ $\Omega$ ]

El valor del factor de división de la corriente de falla expresado en porcentaje es:

$$S_f = 77,23\%$$

#### 2.5.4 Cálculo de la Corriente Máxima de Malla, $I_G$ <sup>26</sup>

Por el procedimiento y las definiciones que se trataron en el capítulo 1, referente al cálculo de la corriente máxima de malla, ésta se determina por la combinación de la ecuación [2] y la ecuación [3]. La ecuación final está dada por:

$$I_G = D_f \cdot I_g = D_f \cdot S_f \cdot I_f [33]$$

Dirigiéndonos a los cálculos anteriormente realizados, para  $D_f = 1,21$  y para  $S_f = 77,23\%$ , la corriente máxima de malla,  $I_G$  es igual a:

$$I_G = 3207 A$$

#### 2.5.5 Cálculo de las Tensiones Admisibles de Paso y de Contacto

---

<sup>26</sup>Tomado de la *IEEE Std. 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Grounding"*, IEEE, 2000, p. 83-85.

Para el cálculo de las tensiones admisibles de paso y de contacto se consideraron los siguientes datos:

Resistividad superficial del terreno	$\rho_s = 2500 \Omega \cdot m$	(Valor tomado de la Tabla 2.9., grava pobremente clasificada)
Resistividad promedio del terreno	$\rho = 42 \Omega \cdot m$	(Valor resultado de la Tabla 2.4.)
Tiempo de despeje de la falla	$t_s = 0,1834 \text{ seg}$	(Valor igual al tiempo de duración de la falla, $t_f$ )
Altura de la capa superficial del terreno (grava)	$h_s = 0,05 \text{ m}$	

<b>Descripción del terreno</b>	<b>Resistividad Promedio [ohm-cm]</b>
Grava bien clasificada, grava y arena mezcladas, poco o nadafinos	60 000-100 000
Grava pobrementeclasificada, grava y arena mezcladas, poco o nadafinos	100 000-250 000
Grava arcillosa, grava pobremente clasificada, arcilla y arena mezclada	20 000-40 000
Arena con sedimentos, arena y sedimento mezclada	10 000-50 000
Arena arcillosa, mezcla de arena y arcilla pobremente clasificada	5000-20 000
Sedimentos o arcilla con arena fina y ligera plasticidad	3000-8000
Arena fina o suelos sedimentados, sedimentos elásticos	8000-30 000
Arcillas arenosas, arcilla con sedimentos	2500-6000
Arcillas inorgánicas de gran plasticidad	1000-5500

**Fuente: Norma IEEE Std.142-1991**

Se considera que el acceso a la subestación no es accesible a todo público, por ende se utiliza las ecuaciones [6], [8] y [9], realizadas para un peso corporal de 70 kg, de la siguiente manera:

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Factor de decremento de la capa superficial	$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09}$
Tensión de paso permisible, para un peso corporal de 70kg	$E_{paso70kg} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}}$
Tensión de contacto permisible, para un peso corporal de 70kg	$E_{toque70kg} = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}}$

A continuación, se resumen los siguientes resultados:

<b>Tabla 2. 10. Valores de las Tensiones Admisibles de Paso y de Contacto</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Tensión de paso</b>	$E_{paso70kg}$	3304,63	V
<b>Tensión de contacto</b>	$E_{toque70kg}$	1101,11	V

**Fuente: Autor**

### 2.5.6 Cálculo de las Tensiones Reales de Paso y de Contacto

Dentro de la clausula 16.2., de la norma en estudio, referente a parámetros críticos, determina que el área del sistema de aterrizaje, el espaciamiento del conductor y la profundidad de la malla son los factores que tienen mayor incidencia en la tensión de contacto.

La malla de puesta a tierra de la Subestación Obrapía, presenta espaciamientos desiguales, por lo tanto, el estudio de la tensión de contacto máxima se verificó sobre

toda la malla entera, tomando como espaciamento la distancia de  $D = 19,8 \text{ m}$  (se obtuvo con éste espaciamento la máxima tensión de contacto que se indicará más adelante).

Para el cálculo de las tensiones reales, tanto de paso como de contacto, se necesitaron los siguientes datos:

Resistividad promedio del terreno	$\rho =$	$42 \Omega \cdot m$
Espaciamento promedio entre conductores	$D =$	$19,8m$
Profundidad de la malla	$h =$	$0,5 \text{ m}$
Diámetro del conductor de la malla (# 1/0 AWG)	$d =$	$9,35 \text{ mm}$
Longitud total del conductor en una malla	$L_C =$	$1571 \text{ m}$
Longitud total de todas las varillas de aterrizaje	$L_R =$	$0 \text{ m}$
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso	$L_S =$	$1178,3 \text{ m}$
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de contacto	$L_M =$	$1571 \text{ m}$
Máxima corriente de falla	$I_G =$	$3099 \text{ A}$

La longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso,  $L_S$  se obtuvo mediante la ecuación [11] y mientras que la longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de contacto,  $L_M$  se obtuvo mediante la ecuación [13], ambas indicadas en el capítulo 1. Las ecuaciones son las siguientes:

Denominación	Ecuación
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso	$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R$
Longitud efectiva del conductor de la malla sin varillas para tensión de contacto	$L_M = L_C + L_R$

Utilizando desde la ecuación [15] hasta la ecuación [20], revisadas en el apartado 1.5.4.3 del capítulo 1 referente a la determinación de los factores y mencionadas a continuación:

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Factor de espaciamiento para la tensión de paso	$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right]$
Factor de corrección para la geometría de la malla	$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$
Factor de espaciamiento para la tensión de contacto	$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$
Factor de ponderación correctivo	$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{2/n}}$
Factor de ponderación correctivo	$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o} h_o} = 1m$
El número efectivo de conductores paralelos en una malla dada	$n = n_a + n_b + n_c + n_d$ $n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_P}, n_b = 1, n_c = 1, n_d = 1$

Se resumen los siguientes resultados obtenidos:

<b>Tabla 2. 11. Valores de los Factores <math>K_s</math>, <math>K_i</math>, <math>K_m</math> y <math>n</math></b>		
<b>Denominación</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>
Número efectivo de conductores paralelos a la malla	$n$	<b>8,54</b>
Factor de ponderación correctivo	$K_{ii}$	<b>0,514</b>
Factor de ponderación correctivo	$K_h$	<b>1,225</b>
Factor de espaciamiento para tensión de contacto	$K_m$	<b>1,248</b>
Factor de espaciamiento para tensión de paso	$K_s$	<b>0,350</b>
Factor correctivo por geometría de la malla	$K_i$	<b>1,908</b>

**Fuente: Autor**

Con ayuda de los resultados presentados en la Tabla 2.11., y de las ecuaciones [10] y [12] expuestas en el capítulo 1, las cuales se enuncian a continuación:

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Tensión real de paso	$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s}$
Tensión real de contacto	$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$

Se determinó los valores de tensión de paso y de contacto reales. La Tabla 2.10., ilustra los resultados obtenidos:

<b>Denominación</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Tensión de paso</b>	$E_s$	76,31	V
<b>Tensión de contacto</b>	$E_m$	204,15	V

**Fuente: Autor**

## 2.6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La evaluación y análisis de los parámetros, tales como resistencia de puesta a tierra, tensiones de contacto y de paso, y resistividad específica del terreno, son suficientes como para conocer la efectividad de la malla de tierra, desde el punto de vista de referencia y protección de los equipos instalados en la subestación, así como desde el punto de vista de seguridad al personal que labora en la instalación.

A continuación se establece una tabla de verificación de la malla de puesta a tierra de la Subestación.

<b>Parámetro de la malla</b>	<b>Malla actual</b>	<b>Cumple IEEE Std. 80-2000</b>	<b>Observaciones</b>
Conductor de la malla	Cobre duro trenzado calibre AWG 1/0	No cumple con los requerimientos de la norma	La norma establece como conductor mínimo calibre AWG 4/0
Resistencia de puesta a tierra	0,231Ω	Cumple, se puede considerar valor convalidado	Valor menor a 1 Ω requerido por norma
Resistividad	42 Ω · m		El valor obtenido es un aproximado
Voltaje de paso y de contacto máximo permisible	Cálculo $V_{\text{paso}} = 3304,63 \text{ V}$ $V_{\text{contacto}} = 1101,11 \text{ V}$	Cumple con la norma, las tensiones de seguridad; $V_{\text{paso}} = 76,31 \text{ V}$ $V_{\text{contacto}} = 204,15 \text{ V}$	Las tensiones de seguridad son menores que los cálculos realizados

**Fuente: Autor**

Luego de realizar la evaluación y diagnóstico del Sistema de Puesta a Tierra de la Subestación Obrapía, se tiene las siguientes conclusiones:

- a. Se determinaron los parámetros actualizados del Sistema de Puesta a Tierra de la subestación, tales como: resistividad del terreno, resistencia de la malla de tierra, cálculo de la tensión de contacto y de paso, y actualización de planos de construcción de la malla de tierra.
- b. La inspección visual indica en forma general que los conductores de protección y de servicio son los adecuados, mientras que las conexiones exteriores se encuentra en un estado deteriorado, con óxido, no permitiendo así un buen contacto con las estructuras.

- c. Las tensiones de contacto y de paso obtenidas, son menores que los máximos permisibles, por lo cual el sistema se encuentra en un buen estado de seguridad para las personas que se encuentren en el patio de la subestación según la norma IEEE Std. 80-2000.
  
- d. El Sistema de Puesta a Tierra, se encuentra en buen estado y en condiciones operativas, siendo la primera vez que se realiza una evaluación del sistema de aterramiento.

### CAPITULO III

#### ALTERNATIVA DE DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA EN BASE A LA NORMA IEEE STD. 80-2000<sup>26</sup>

##### 2.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo 16 de la norma IEEE Std 80-2000 referente a “diseño de sistemas de tierra”, establece dos criterios principales para el diseño del sistema de puesta a tierra en una subestación tanto, en condiciones de operación normal como en condición de falla. Los objetivos para el diseño de la puesta a tierra son:

- a. Proporcionar un medio para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder ningún límite en el equipo y su operación.
- b. Asegurar que una persona cercana a una instalación eléctrica no se exponga al peligro de un choque eléctrico.
- c. Establecer límites de seguridad bajo condiciones de falla en la estación eléctrica.

Bajo este criterio la norma aborda cálculos de parámetros críticos como son: máxima corriente de malla, tiempo de despeje de falla, resistividad del suelo y geometría de la malla. El diseñador de sistemas de puesta a tierra para centrales de generación, líneas de transmisión de alta y extra alta tensión y subestaciones, deberá comprobar mediante el empleo de un procedimiento de cálculo, reconocido por la práctica de la ingeniería actual, que los valores máximos de las tensiones de paso y de contacto a los que puedan estar sometidos los seres humanos, no superen los niveles de soportabilidad.

---

<sup>26</sup>Tomado de la IEEE Std. 80-2000, “Guide for Safety in AC Substation Grounding”, IEEE, 2000, p. 129-144.

## **2.2. CONSIDERACIONES PRINCIPALES DE DISEÑO**

Al momento de realizar un diseño para un sistema de puesta a tierra se debe tener en cuenta las siguientes variables: terreno, corriente, electrodos, geometría, etc., todas estas variables necesarias para realizar el cálculo de la malla por formulas matemáticas con la finalidad de no alcanzar los valores de tensión en una descarga y de corriente superiores a los valores permitidos.

Cuando se habla de calcular la malla de puesta a tierra, se refiere a calcular el valor de resistencia a tierra mínimo posible para reducir costos por falla de equipos o accidentes.

Los datos necesarios para calcular la malla de tierra, son:

- Corriente de falla a tierra.
- Tiempo en que intervienen las protecciones.
- Los valores máximos permisibles de tensión de contacto y de paso.
- Valor de la resistividad del terreno, donde va ir colocada la malla de puesta a tierra.
- Perímetro externo del área de instalación.
- El área de la instalación.

Una vez obtenidos estos valores se procederá a realizar el diseño correspondiente, de ser necesario se tomarán en cuenta las tomas de puesta a tierra existentes que estén habilitadas y que, su valor de resistencia a tierra este dentro del rango de protección.

### 2.3. DISEÑO DE LA MALLA DE TIERRA

Por ser una norma de amplia difusión, se va a tomar en cuenta los siguientes pasos esenciales para diseñar una puesta a tierra según esta metodología. Los pasos a seguir son los siguientes:

#### 2.3.1. Paso 1: Área de Estudio

Se debe tener el mapa apropiado y el plano general de la localización de la subestación para tener un buen estimado del área a ser aterrizada. El estudio de la resistividad del terreno, determinará el perfil de la resistividad y el modelo del terreno necesario (suelo uniforme o de dos capas).

#### 2.3.2. Paso 2: Conductor

Para determinar la sección transversal del conductor de puesta a tierra, la corriente de falla debe ser la máxima corriente futura de falla esperada que puede ser conducida por cualquier conductor del sistema de tierra (falla fase-tierra o falla fase-fase-tierra), y el tiempo  $t_f$ , debe ser el tiempo máximo de despeje de la falla.

Conocidas el coeficiente de resistividad y las constantes características de cada material (ver Tabla 3.1.), se aplican las siguientes ecuaciones que se derivan del Método de Sverak:

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_f \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \ln \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}}} [34]$$

$$A_{kcmil} = \frac{197,4 \cdot I}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_f \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \ln \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}}} [35]$$

Dónde:

$A$  = Es la sección transversal del conductor [ $mm^2$  o  $kcmil$ ]

$I$  = Es la corriente rms de falla a tierra [ $kA$ ]

$T_m$  = Es la temperatura máxima permisible de fundición [ $^{\circ}C$ ]

$T_a$  = Es la temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]

$\alpha_r$  = Es el coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia [ $1/^{\circ}C$ ]

$\rho_r$  = Es la resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia [ $\mu ohm \cdot cm$ ]

$t_f$  = Es el tiempo de duración de la corriente [ $seg.$ ]

$TCAP$  = Es el factor de capacidad térmica por unidad de volumen [ $J/(^{\circ}C \cdot cm^3)$ ]

$$K_o = 1/\alpha_r [^{\circ}C]$$

### 2.3.3. Paso 3: Tensiones Admisibles

Las tensiones admisibles definidas por la IEEE Std. 80-2000 se dan para distintos pesos corporales (50 y 70 kg) de la persona sometida a peligro, aplicándose distintas fórmulas. Los valores de tensión de paso y de contacto admisible se determinarán para una persona con peso corporal de 70 kg, para lo cual se utiliza la ecuación [5] y la ecuación [7]. Además su coeficiente  $C_s$ , se calcula con la ecuación [9].

### 2.3.4. Paso 4: Diseño Básico

El diseño preliminar debe incluir una malla de tierra, la cual este formada por conductores que permitan el acceso a los conductores de puesta a tierra de los equipos y estructuras.

La separación inicial estimada de los conductores de la malla de tierra, así como la ubicación de los electrodos verticales (varillas de tierra), deben tener como base la corriente  $I_G$  y el área de la subestación que será puesta a tierra. En un sistema de puesta a tierra de una subestación, el espaciamiento típico entre conductores de la malla de tierra puede estar entre 3 y 15m.

### **2.3.5. Paso 5: Resistencia de la Malla**

El valor preliminar estimado de la resistencia de puesta a tierra en terreno uniforme, se determinará por la ecuación [28].

### **2.3.6. Paso 6: Corriente Máxima de Malla**

La corriente máxima de malla,  $I_G$ , que puede circular en una malla de tierra en casos de falla, se determina con la ecuación [33]. Para evitar sobredimensionamiento del sistema de tierra, se utiliza únicamente la porción de la corriente de falla que fluye a través de la malla de tierra hacia el terreno adyacente.

### **2.3.7. Paso 7: Elevación del Potencial de Tierra**

Determinación de la elevación del potencial de tierra (GPR), mediante la siguiente ecuación:

$$GPR = I_G \cdot R_g [36]$$

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

### **2.3.8. Paso 8: Tensiones de Paso y de Contacto Reales**

Calcular las tensiones de paso y de contacto para la malla diseñada. Éstas podrán ser determinadas por la ecuación [10] y la ecuación [12], respectivamente.

### **2.3.9. Paso 9 y Paso 10: Control de Seguridad**

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

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

### **2.3.10. Paso 11 y Paso 12: Acciones de Mejora**

De lo contrario, si se exceden los límites admisibles de las tensiones de paso o de contacto, se requerirá de una revisión del diseño de la malla. Ésta revisión debe incluir pequeños espaciamientos entre conductores, electrodos de aterrizaje adicionales, conectar hilos de guarda en las líneas de transmisión, incrementar el área ocupada por la malla, etc. Después de satisfacer los requerimientos de las tensiones de paso y de contacto, se pueden requerir conductores adicionales de puesta a tierra para los equipos y algunos electrodos verticales (varillas para tierra).

Los conductores adicionales a la malla de tierra se agregan cuando el diseño de la malla de tierra no incluye conductores cercanos al equipo que será puesto a tierra. Los electrodos verticales (varillas para tierra) adicionales pueden colocarse en la base de los pararrayos, neutro de los transformadores y otros equipos principales.

<b>Tabla 3. 1. Constantes de Materiales</b>						
<b>Descripción</b>	<b>Conductividad del material (%)</b>	<b>Factor <math>\alpha_r</math> a 20°C [1/°C]</b>	<b><math>K_o</math> [°C]</b>	<b>Temperatura de Fusión <math>T_m</math> [°C]</b>	<b><math>\rho_r</math> a 20°C [<math>\mu\text{cm} \cdot \text{cm}</math>]</b>	<b>Capacidad Térmica TCAP [<math>\text{J}/\text{°C} \cdot \text{cm}^3</math>]</b>
Cobre destemplado trenzado suave	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42
Cobre comercial trenzado duro	97	0,00381	242	1084	1,78	3,42
Alambre de acero con revestimiento de cobre	40	0,00378	245	1084	4,40	3,85
Alambre de acero con revestimiento de cobre	30	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Varilla de acero con revestimiento de cobre	20	0,0078	245	1084	8,62	3,85
Aluminio de grado EC	61	0,00403	228	657	2,86	2,56
Aleación de aluminio 5005	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,60
Aleación de aluminio 6201	52,5	0,00347	268	654	3,28	2,60
Alambre de acero con revestimiento de aluminio	20,3	0,00360	258	657	8,48	3,58
Acero 1020	10,8	0,00160	605	1510	15,90	3,28
Varilla de acero con revestimiento inoxidable	9,8	0,00160	605	1400	17,50	4,44
Varilla de acero con capa de zinc	8,6	0,0032	293	419	20,10	3,93
Acero inoxidable 304	2,4	0,0013	749	1400	72,00	4,03

**Fuente: Norma IEEE Std. 80-2000.**

## 2.4. DISEÑO ALTERNATIVO DE LA MALLA DE PUESTA TIERRA EN LA SUBESTACIÓN OBRAPÍA

A continuación se realizará el diseño alternativo del sistema de puesta a tierra de la Subestación Obrapía con el procedimiento citado anteriormente; para el cual se tomo en consideración la existencia de las estructuras o soportes metálicos presentes en los pórticos de 69kV y 13,8kV, lo cual si se desease construir la malla de tierra, no se necesitaría levantar ninguna estructura metálica.

Para el cálculo de la malla de puesta a tierra de la Subestación Obrapíase necesitan los siguientes datos:

Tiempo máximo de falla	$t_f =$	0,1834 <i>seg</i>
Corriente máxima de falla a tierra (línea-línea-tierra)	$I_f =$	3432 <i>A</i>
Factor de división de corriente [calculado en sección 2.5.3]	$s_f =$	0,7723
Factor de decremento [calculado en sección 2.5.2]	$D_f =$	1,21
Resistividad media del terreno	$\rho =$	42 $\Omega \cdot m$
Resistividad de grava	$\rho_s =$	2500 $\Omega \cdot m$
Espesor de la superficie de grava	$h_s =$	0,1 <i>m</i>
Profundidad de la malla de tierra	$h =$	0,5 <i>m</i>

La resistividad de la grava se asume conservativa basándose en las mediciones experimentales de los ejemplos típicos de rocas. En el Anexo A se encuentran los planos de los diseños alternativos para la malla de puesta a tierra de la Subestación Obrapía.

### 2.4.1. Malla de tierra rectangular sin varillas

#### 1. Paso 1: Área de Estudio

El área donde se ubica la subestación, es una zona en la que se encuentran pocas colinas a su alrededor. La malla de tierra correspondiente debe estar comprendida dentro del terreno disponible y se diseñara debajo de los soportes metálicos (sobre la subestación).

Las dimensiones que se consideraron para la malla de tierra son: largo = 80 m; ancho = 50m; área = 4000 m<sup>2</sup>.

La resistividad del terreno promedio, es la calculada en el apartado 2.4.2 y es de  $\rho = 42 \Omega \cdot m$ . La buena capa superficial es garantía para la seguridad de las personas; se puede dejar una capa de grava.

#### 2. Paso 2: Conductor

Para calcular el calibre del conductor es necesario conocer el valor de la corriente máxima de falla a tierra,  $I_f = 3432 A$ .

Para una duración de falla de 0,1834 seg., el factor de decremento  $D_f$  es aproximadamente 1,21 y así la corriente asimétrica de falla es  $I_F = I_f \cdot D_f = 4153 A$ . Esta magnitud de corriente se utilizará para determinar el mínimo diámetro de los conductores de puesta a tierra.

Se usará alambre de cobre comercial trenzado duro, con sus respectivas características del material, según Tabla 3.1., una temperatura ambiente de 18°C y una temperatura máxima de fundición de 450°C (para conexión exotérmica). La sección del conductor a utilizar se determina con la ecuación [38], entonces:

$$A_{mm^2} = \frac{4,153kA}{\sqrt{\frac{3,42 \frac{J}{C \cdot cm^3} (10^{-4})}{0,1834seg \left(0,00381 \frac{1}{C}\right) (1,78 \mu\Omega \cdot cm)} \ln \frac{242+450^{\circ}C}{242+18^{\circ}C}}} = 8 mm^2$$

Basándose en estos cálculos, se puede utilizar un alambre de cobre tan pequeño como el # 8 AWG (según la tabla del Anexo F), pero debido a la fuerza mecánica y a los requisitos de dureza, un conductor trenzado # 4/0 AWG con diámetro  $d = 13,3 mm$  se establece como mínimo por la norma IEEE Std. 80-2000.

### 3. Paso 3: Tensiones Admisibles

La norma IEEE Std. 80-2000 determina las tensiones admisibles de paso y de contacto considerando influencia de la resistividad de la capa superficial del terreno, que incrementa las condiciones de seguridad. Debido a esto se realizará dos diseños, el uno colocando grava sobre el terreno donde se ubique la malla y el otro sin la capa superficial de grava.

#### - *Diseño de la malla sin capa superficial de grava*

Si no se tiene prevista una capa superficial de grava, entonces  $\rho_s = \rho = 42 \Omega \cdot m$  y la constante  $C_s = 1$ . Para una persona de peso corporal de 70 kg se utiliza las ecuaciones [5] y [7]. Tenemos:

$$E_{paso70kg} = 458,99 V$$

$$E_{contacto70kg} = 389,70 V$$

#### - *Diseño de la malla con capa superficial de grava*

Para una capa superficial de grava de 0,1 m, con resistividad de  $2500 \Omega \cdot m$  y para una resistividad del terreno de  $42 \Omega \cdot m$ , las tensiones que se obtienen son:

$$E_{paso70kg} = 4187,76 V$$

$$E_{contacto70kg} = 1321,89 V$$

Los valores calculados de tensión de paso y de contacto admisibles, muestran la importancia de la capa superficial de material de alta resistividad, que contribuye a una mayor seguridad de la persona expuesta a estas tensiones.

#### 4. Paso 4: Diseño Básico

Para una malla sin varillas de tierra, la longitud total del conductor horizontal se calcula con la ecuación [13] y su valor es  $L_M = 930 m$ .

Además se supuso una instalación preliminar de una malla de tierra de  $A = 80 m$  x  $50 m$  con los conductores separados a un mismo espaciamiento ( $D = 9,9m$ ), como se muestra en la Figura 36. La profundidad de la malla es  $h = 0,5 m$ .

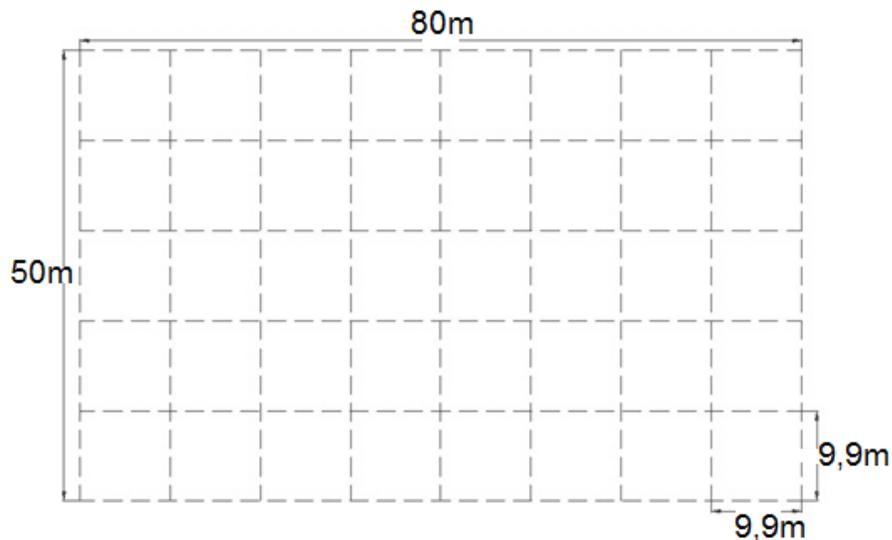


Figura 36. Malla rectangular sin varillas de tierra (Fuente: Autor).

### 5. Paso 5: Resistencia de la Malla

Para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra  $R_g$ , se utiliza la ecuación [28], con una  $L_T = 930 \text{ m}$  y un área de la malla de  $A = 4000 \text{ m}^2$ , la resistencia es:

$$R_g = 0,337 \Omega$$

### 6. Paso 6: Corriente Máxima de Malla

Por el procedimiento y las definiciones que se trataron con anterioridad en el apartado 2.5.4 referente al cálculo de la corriente máxima de malla; su valor es:

$$I_G = 3207 \text{ A}$$

### 7. Paso 7: Elevación del Potencial de Tierra (GPR)

Es necesario comparar el producto de  $I_G$  y  $R_g$  para la tensión de contacto admisible. Mediante la ecuación [36] se obtiene el siguiente resultado:

$$GPR = 1081,05 \text{ V}$$

Para una persona de 70 kg tenemos que el  $E_{\text{contacto}70\text{kg}} = 1321,89 \text{ V}$  si se coloca una capa de grava sobre la superficie de la malla, entonces:

$$1081,05 \text{ V} < 1321,89 \text{ V}$$

Para una persona de 70 kg tenemos que el  $E_{\text{contacto}70\text{kg}} = 389,70 \text{ V}$  si se coloca tierra sobre la superficie de la malla, entonces:

$$1081,05 V > 389,70 V$$

Por lo tanto, si  $GPR > E_{\text{contacto}70kg}$  entonces deben calcularse las tensiones de paso y de contacto reales en caso de falla.

Si el valor de la máxima elevación del potencial de tierra (GPR) en el diseño preliminar está por debajo de la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, ya no es necesario análisis alguno, por lo tanto, para el caso de colocar grava sobre la superficie de la malla, no es necesario calcular los valores de tensión de paso y de contacto reales; mientras que para el caso de tierra sobre la superficie de la malla si es necesario calcular las tensiones de paso y de contacto reales, debido a que el GPR es mayor a la tensión de contacto permisible. Para conocer cuáles son los valores de tensión de paso y de contacto reales en ambos casos, se procederá al siguiente paso.

### 8. Paso 8: Tensiones de Paso y de Contacto Reales

Para el cálculo de las tensiones reales, tanto de paso como de contacto, se necesitaron los siguientes datos:

Resistividad promedio del terreno	$\rho =$	$42 \Omega \cdot m$
Espaciamiento promedio entre conductores	$D =$	$9,9m$
Profundidad de la malla	$h =$	$0,5 m$
Diámetro del conductor de la malla (# 4/0 AWG)	$d =$	$13,3mm$
Longitud total del conductor en una malla	$L_C =$	$930m$
Longitud total de todas las varillas de aterrizaje	$L_R =$	$0 m$
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso	$L_S =$	$697,5m$
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de contacto	$L_M =$	$930m$
Máxima corriente de falla	$I_G =$	$3207A$

La longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso,  $L_S$  se obtuvo mediante la ecuación [11] y mientras que la longitud efectiva del conductor de la malla sin varillas para tensión de contacto,  $L_M$  se obtuvo mediante la ecuación [13], ambas indicadas en el capítulo 1. Las ecuaciones son las siguientes:

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso	$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R$
Longitud efectiva del conductor de la malla sin varillas para tensión de contacto	$L_M = L_C + L_R$

Utilizando desde la ecuación [15] hasta la ecuación [20], revisadas en el capítulo 1 referente a la determinación de los factores y mencionadas a continuación, se obtienen los resultados descritos en la Tabla 3.2.

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Factor de espaciamiento para la tensión de paso	$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right]$
Factor de corrección para la geometría de la malla	$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$
Factor de espaciamiento para la tensión de contacto	$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$
Factor de ponderación correctivo	$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{2/n}}$
Factor de ponderación correctivo	$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} h_o = 1m$

El número efectivo de conductores paralelos en una malla dada

$$n = n_a + n_b + n_c + n_d; n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_P}, n_b = 1, n_c = 1, n_d = 1$$

<b>Tabla 3. 2. Valores de los Factores <math>K_s</math>, <math>K_i</math>, <math>K_m</math> y <math>n</math> de la malla sin varillas</b>		
<b>Denominación</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>
Número efectivo de conductores paralelos a la malla	$n$	<b>7,25</b>
Factor de ponderación correctivo	$K_{ii}$	<b>0,478</b>
Factor de ponderación correctivo	$K_h$	<b>1,225</b>
Factor de espaciamento para tensión de contacto	$K_m$	<b>1,00</b>
Factor de espaciamento para tensión de paso	$K_s$	<b>0,380</b>
Factor correctivo por geometría de la malla	$K_i$	<b>1,717</b>

**Fuente: Autor**

Con ayuda de los resultados presentados en la Tabla 3.2., y de las ecuaciones [10] y [12] expuestas en el capítulo 1, las cuales se enuncian a continuación:

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Tensión real de paso	$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s}$
Tensión real de contacto	$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$

Se determinó los valores de tensión de paso y de contacto reales. La Tabla 3.3., ilustra los resultados obtenidos:

<b>Tabla 3. 3. Valores de las Tensiones Reales de Paso y de Contacto de la malla sin varillas</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Tensión de paso</b>	$E_s$	126,10	V
<b>Tensión de contacto</b>	$E_m$	248,63	V

**Fuente: Autor**

- *Análisis de la tensión de contacto en caso de falla*

Si  $E_m > E_{contacto70kg}$ , se debe cambiar la configuración de la malla; si  $E_m < E_{contacto70kg}$  se puede pasar a calcular la tensión de paso.

Como  $248,63 V < 1321,89 V$  para el caso de usar grava como capa superficial y  $248,63 V < 389,70 V$  para el caso de usar terreno como capa superficial, entonces se procede a calcular la tensión de paso en caso de falla.

- *Análisis de la tensión de paso en caso de falla*

Si  $E_s > E_{paso70kg}$ , se debe cambiar la configuración de la malla; si  $E_s < E_{paso70kg}$  el diseño ha terminado.

Como  $126,10 V < 4187,76 V$  para el caso de usar grava como capa superficial y  $126,10 V < 458,99 V$  para el caso de usar terreno como capa superficial, el diseño se considera factible y seguro.

## **9. Paso 9 y Paso 10: Control de Seguridad**

Si se considera los valores más altos que se han definido de tensiones admisibles de contacto  $1321,89 V$  y de paso  $4187,76 V$ , se observa que el análisis realizado en el paso anterior cumple con las normas de seguridad y por lo tanto el diseño está listo para su implementación.

### **2.4.2. Malla de tierra rectangular con varillas en el perímetro**

Por lo general, la reducción de la corriente de falla a tierra es difícil o muy difícil de lograr.

Para lograr dicho propósito la malla se modifica con el cambio de: espaciamiento de los conductores de la malla, longitud de cable total, la profundidad de la malla, adicionar electrodos de tierra, etc. Se modificará el diseño anterior, incluyendo 26 varillas de tierra, cada una de 2,44 m (8 pies) de largo y 15,88 mm (5/8") de diámetro, alrededor del perímetro de la malla, como se ilustra en la Figura 37.

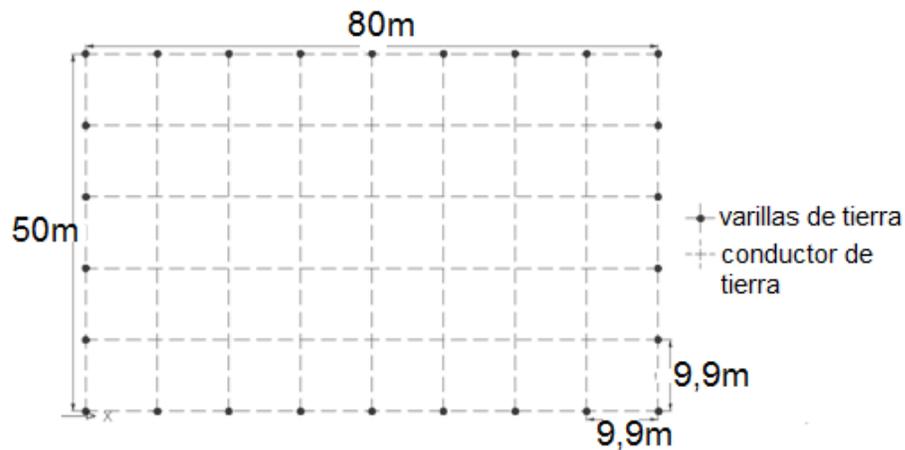


Figura 37. Malla rectangular con varillas de tierra (Fuente: Autor).

### 1. Paso 5: Resistencia de la Malla

Para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra  $R_g$ , se utiliza la ecuación [28], con una  $L_T = 930 + 26(2,44) = 993,44 \text{ m}$  y un área de la malla de  $A = 4000 \text{ m}^2$ , la resistencia es:

$$R_g = 0,334 \Omega$$

### 2. Paso 6: Corriente Máxima de Malla

Por el procedimiento y las definiciones que se trataron con anterioridad en el apartado 2.5.4 referente al cálculo de la corriente máxima de malla; su valor es:

$$I_G = 3207 A$$

### 3. Paso 7: Elevación del Potencial de Tierra (GPR)

Es necesario comparar el producto de  $I_G$  y  $R_g$  para la tensión de contacto admisible. Mediante la ecuación [36] se obtiene el siguiente resultado:

$$GPR = 1071,8 V$$

Para una persona de 70 kg tenemos que el  $E_{contacto70kg} = 1321,89 V$  si se coloca una capa de grava sobre la superficie de la malla, entonces:

$$1071,8 V < 1321,89 V$$

Para una persona de 70 kg tenemos que el  $E_{contacto70kg} = 389,70 V$  si se coloca tierra sobre la superficie de la malla, entonces:

$$1071,8 V > 389,70 V$$

Por lo tanto, si  $GPR > E_{contacto70kg}$  entonces deben calcularse las tensiones de paso y de contacto reales en caso de falla.

Si el valor de la máxima elevación del potencial de tierra (GPR) en el diseño preliminar está por debajo de la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, ya no es necesario análisis alguno, por lo tanto, para el caso de colocar grava sobre la superficie de la malla, no es necesario calcular los valores de tensión de paso y de

contacto reales; mientras que para el caso de tierra sobre la superficie de la malla si es necesario calcular las tensiones de paso y de contacto reales, debido a que el GPR es mayor a la tensión de contacto permisible.

Para conocer cuáles son los valores de tensión de paso y de contacto reales en caso de falla, se procederá al siguiente paso.

#### 4. Paso 8: Tensiones de Paso y de Contacto Reales

Para el cálculo de las tensiones reales, tanto de paso como de contacto, se necesitaron los siguientes datos:

Resistividad promedio del terreno	$\rho =$	42 $\Omega \cdot m$
Espaciamiento promedio entre conductores	$D =$	9,9m
Profundidad de la malla	$h =$	0,5 m
Diámetro del conductor de la malla (# 4/0 AWG)	$d =$	13,3mm
Longitud total del conductor en una malla	$L_C =$	930m
Longitud total de todas las varillas de aterrizaje	$L_R =$	63,44m
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso	$L_S =$	751,424m
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de contacto	$L_M =$	1030,33m
Máxima corriente de falla	$I_G =$	3207A

La longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso,  $L_S$  se obtuvo mediante la ecuación [11] y mientras que la longitud efectiva del conductor de la malla sin varillas para tensión de contacto,  $L_M$  se obtuvo mediante la ecuación [14], ambas indicadas en el capítulo 1. Las ecuaciones son las siguientes:

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso	$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R$
Longitud efectiva del conductor de la malla con varillas para tensión de contacto	$L_M = L_C + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R$

Utilizando desde la ecuación [15] hasta la ecuación [20], revisadas en el capítulo 1 referente a la determinación de los factores y mencionadas a continuación, se obtienen los resultados descritos en la Tabla 3.4.

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Factor de espaciamiento para la tensión de paso	$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right]$
Factor de corrección para la geometría de la malla	$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$
Factor de espaciamiento para la tensión de contacto	$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$
Factor de ponderación correctivo	$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{2/n}}$
Factor de ponderación correctivo	$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o} h_o} = 1m$
El número efectivo de conductores paralelos	$n = n_a + n_b + n_c + n_d$

en una malla dada

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_P}, n_b = 1, n_c = 1, n_d = 1$$

<b>Tabla 3. 4. Valores de los Factores <math>K_s</math>, <math>K_i</math>, <math>K_m</math> y <math>n</math> de la malla con varillas en el perímetro</b>		
<b>Denominación</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>
Número efectivo de conductores paralelos a la malla	$n$	<b>7,25</b>
Factor de ponderación correctivo	$K_{ii}$	<b>1</b>
Factor de ponderación correctivo	$K_h$	<b>1,225</b>
Factor de espaciamento para tensión de contacto	$K_m$	<b>0,886</b>
Factor de espaciamento para tensión de paso	$K_s$	<b>0,380</b>
Factor correctivo por geometría de la malla	$K_i$	<b>1,717</b>

**Fuente: Autor**

Con ayuda de los resultados presentados en la Tabla 3.4., y de las ecuaciones [10] y [12] expuestas en el capítulo 1, las cuales se enuncian a continuación:

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Tensión real de paso	$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s}$
Tensión real de contacto	$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$

Se determinó los valores de tensión de paso y de contacto reales. La Tabla 3.5., ilustra los resultados obtenidos:

<b>Tabla 3. 5. Valores de las Tensiones Reales de Paso y de Contacto de la malla con varillas en el perímetro</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>

<b>Tensión de paso</b>	$E_s$	117,05	V
<b>Tensión de contacto</b>	$E_m$	199,03	V

**Fuente: Autor**

- *Análisis de la tensión de contacto en caso de falla*

Si  $E_m > E_{contacto70kg}$ , se debe cambiar la configuración de la malla; si  $E_m < E_{contacto70kg}$  se puede pasar a calcular la tensión de paso.

Como  $199,03 V < 1321,89 V$  para el caso de usar grava como capa superficial y  $199,03 V < 389,70 V$  para el caso de usar terreno como capa superficial, entonces se procede a calcular la tensión de paso en caso de falla.

- *Análisis de la tensión de paso en caso de falla*

Si  $E_s > E_{paso70kg}$ , se debe cambiar la configuración de la malla; si  $E_s < E_{paso70kg}$  el diseño ha terminado.

Como  $117,05 V < 4187,76 V$  para el caso de usar grava como capa superficial y  $117,05 V < 458,99 V$  para el caso de usar terreno como capa superficial, el diseño se considera factible y seguro.

## **5. Paso 9 y Paso 10: Control de Seguridad**

Si se considera los valores más altos que se han definido de tensiones admisibles de contacto  $1321,89 V$  y de paso  $4187,76 V$ , se observa que el análisis realizado en el paso anterior cumple con las normas de seguridad y por lo tanto el diseño está listo para su implementación.

### 2.4.3. Malla de tierra rectangular con varillas en el perímetro y dentro de la malla

Se modificará el diseño anterior, incluyendo 33 varillas de tierra, cada una de 2,44 m (8 pies) de largo y 15,88 mm (5/8") de diámetro, alrededor del perímetro de la malla y dentro de la malla, como se ilustra en la Figura 38.

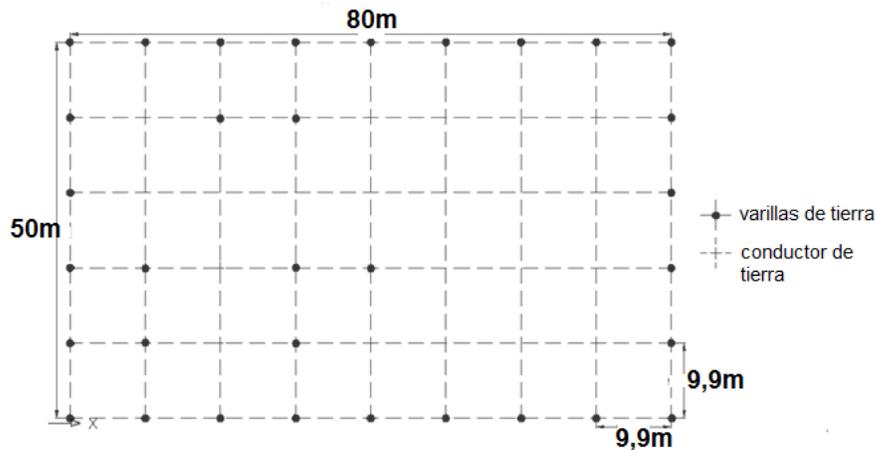


Figura 38. Malla rectangular con varillas de tierra en el perímetro y dentro de la malla (Fuente: Autor).

#### 1. Paso 5: Resistencia de la Malla

Para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra  $R_g$ , se utiliza la ecuación [28], con una  $L_T = 930 + 33(2,44) = 1010,52 m$  y un área de la malla de  $A = 4000 m^2$ , la resistencia es:

$$R_g = 0,333 \Omega$$

## 2. Paso 6: Corriente Máxima de Malla

Por el procedimiento y las definiciones que se trataron con anterioridad en el apartado 2.5.4 referente al cálculo de la corriente máxima de malla; su valor es:

$$I_G = 3207 A$$

## 3. Paso 7: Elevación del Potencial de Tierra (GPR)

Es necesario comparar el producto de  $I_G$  y  $R_g$  para la tensión de contacto admisible. Mediante la ecuación [36] se obtiene el siguiente resultado:

$$GPR = 1069,05 V$$

Para una persona de 70 kg tenemos que el  $E_{contacto70kg} = 1321,89 V$  si se coloca una capa de grava sobre la superficie de la malla, entonces:

$$1069,05 V < 1321,89 V$$

Para una persona de 70 kg tenemos que el  $E_{contacto70kg} = 389,70 V$  si se coloca tierra sobre la superficie de la malla, entonces:

$$1069,05 V > 389,70 V$$

Por lo tanto, si  $GPR > E_{contacto70kg}$  entonces deben calcularse las tensiones de paso y de contacto reales en caso de falla.

Si el valor de la máxima elevación del potencial de tierra (GPR) en el diseño preliminar está por debajo de la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, ya no es necesario análisis alguno, por lo tanto, para el caso de colocar grava sobre la

superficie de la malla, no es necesario calcular los valores de tensión de paso y de contacto reales; mientras que para el caso de tierra sobre la superficie de la malla si es necesario calcular las tensiones de paso y de contacto reales, debido a que el GPR es mayor a la tensión de contacto permisible.

Para conocer cuáles son los valores de tensión de paso y de contacto reales en caso de falla, se procederá al siguiente paso.

#### 4. Paso 8: Tensiones de Paso y de Contacto Reales

Para el cálculo de las tensiones reales, tanto de paso como de contacto, se necesitaron los siguientes datos:

Resistividad promedio del terreno	$\rho =$	42 $\Omega \cdot m$
Espaciamiento promedio entre conductores	$D =$	9,9m
Profundidad de la malla	$h =$	0,5 m
Diámetro del conductor de la malla (# 4/0 AWG)	$d =$	13,3mm
Longitud total del conductor en una malla	$L_C =$	930m
Longitud total de todas las varillas de aterrizaje	$L_R =$	80,52m
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso	$L_S =$	765,942m
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de contacto	$L_M =$	1057,35m
Máxima corriente de falla	$I_G =$	3207A

La longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso,  $L_S$  se obtuvo mediante la ecuación [11] y mientras que la longitud efectiva del conductor de la malla sin varillas para tensión de contacto,  $L_M$  se obtuvo mediante la ecuación [14], ambas indicadas en el capítulo 1. Las ecuaciones son las siguientes:

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Longitud efectiva del conductor de la malla para tensión de paso	$L_s = 0,75 \cdot L_c + 0,85 \cdot L_R$
Longitud efectiva del conductor de la malla con varillas para tensión de contacto	$L_M = L_c + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R$

Utilizando desde la ecuación [15] hasta la ecuación [20], revisadas en el capítulo 1 referente a la determinación de los factores y mencionadas a continuación, se obtienen los resultados descritos en la Tabla 3.6.

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Factor de espaciamento para la tensión de paso	$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right]$
Factor de corrección para la geometría de la malla	$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$
Factor de espaciamento para la tensión de contacto	$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$
Factor de ponderación correctivo	$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{2/n}}$
Factor de ponderación correctivo	$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} h_o = 1m$

El número efectivo de conductores paralelos en una malla dada

$$n = n_a + n_b + n_c + n_d; n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_P}, n_b = 1, n_c = 1, n_d = 1$$

<b>Tabla 3. 6. Valores de los Factores <math>K_s</math>, <math>K_i</math>, <math>K_m</math> y <math>n</math> de la malla con varillas en el perímetro y dentro de la malla</b>		
<b>Denominación</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>
Número efectivo de conductores paralelos a la malla	$n$	<b>7,25</b>
Factor de ponderación correctivo	$K_{ii}$	<b>1</b>
Factor de ponderación correctivo	$K_h$	<b>1,225</b>
Factor de espaciamento para tensión de contacto	$K_m$	<b>0,886</b>
Factor de espaciamento para tensión de paso	$K_s$	<b>0,380</b>
Factor correctivo por geometría de la malla	$K_i$	<b>1,717</b>

**Fuente: Autor**

Con ayuda de los resultados presentados en la Tabla 3.6., y de las ecuaciones [10] y [12] expuestas en el capítulo 1, las cuales se enuncian a continuación:

<b>Denominación</b>	<b>Ecuación</b>
Tensión real de paso	$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s}$
Tensión real de contacto	$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$

Se determinó los valores de tensión de paso y de contacto reales. La Tabla 3.7., ilustra los resultados obtenidos:

<b>Tabla 3. 7. Valores de las Tensiones Reales de Paso y de Contacto de la malla con varillas en el perímetro y dentro de la malla</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Tensión de paso</b>	$E_s$	114,83	V
<b>Tensión de contacto</b>	$E_m$	193,94	V

**Fuente: Autor**

- *Análisis de la tensión de contacto en caso de falla*

Si  $E_m > E_{contacto70kg}$ , se debe cambiar la configuración de la malla; si  $E_m < E_{contacto70kg}$  se puede pasar a calcular la tensión de paso.

Como  $193,94 V < 1321,89 V$  para el caso de usar grava como capa superficial y  $193,94 V < 389,70 V$  para el caso de usar terreno como capa superficial, entonces se procede a calcular la tensión de paso en caso de falla.

- *Análisis de la tensión de paso en caso de falla*

Si  $E_s > E_{paso70kg}$ , se debe cambiar la configuración de la malla; si  $E_s < E_{paso70kg}$  el diseño ha terminado.

Como  $114,83 V < 4187,76 V$  para el caso de usar grava como capa superficial y  $114,83 V < 458,99 V$  para el caso de usar terreno como capa superficial, el diseño se considera factible y seguro.

## **5. Paso 9 y Paso 10: Control de Seguridad**

Si se considera los valores más altos que se han definido de tensiones admisibles de contacto 1321,89 V y de paso 4187,76 V, se observa que el análisis realizado en el paso anterior cumple con las normas de seguridad y por lo tanto el diseño está listo para su implementación.

## **2.5. COMPARACIÓN DE LOS DISEÑOS**

A continuación se tiene una tabla comparativa de los resultados obtenidos en los cálculos anteriormente realizados, con los distintos diseños alternativos:

**Tabla 3. 8. Tabla de comparación de resultados de la malla de puesta a tierra de la Subestación Obrapía, con los distintos diseños alternativos**

<i>Variable/Diseño</i>	Malla rectangular sin varillas		Malla rectangular con varillas en el perímetro		Malla rectangular con varillas en el perímetro y dentro de la malla	
	$\rho_s = 42 \Omega \cdot m$	$\rho_s = 2500 \Omega \cdot m$	$\rho_s = 42 \Omega \cdot m$	$\rho_s = 2500 \Omega \cdot m$	$\rho_s = 42 \Omega \cdot m$	$\rho_s = 2500 \Omega \cdot m$
<i>A</i>	4000 m <sup>2</sup>		4000 m <sup>2</sup>		4000 m <sup>2</sup>	
<i>AWG</i>	4/0		4/0		4/0	
<i>L<sub>T</sub></i>	930 m		993,44 m		1010,52 m	
<i>R<sub>g</sub></i>	0,337 Ω		0,334 Ω		0,333 Ω	
<i>I<sub>g</sub></i>	3207 A		3207 A		3207 A	
<i>GPR</i>	1081,05 V		1071,8 V		1069,05 V	
<i>n</i>	7,25		7,25		7,25	
<i>K<sub>ii</sub></i>	0,478		1,00		1,00	
<i>K<sub>h</sub></i>	1,225		1,225		1,225	
<i>K<sub>m</sub></i>	1,00		0,886		0,886	
<i>K<sub>s</sub></i>	0,38		0,38		0,38	
<i>E<sub>s</sub></i>	126,10 V		117,05 V		114,83 V	
<i>E<sub>m</sub></i>	248,63 V		199,03 V		193,94 V	
<i>E<sub>paso70kg</sub></i>	458,99 V	4187,76 V	458,99 V	4187,76 V	458,99 V	4187,76 V
<i>E<sub>contacto70kg</sub></i>	389,70 V	1321,89 V	389,70 V	1321,89 V	389,70 V	1321,89 V

Fuente: Autor



## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES

En base al estudio realizado para la evaluación y diagnóstico de la malla de puesta a tierra de la “Subestación Obrapía” perteneciente a la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (E.E.R.S.S.A), se puede registrar las siguientes conclusiones:

- Toda evaluación de un sistema de puesta a tierra consistirá en identificar las tomas de tierra existentes, verificar el valor de resistencia y estado actual de conservación de todos los elementos de las tomas de tierra. Además deberá comunicarse los defectos que se encuentren para que se proceda a su inmediata reparación.
- Con los procedimientos para la evaluación de sistemas de puestas a tierra en subestaciones eléctricas descritos en este Trabajo, se pretende asistir al personal de campo de E.E.R.S.S.A encargado de realizar las pruebas de la malla de tierra de subestaciones eléctricas, en tener una mejor visión y conocer la problemática de los sistemas de puesta a tierra, así como comprender mejor los conceptos involucrados en el diseño y análisis de los parámetros que caracterizan un Sistema de Puesta a Tierra.
- Se determinaron los parámetros actualizados del sistema de puesta a tierra de la Subestación Obrapía, tales como: resistividad del terreno, resistencia de la malla de tierra, tensión de contacto y tensión de paso y, además la actualización de planos de construcción de la malla de tierra.

- Se observó que la condición actual en la que se encuentra la malla de puesta a tierra de la subestación es que está construida con conductor de tierra calibre # 1/0 AWG. La norma IEEE Std. 80-2000 exige por lo menos un conductor de tierra calibre # 4/0 AWG
  
- En la inspección visual de puestas a tierra de equipos y estructuras, se detectó que conductores de protección correspondientes a las estructuras de soporte metálicas de los aisladores tipo campana para 69kV, no se encuentran aterrizados a la malla de puesta a tierra. La inspección física de los conectores exteriores destinados a la conexión entre conductores de protección y estructuras metálicas, indica en forma general que se encuentran en un estado deteriorado (con óxido), no permitiendo así un buen contacto con las estructuras metálicas.
  
- Con la aplicación metodológica de los procedimientos indicados para medir los parámetros que caracterizan un sistema de tierra, se consigue que la condición actual del sistema de puesta a tierra en la Subestación Obrapía, concerniente a aspectos eléctricos permisibles (resistencia de puesta a tierra y tensiones de paso y de contacto), se encuentra en un buen estado y en condiciones operativas, siendo la primera vez que se realiza una evaluación del mismo.
  
- Finalmente , en vista que el diseño actual de la malla de tierra no cumple en su totalidad con la norma IEEE Std. 80-2000, se desarrolló un diseño alternativo en el cual está incluido todas las disposiciones indicadas por la norma, tanto en aspectos constructivos como en sus parámetros eléctricos permisibles. Se observa que los resultados obtenidos en la Tabla 3.2. (resistencia de puesta a tierra y tensiones de paso y de contacto) en lo referente al diseño alternativo, son valores que cumplen con los requisitos de la norma, asegurando así un diseño seguro de puesta a tierra.

#### 4.2. RECOMENDACIONES

- En las subestaciones eléctricas se dispone de un sistema de puesta a tierra para que, en el caso de una descarga eléctrica o producirse una sobretensión, la corriente encuentre una ruta segura a tierra. Una conexión a tierra proporciona el contacto entre el sistema eléctrico y la tierra y para asegurar una conexión a tierra fiable, los estándares de ingeniería y las normas generales especifican con frecuencia una impedancia mínima para el sistema de puesta a tierra. La NETA (International Electrical Testing Association) especifica que para mantener un sistema en correctas condiciones se deben realizar comprobaciones del sistema de conexión a tierra cada tres años (inspección visual de puestas a tierra de equipos y estructuras, inspección física de los conductores y conectores y la medición de la resistencia de puesta a tierra de la malla de la subestación).
- Se recomienda aterrizar a la malla de puesta a tierra de la subestación las estructuras metálicas que sirven de soporte de los aisladores tipo campana para 69kV. Además se debe realizar un cambio de las conexiones atornilladas que se dan entre la estructura metálica y el conductor de protección de puesta a tierra, ya que se encuentran oxidadas y en mal estado.
- En caso de que la resistencia de puesta a tierra de la malla de la subestación presente un valor muy alto (mayor a 1 ohmio), es necesario tomar las medidas necesarias para mejorar la resistencia de puesta a tierra, ya sea incrementando el área ocupada por la malla o tratamiento químico del terreno. Si se opta por implementar el tratamiento químico del terreno, se recomienda realizar el procedimiento Ledoux, el cual tiene un procedimiento de implementación de gran facilidad y es aplicable a distintos tipos de terreno.

- Finalmente, quedará para la E.E.R.S.S.A fichas técnicas, las cuales se utilizarán en los procedimientos de medición de la resistencia de puesta a tierra de mallas en subestaciones, descritos en éste Trabajo; siendo éstos procedimientos los recomendados para mallas de puesta a tierra que ocupen una gran área en su extensión.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] TOLEDANO G., José, MARTINEZ REQUENA, Juan, Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas, Cuarta Edición, Editorial Thomson Paraninfo, Madrid, 2004.
  
- [2] DE MEDEIROS FILHO, Solon, Fundamentos de Medidas Eléctricas Incluido Medicao de Resistencia de Terra e Resistividade do Solo, Editora Universitaria RECIFE, Pernambuco, 1979.
  
- [3] HARPER ENRIQUEZ, Gilberto, Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas, Segunda Edición, Editorial Limusa, México, 2005.
  
- [4] HARPER ENRIQUEZ, Gilberto, Manual del Técnico en Subestaciones Eléctricas, Industriales y Comerciales, Primera Edición, Editorial Limusa, México, 2008.
  
- [5] RAÚLL MARTÍN, José, Diseño de Subestaciones Eléctricas, Primera Edición, Editorial McGraw-Hill, México, 1987.
  
- [6] IEEE Std. 81-1983: “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System”, IEEE, Marzo, 1983.
  
- [7] IEEE Std. 80-2000: “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, IEEE, Enero, 2000.
  
- [8] IEEE Std. 142-1991: “IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”, IEEE, Diciembre, 1991.
  
- [9] Manual Técnico: “Medidor de Tierras FLUKE Modelo 1625”, 2008.

- [10] Manual Técnico “Medidor Digital de Tierras AEMC modelo 4500”, 2004.
- [11] ROJAS, Gregor, Manual de Sistemas de Puesta a Tierra, 2007.  
<[http://www.gedisa.com.ve/recientes\\_aun/catalogos/electricos/libreria\\_gediweld/libreria/00%20MANUAL%20GEDIWELD%202007%20COMPLETO%20B.pdf](http://www.gedisa.com.ve/recientes_aun/catalogos/electricos/libreria_gediweld/libreria/00%20MANUAL%20GEDIWELD%202007%20COMPLETO%20B.pdf)>  
>
- [12] MARKIEWICZ Henryk y KLAJN Antoni, Puesta a Tierra y EMC, Sistemas de Puesta a Tierra Fundamentos de Cálculo y Diseño.  
<[http://www.leonardo-energy.org/espanol/lee-guia\\_calidad/Guia%20Calidad%206-3-1%20Puesta%20a%20Tierra%20-%20Calculo%20y%20diseno.pdf](http://www.leonardo-energy.org/espanol/lee-guia_calidad/Guia%20Calidad%206-3-1%20Puesta%20a%20Tierra%20-%20Calculo%20y%20diseno.pdf)>
- [13] Norma NRF-011-CFE 2004, Sistema de Tierra para Plantas y Subestaciones Eléctricas, 2004.  
<[http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pea0NRF\\_011\\_Sistema\\_de\\_Tierra\\_Plantas\\_y\\_Subestaciones.pdf](http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pea0NRF_011_Sistema_de_Tierra_Plantas_y_Subestaciones.pdf)>
- [14] Norma RA 6-015 “Medida de la Resistencia de Puesta a Tierra”, 2005.  
<[http://www.epm.com.co/epm/documentos/institucional/pdf/n\\_aerea\\_193.pdf](http://www.epm.com.co/epm/documentos/institucional/pdf/n_aerea_193.pdf)>
- [15] Manual Técnico PROCOBRE, Mallas de Tierra, 2010.  
<[http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst\\_electricas\\_mallas.pdf](http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst_electricas_mallas.pdf)>
- [16] Manual Técnico PROCOBRE, Sistemas de Puesta a Tierra, 2010.  
<[http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst\\_electricas\\_puesta\\_a\\_tierra.pdf](http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst_electricas_puesta_a_tierra.pdf)>
- [17] GRANERO, Andrés, Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra, 2001.

<[http://www.escuelassj.com/file.php/37/materials\\_comuns/materiales\\_descarga/DOCUMENTOS%20SCHNEIDER/pt009-v2-TIERRA.pdf](http://www.escuelassj.com/file.php/37/materials_comuns/materiales_descarga/DOCUMENTOS%20SCHNEIDER/pt009-v2-TIERRA.pdf)>

[18] RIVERO DE LA TORRE, Ramón, Medición de la Resistencia de Tierra de Grandes Electrodo, 2009.

<[http://grupos.emagister.com/documento/medicion\\_de\\_la\\_resistencia\\_de\\_tierra\\_de\\_grandes\\_electrodos\\_/1007-246016](http://grupos.emagister.com/documento/medicion_de_la_resistencia_de_tierra_de_grandes_electrodos_/1007-246016)>

[19] VARELA, Manuel, Curso Teórico Práctico sobre Medición de Puesta a Tierra con Telurímetro.

<<http://www.electricasas.com/wp-content/uploads/2008/10/medicion-con-telurimetro.pdf>>

## ENRIQUECEDOR DE TIERRA (GEM)<sup>27</sup>



Un material de conductividad superior que mejora la eficacia de la puesta a tierra, en especial en áreas de baja conductividad (terreno rocoso, áreas de humedad variable, suelos arenosos).

### Dosificación:

Longitud estimada de cobertura de conductor de puesta a tierra con cada saco de GEM				
Anchura de la zanja	Espesor total de la capa de GEM			
	2,5 cm (1")	5,1 cm (2")	7,6 cm (3")	10,2 cm (4")
10 cm (4")	4,3 m (14')	2,1 m (7,0')	1,4 m (4,7')	1,1 m (3,5')
15 cm (6")	2,8 m (9,3')	1,4 m (4,7')	0,9 m (2,8')	0,7 m (2,3')
20 cm (8")	2,1 m (7,0')	1,1 m (3,5')	0,7 m (2,3')	0,5 m (1,6')
25 cm (10")	1,7 m (5,6')	0,9 m (2,8')	0,6 m (1,9')	0,4 m (1,4')
30 cm (12")	1,4 m (4,7')	0,7 m (2,3')	0,5 m (1,6')	0,3 m (1,2')

<sup>27</sup> Información Técnica del Enriquecedor de Tierra (GEM) de ERICO, <http://www.ericom.com/products/GEM.asp>

**Cantidad estimada de sacos de GEM para rellenar el espacio entorno de electrodos de tierra hasta una densidad de 90 lb/pie<sup>3</sup> (1442 kg/m<sup>3</sup>)**

Diámetro del agujero	Profundidad del agujero						
	1,8 m (6')	2,1 m (7')	2,4 m (8')	2,7 m (9')	5,2 m (17')	5,8 m (19')	6,1 m (20')
7,5 cm (3")	2	2	2	2	4	4	4
10 cm (4")	2	3	3	3	6	7	7
12,5 cm (5")	3	4	4	5	9	10	10
15 cm (6")	5	5	6	7	13	14	15
17,5 cm (7")	6	7	8	9	17	19	20
20 cm (8")	8	9	11	12	22	25	26
22,5 cm (9")	10	12	13	15	28	31	32
25 cm (10")	12	14	16	18	34	38	40

2011

# Medidas y vigilancia de las instalaciones de puesta a tierra



EMPRESA ELECTRICA REGIONAL  
DEL SUR S.A.

## 1. Método de la pendiente

El método de la pendiente, designado en su mayor parte para sistemas de electrodos que cubren una gran área, podrá ser utilizado de la siguiente manera:

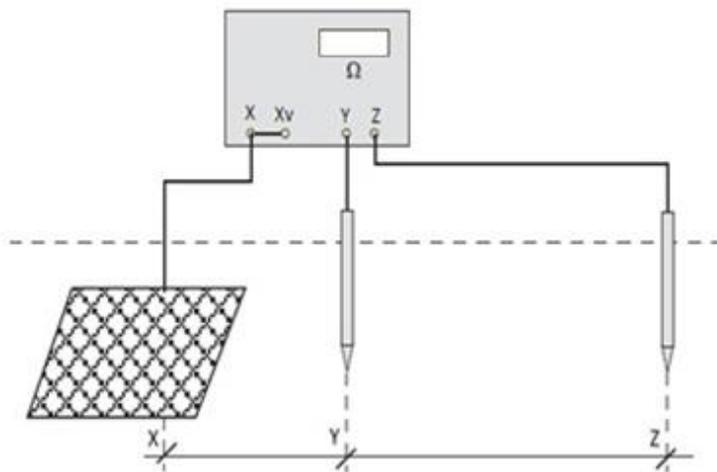
- Conectar X y Xv al electrodo bajo prueba (electrodo escogido debe ubicarse en el perímetro de la malla), como se indica en la Figura 1.
- Coloque el electrodo Z a una distancia 2 veces el lado mayor de la malla.
- Tomar lecturas situando la pica Y a las distancias: 20%, 40% y 60% de la distancia XZ, desde el electrodo X. Estas lecturas son: R1, R2 y R3 respectivamente.
- Hallaremos el valor  $\mu$ :

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$$

- Para el valor de  $\mu$  calculado, aparece un valor de PT/C en anexo y se debe multiplicar PT/C por XZ y obtener la distancia XY.
- Poner la pica de potencial a la distancia XY calculada, y tomar la lectura. Esta lectura es la resistencia de puesta a tierra, y éste será el resultado.
- Repetir el procedimiento variando XZ (a mayor distancia si el valor calculado de  $\mu$  es mayor que en la tabla anexo). Comparar los resultados de las dos pruebas. (Figura 1).

**Nota: los valores presentados en la tabla anexo de PT/C, deben ser divididos para 1000 (por ejemplo para un  $\mu=0,401$ ; se tiene un valor de PT/C=0,6431).**

Fig. 1:



XY	MEDIDA
20% XZ	R1
40% XZ	R2
60% XZ	R3

**TABLA DE VALORES DE DE PT/C PARA DISTINTOS VALORES DE u**

$\mu$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.40	6432	6431	6429	6428	6426	6425	6423	6422	6420	6419
0.41	6418	6416	6415	6413	6412	6410	6409	6408	6406	6405
0.42	6403	6402	6400	6399	6397	6396	6395	6393	6392	6390
0.43	6389	6387	6386	6384	6383	6382	6380	6379	6377	6376
0.44	6374	6373	6372	6370	6369	6367	6366	6364	6363	6361
0.45	636	6359	6357	6356	6354	6353	6351	6350	6348	6347
0.46	6346	6344	6343	6341	6340	6338	6337	6336	6334	6333
0.47	6331	6330	6328	6327	6325	6324	6323	6321	6320	6318
0.48	6317	6315	6314	6312	6311	6310	6308	6307	6305	6304
0.49	6302	6301	6300	6298	6297	6295	6294	6292	6291	6289
0.50	6288	6286	6285	6283	6282	6280	6279	6277	6276	6274
0.51	6273	6271	6270	6268	6267	6265	6264	6262	6261	6259
0.52	6258	6256	6255	6253	6252	6252	6248	6247	6245	6244
0.53	6242	6241	6239	6238	6236	6235	6233	6232	6230	6229
0.54	6227	6226	6224	6223	6221	6220	6218	6217	6215	6214
0.55	6212	6210	6209	6207	6206	6204	6203	6201	6200	6198
0.56	6197	6195	6194	6192	6191	6189	6188	6186	6185	6183
0.57	6182	6180	6179	6177	6176	9174	6172	6171	6169	6168
0.58	6166	6165	6163	6162	6160	6159	6157	6156	6154	6153
0.59	6151	6150	6148	6147	6145	6144	6142	6141	6139	6138
0.60	6136	6134	6133	6131	6130	6128	6126	6125	6123	6121
0.61	612	6118	6117	6115	6113	6112	6110	6108	6107	6105
0.62	6104	6102	6100	6099	6097	6096	6094	6092	6091	6089
0.63	6087	6086	6084	6083	6081	6079	6076	6076	6074	6073
0.64	6071	6070	6068	6066	6065	6063	6061	6060	6058	6067
0.65	6055	6053	6052	6050	6049	6047	6045	6044	6042	6040
0.66	6039	6037	6036	6034	6032	6031	6029	6027	6026	6024
0.67	6023	6021	6019	6018	6016	6015	6013	6011	6010	6008
0.68	6006	6005	6003	6002	6000	5998	5997	5995	5993	5992
0.69	599	5989	5987	5985	5984	5982	5980	5979	5977	5976
0.70	5974	5973	5971	5969	5967	5965	5964	5962	5960	5959
0.71	5957	5955	5953	5952	5950	5948	5947	5945	5943	5942
0.72	594	5938	5936	5935	5933	5931	5930	5928	5926	5924
0.73	5923	5921	5920	5918	5916	5914	5912	5911	5909	5907
0.74	5906	5904	5902	5900	5899	5897	5895	5894	5892	5890
0.75	5889	5887	5885	5883	5882	5880	5878	5877	5875	5873
0.76	5871	5870	5868	5866	5865	5863	5861	5859	5858	5856
0.77	5854	5853	5851	5849	5847	5846	5844	5842	5841	5839
0.78	5837	5835	5834	5832	5830	5829	5827	5825	5824	5822

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>0.79</b>	582	5818	5817	5815	5813	5812	5810	5808	5806	5805
<b>0.80</b>	5803	5801	5799	5797	5796	5794	5792	5790	5788	5786
<b>0.81</b>	5785	5783	5781	5779	5777	5775	5773	5772	5770	5768
<b>0.82</b>	5766	5764	5762	5760	5759	5757	5755	5753	5751	5749
<b>0.83</b>	5748	5746	5744	5742	5740	5738	5736	5735	5733	5731
<b>0.84</b>	5729	5727	5725	5723	5722	5720	5718	5716	5714	5712
<b>0.85</b>	5711	5709	5707	5705	5702	5701	5699	5698	5696	5691
<b>0.86</b>	5692	5690	5688	5686	5685	5683	5681	5679	5677	5675
<b>0.87</b>	5674	5672	5670	5668	5666	5664	5662	5661	5659	5657
<b>0.88</b>	5655	5653	5651	5650	5648	5646	5644	5642	5640	5638
<b>0.89</b>	5637	5635	5633	5631	5629	5627	5625	5624	5622	5620
<b>0.90</b>	5618	5616	5614	5612	5610	5608	5606	5604	5602	5600
<b>0.91</b>	5598	5596	5594	5592	5590	5588	5586	5584	5582	5580
<b>0.92</b>	5578	5576	5574	5572	5570	5568	8865	5563	5561	5559
<b>0.93</b>	5557	5555	5553	5551	5549	5547	5545	5543	5541	5539
<b>0.94</b>	5537	5535	5533	5531	5529	5527	5525	5523	5521	5519
<b>0.95</b>	5517	5515	5513	5511	5509	5507	5505	5503	5501	5499
<b>0.96</b>	5497	5495	5493	5491	5489	5487	5485	5483	5481	5479
<b>0.97</b>	5477	5475	5473	5471	5469	5467	5464	5462	5460	5458
<b>0.98</b>	5456	5454	5452	5450	5448	5446	5444	5442	5440	5438
<b>0.99</b>	5436	5434	5432	5430	5428	5426	5424	5422	5420	5418
<b>1.00</b>	5416	5414	5412	5409	5407	5405	5403	5400	5398	5396
<b>1.01</b>	5394	5391	5389	5387	5385	5383	5380	5378	5376	5374
<b>1.02</b>	5371	5369	5367	5365	5362	5360	5358	5356	5354	5351
<b>1.03</b>	5349	5347	5345	5344	5340	5338	5336	5333	5331	5329
<b>1.04</b>	5327	5325	5322	5320	5318	5316	5313	5311	5309	5307
<b>1.05</b>	5305	5302	5300	5298	5296	5293	5291	5289	5287	5284
<b>1.06</b>	5252	5280	5278	5276	5273	5271	5269	5267	5264	5262
<b>1.07</b>	526	5258	5255	5253	5251	5249	5247	5244	5242	5240
<b>1.08</b>	5238	5235	5233	5231	5229	5229	5224	5222	5219	5217
<b>1.09</b>	5215	5213	5211	5209	5206	5204	5202	5200	5197	5195
<b>1.10</b>	5193	5190	5188	5185	5183	5180	5178	5175	5173	5170
<b>1.11</b>	5168	5165	5163	5160	5158	5155	5153	5150	5148	5145
<b>1.12</b>	5143	5140	5137	5135	5132	5130	5127	5125	5122	5120
<b>1.13</b>	5118	5115	5113	5110	5108	5105	5103	5100	5098	5095
<b>1.14</b>	5093	5090	5088	5085	5083	5080	5078	5075	5073	5070
<b>1.15</b>	5068	5065	5062	5060	5057	5055	5052	5050	5047	5045
<b>1.16</b>	5042	5040	5037	5035	5032	5030	5027	5025	5022	5020
<b>1.17</b>	5017	5015	5012	5010	5007	5005	5002	5000	4997	4995
<b>1.18</b>	4992	4990	4987	4985	4982	4980	4977	4975	4972	4970
<b>1.19</b>	4967	4965	4962	4960	4957	4955	4952	4950	4947	4945
<b>1.20</b>	4942	4939	4936	4933	4930	4928	4925	4922	4919	4916
<b>1.21</b>	4913	4910	4907	4904	4901	4899	4896	4893	4890	4887
<b>1.22</b>	4884	4881	4878	4875	4872	4870	4867	4864	4861	4858

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1,23</b>	4855	4852	4849	4846	4843	4841	4838	4835	4832	4829
<b>1,24</b>	4826	4823	4820	4817	4814	4812	4809	4806	4803	4800
<b>1,25</b>	4797	4794	4791	4788	4785	4783	4780	Allí	4774	4771
<b>1,26</b>	4768	4765	4762	4759	4756	4754	4751	4748	4745	4742
<b>1,27</b>	4739	4736	4733	4730	4727	4725	4722	4719	4716	4713
<b>1,28</b>	471	4707	4704	4701	4698	4696	4693	4690	4687	4684
<b>1,29</b>	4681	4678	4675	4672	4669	4667	4664	4661	4658	4655
<b>1,30</b>	4652	4649	4645	4642	4638	4635	4631	4628	4625	4621
<b>1,31</b>	4618	4614	4611	4607	4604	4601	4597	4594	4590	4586
<b>1,32</b>	4583	4580	4577	4573	4570	4566	4563	4559	4556	4553
<b>1,33</b>	4549	4546	4542	4539	4535	4532	4529	4525	4522	4518
<b>1,34</b>	4515	4511	4508	4505	4501	4498	4494	4491	4487	4484
<b>1,35</b>	4481	4477	4474	4470	4467	4463	4460	4457	4453	4450
<b>1,36</b>	4446	4443	4439	4436	4432	4429	4426	4422	4419	4415
<b>1,37</b>	4412	4408	4405	4402	4398	4395	4391	4388	4384	4381
<b>1,38</b>	4378	4374	4371	4367	4364	4360	4357	4354	4350	4347
<b>1,39</b>	4343	4340	4336	4333	4330	4326	4323	4319	4316	4312
<b>1,40</b>	4309	4305	4301	4296	4292	4288	4284	4280	4275	4271
<b>1,41</b>	4267	4263	4258	4254	4250	4246	4242	4237	4233	4229
<b>1,42</b>	4225	4221	4216	4212	4208	4204	4200	4195	4191	4187
<b>1,43</b>	4183	4178	4174	4170	4166	4162	4157	4153	4149	4145
<b>1,44</b>	4141	4136	4132	4128	4124	4120	4115	4111	4107	4103
<b>1,45</b>	4099	4094	4090	4086	4082	4077	4073	4069	4065	4061
<b>1,46</b>	4056	4052	4048	4044	4040	4035	4031	4027	4023	4018
<b>1,47</b>	4014	4010	4005	4001	3997	3993	3989	3985	3980	3976
<b>1,48</b>	3972	3968	3964	3959	3955	3951	3947	3943	3938	3934
<b>1,49</b>	393	3926	3921	3917	3913	3909	3905	3900	3896	3892
<b>1,50</b>	3888	3883	3878	3874	3869	3864	3859	3854	3850	3845
<b>1,51</b>	384	3835	3830	3825	3820	3816	3811	3806	3801	3796
<b>1,52</b>	3791	3786	3781	3776	3771	3766	3760	3755	3750	3745
<b>1,53</b>	374	3735	3730	3724	3719	3714	3709	3704	3698	3693
<b>1,54</b>	3688	3683	3677	3672	3667	3662	3656	3651	3646	3640
<b>1,55</b>	3635	3630	3624	3619	3613	3608	3602	3597	3591	3586
<b>1,56</b>	358	3574	3569	3563	3557	3552	3546	3540	3534	3528
<b>1,57</b>	3523	3517	3511	3506	3500	3494	3488	3482	3477	3471
<b>1,58</b>	3465	3459	3453	3447	3441	3435	3429	3423	3417	3411
<b>1,59</b>	3405	3399	3393	3386	3380	3374	3368	3362	3355	3349

2011

# Medidas y vigilancia de las instalaciones de puesta a tierra



EMPRESA ELECTRICA REGIONAL  
DEL SUR S.A.

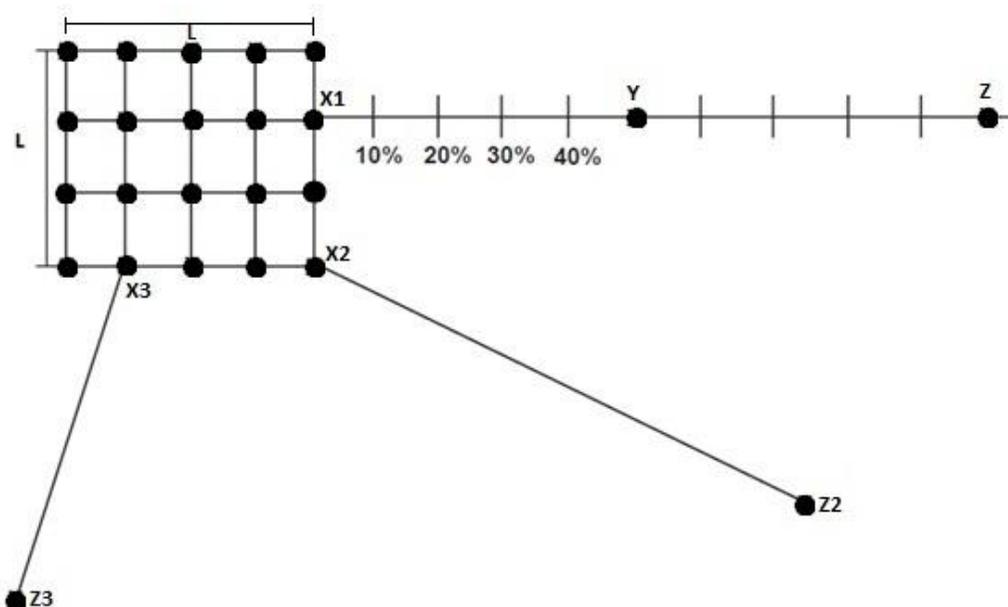
## 1. Método de Intersección de Curvas

Éste método es usado para medidas de tierras de grandes electrodos, en el que se tiene problemas de limitación de espacio para la situación de las picas.

Los pasos a seguir para este método son los siguientes:

- Elegimos X de forma arbitraria dentro de la malla de tierra (electrodo escogido debe ubicarse en el perímetro de la malla).
- Se conectan los terminales X y Xv al electrodo bajo prueba X.
- Llevamos Z lo más lejos posible que se pueda (la distancia del electrodo de corriente Z, no debe ser inferior al lado mayor de la malla, ni mayor a 2 veces el lado mayor de la malla).
- Hacer todas las medidas, situando Y al 10%, 20%, 30%, etc., hasta el 90% de la distancia XZ (Fig. 1)
- Dibujar los valores de R obtenidos a las diferentes distancias, de ellos deduciremos la curva XZ1 (Fig. 2).
- Repetiremos el proceso con la misma X (o punto de contacto de la malla de electrodos) y otra distancia Z2 (Fig. 1). Obtendremos la curva XZ2, de forma similar a la anterior (Fig. 2)

Fig. 1:



- Repetiremos con nuevos valores de XZ, obteniendo XZ3. (Fig. 2).
- Estas tres curvas puede ocurrir que se corten en un punto, el cual será el valor de resistencia requerida como resultado. Sin embargo esto no es lo normal. La teoría del Dr. Tagg<sup>1</sup> introduce un nuevo concepto que es el valor  $\lambda$  que es la distancia entre nuestro punto X y el

punto de electrodo equivalente del sistema G (Figura 3). Haremos la transformación con nuestras tres curvas halladas anteriormente.

<sup>1</sup> GRANERO Andrés, publicación técnica Schneider "Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra", 2001.

Realizaremos la transformación siguiente, utilizando la regla del 61,8%:

$$\lambda + XY = 61,8\%(\lambda + XZN)$$

$$\lambda = \frac{0,618XZN - XY}{1 - 0,618}$$

$$\lambda = 1,617XZN - 2,617XY \quad [1]$$

Fig. 2:

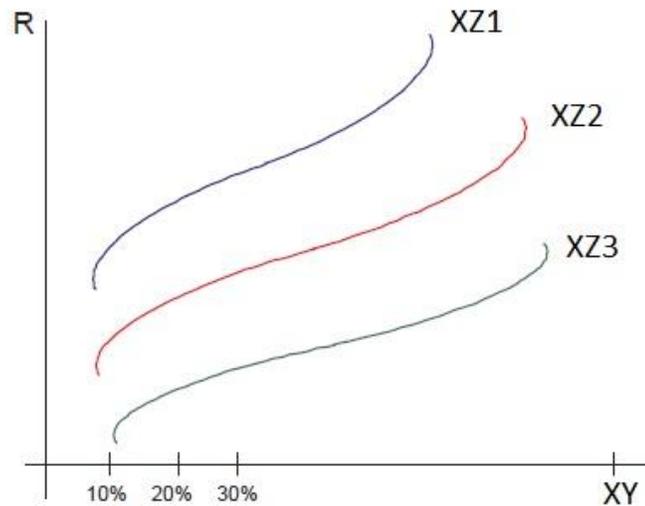
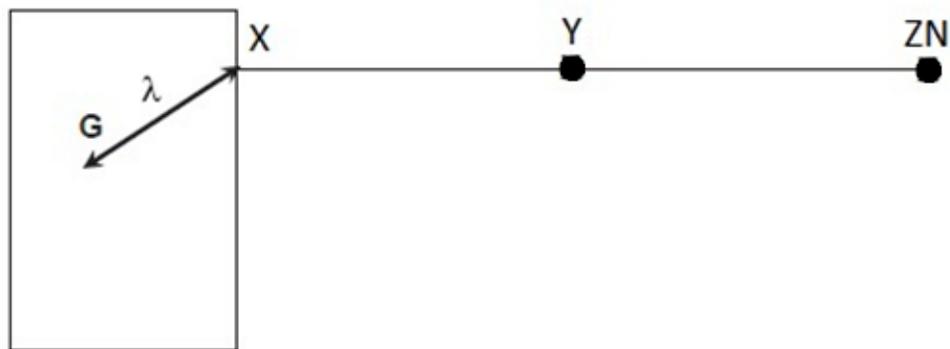


Fig. 3:



Para cada una de las tres curvas de la Figura 2, sabiendo XZ y los diferentes valores de XY obtendremos una curva R en función de  $\lambda$ , como se observa en la Fig. 4.

El verdadero valor de resistencia será el punto de intersección o centro del área comprendida entre curvas. (Fig. 4 y Fig.5).

Fig. 4:

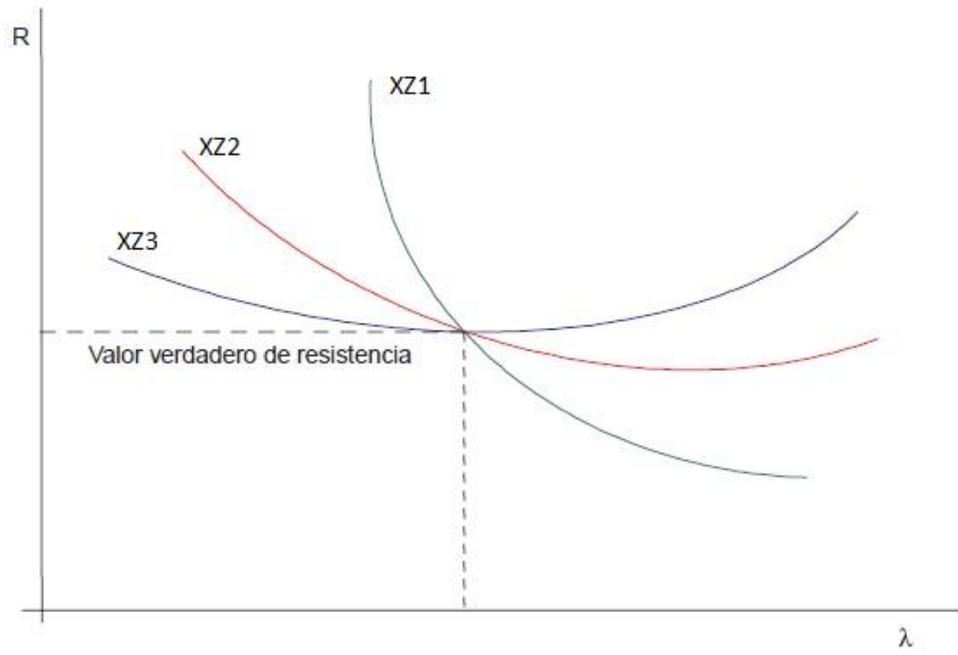
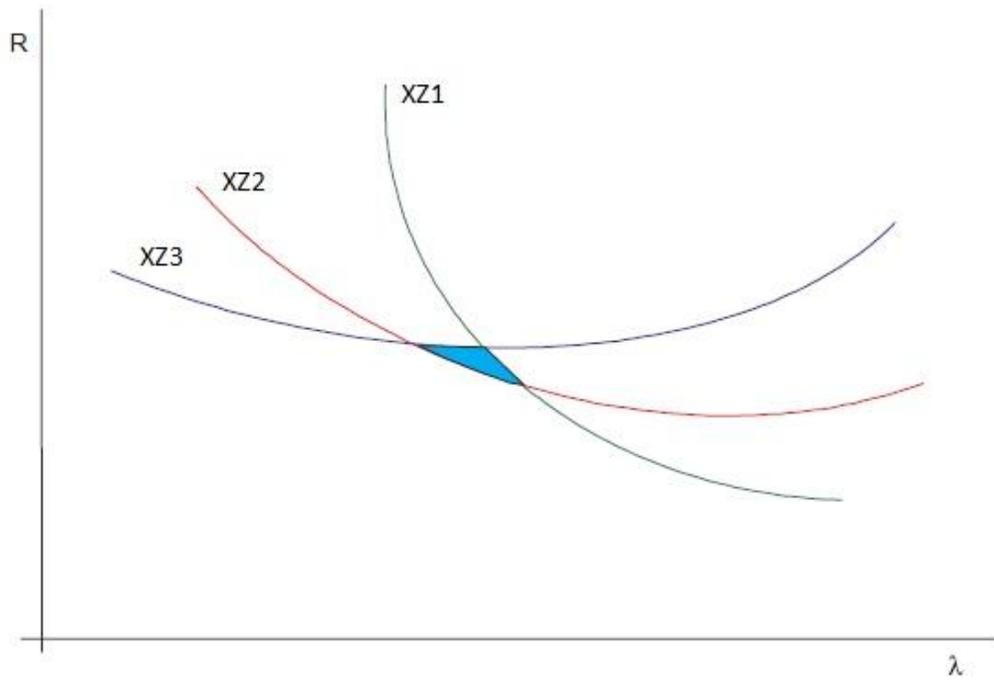


Fig. 5:



- h. Los valores de  $\lambda$  pueden darnos resultados negativos, pero el valor de resistencia será igualmente válido.
- i. Para saber la distancia exacta XY, sustituiremos en la fórmula el valor de  $\lambda$  hallado.

$$XY = 0,618 XZN - 0,382 \lambda \quad [2]$$

Pudiendo utilizarse este valor XY, para posteriores medidas de mantenimiento.

### Compensación del cable de medida

Éste será un dato que se tomará en cuenta en el resultado final.

Uniremos X y Xv en el instrumento de medida y haremos lo mismo con Y y Z, conectaremos el cable de medida entre X-Xv y Y-Z, a continuación haremos la lectura: esta lectura será la resistencia

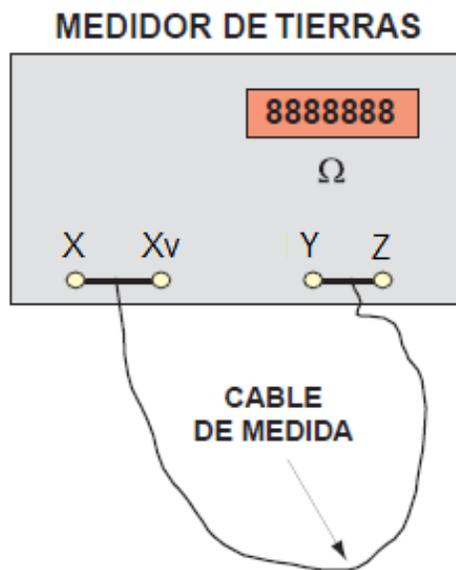
XZN, es la primera (XZ1), segunda (XZ2) o tercera (XZ3) distancia tomada para las mediciones.

- j. A todas las medidas anteriormente realizadas, habrá que introducir el factor de corrección de la resistencia del cable de medida (compensación del cable de medida).

del cable que habrá que deducir de los valores obtenidos en mediciones posteriores. (Fig. 6).

**Nota:** El único que interviene y afecta la medida es el que desde X-Xv va hasta el punto de medida.

Fig. 6:



<b>Tabla de Información Técnica de Cable Desnudo de Cobre</b>			
<b>Calibre del Conductor</b>	<b>Área</b>		<b>Diámetro Exterior</b>
	<b>kcmil</b>	<b>mm<sup>2</sup></b>	<b>mm</b>
10	10,38	5,26	2,93
8	16,52	8,37	3,7
6	26,25	13,3	4,67
4	41,70	21,15	5,74
2	66,21	33,63	7,26
1/0	105,6	53,51	9,14
2/0	133,1	67,44	10,26
3/0	167,8	85,03	11,53
4/0	211,6	107,22	13,3
250	250	126,68	14,62
300	300	152,01	16,01
350	350	177,35	17,29
400	400	202,68	18,5
500	500	253,36	20,67
600	600	304,03	22,67
750	750	380,03	25,35
1000	1000	506,71	29,27

**Fuente: Phelps Dodge**

**FOTOGRAFÍAS DE LAS MEDIDAS DE CAMPO EN LA SUBESTACIÓN  
OBRAPÍA**



**Figura G1. Subestación Obrapía**



**Figura G2. Patio de 13.8kV.**



**Figura G3. Patio de 69kV.**



**Figura G4. Instrumento de medida AEMC 4500.**



**Figura G5. Medición de la resistencia de puesta a tierra. (Método de la pendiente).**



**Figura G6. Medición de la resistencia de puesta a tierra. (Método de intersección).**