

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para
líneas y subestaciones eléctricas de transmisión.**

PRESENTADO POR:

WALTER ESAÚ PÉREZ LOARCA

CHRISTIAN JAVIER SERRANO BARRIOS

OSCAR ORLANDO SURIO GUEVARA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2015

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERINO :

MSC.ING. SALVADOR DE JESÚS GERMAN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

**Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para
líneas y subestaciones eléctricas de transmisión.**

Presentado por :

WALTER ESAÚ PÉREZ LOARCA

CHRISTIAN JAVIER SERRANO BARRIOS

OSCAR ORLANDO SURIO GUEVARA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

MSC.ING. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS

San Salvador, Noviembre 2015

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

MSC.ING. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS

AGRADECIMIENTOS

Al inicio de este camino le entregué mis sueños y metas a mi Dios y es por eso que quiero agradecerle a Él primeramente porque hoy puedo decir con seguridad que nunca me dejé solo, a pesar de que hubieron días difíciles a lo largo de mi carrera en los cuales pensé tirar la toalla pero Él no lo permitió y me extendió su mano para continuar.

Agradezco a mis padres, Walter y Sonia, por sus consejos, sus regaños, sus palabras de ánimos, sus oraciones, su aporte económico pero sobre todo por enseñarme a soñar y a creer que todo sacrificio tiene su recompensa.

A mis hermanas, Andrea y Pamela, por llevarme en sus oraciones y considerarme un ejemplo a seguir. A mi amigo y hermano mayor, Jeremías Rivera, por ser un ejemplo para mí, por sus consejos y sus palabras de apoyo a pesar de la distancia.

A mi abuelita Tey que comenzó este recorrido junto a mí pero que en el camino partió a la presencia de Dios y que desde ese día fue un motivo para seguir adelante por ello dedico este logro especialmente a ella. A mis abuelos, Papá Ole y Mamá Nina por siempre estar pendiente de mí, por haber contribuido a mi formación desde pequeño y por incluirme siempre en sus oraciones.

A Celeste Meléndez y su familia, por formar parte de este sueño durante los últimos tres años. Especialmente a Celeste por su comprensión, apoyo, palabras de ánimo y su amor hacia mí.

A mis tios/as, especialmente a mi Tia Flor y mi Tio Dani por estar al cuidado de mi avance en la carrera y por siempre creer que sería capaz de lograrlo. A mi Mamá Marta por su amor y por formar parte en la educación desde mi niñez hasta el día de hoy.

A mis compañeros con los cuales comencé esta travesía y que al transcurrir del tiempo se convirtieron en mis amigos, Oscar Tamayo, Christian Serrano, Oscar Surio, Carlos Argueta, Álvaro Rodríguez y Victor Sagastume.

A los catedráticos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica por compartir sus conocimientos a lo largo de mi carrera, especialmente a los Ingenieros Jorge Zetino y Numa Jiménez por sus aportes en este trabajo de graduación.

A muchas personas que no están escritas aquí pero que estuvieron siempre apoyándome y deseando lo mejor para mí.

A todos y cada uno ¡Muchas Gracias!

Walter Pérez

AGRADECIMIENTOS

Después de alegrarte por ti mismo por un peldaño más alcanzado, terminar otra etapa se vuelve satisfactorio sólo cuando tu familia y amigos están ahí para verlo. Es ahí donde toma sentido lograr hacer algo que quisiste, poder compartir esa alegría con esas personas es gratificante. Por eso, agradezco por la vida de esas personas, que están a mi lado y a quienes les puedo decir nuevamente: lo hemos logrado.

Daysi Dinora Barrios, mi madre; Guillermo de Jesús Serrano, mi padre y Nancy Serrano, mi hermana, sin ustedes y sin su incansable esfuerzo por brindarme lo necesario desde que tengo memoria, no hubiera podido terminar este trayecto. Es a ustedes a quien les debo quien soy, mi persona, mis actitudes ante la vida, mis ideales y mis valores. Su ejemplo claro de trabajar día a día, lo que me ha hecho dedicarme por completo a este proyecto, y aquí estoy, terminando esta etapa y comenzando otra. Muchas gracias.

Son demasiadas las personas a las que debo agradecer el apoyo brindado a lo largo de todos los años, desde mi básica, etapa que siempre recordaré felizmente. Mis amigos de la infancia, mis amigos del ITR, mis amigos de la vida. Maestros de todas las etapas quienes me han aconsejado y ayudado, ustedes, si leen esto, sabrán a quienes me refiero, porque siempre estamos conectados a pesar de la distancia.

Pero especialmente en esta etapa de la universidad, agradecer a mis compañeros de estudio y amigos: Walter, Fiurer, Surio, Tamayo, Álvaro por el trabajo en equipo que hicimos y con el que obtuvimos muchos logros. A Rina, Adriana, Lily, Paty, Carlos, Montoya, Martina, por quedarse hasta hoy apoyándome. A Víctor y Arana por su apoyo y a todos los demás amigos y amigas de la Escuela de Eléctrica, con los que este año nos acercamos más, muchas gracias. A los maestros que me aconsejaron y apoyaron: Ing. German, Ing. Ramos y especialmente al Ing. Numa Jiménez por sus consejos y por retarme a hacer mejores y grandes cosas de mi vida, muchas gracias.

Sé que me falta mencionar a muchas personas que han estado en momentos claves, a quienes conocí este año en IEEE, a quienes están pendientes de mí, a quienes sé que quieren lo mejor de mí, pero aunque no estén explícitamente, están en mis agradecimientos y a ustedes también, les dedico este trabajo.

Christian Serrano

AGRADECIMIENTOS

Hace 6 años, muchos comenzamos la carrera de Ingeniería Eléctrica y muy pocos llegan hasta el final de la misma en el tiempo establecido. Si puede considerarse un logro, este difícilmente puede lograrse por propios méritos, porque una carrera de ingeniería no puede ignorar el trabajo en equipo; conocer a la gente adecuada en algún punto de nuestra carrera ayuda enormemente porque esto significa conocer personas con las que nos complementamos mutuamente, esto es parte muy importante de la ingeniería, aplicación de criterios mezclados de un grupo de personas que tienen un mismo proyecto en mente, en este caso, culminar una carrera universitaria. En mi caso conocí no solo compañeros, sino también amigos, de los cuales dos son parte de este grupo de trabajo y otros más que lastimosamente se atrasan en su carrera y no lograron completar su carrera simultáneamente con nosotros. Álvaro, Carlos, Christian, Walter, Oscar; todos ellos han sido parte importante de lo que ahora culmina con este trabajo. No se puede dejar de lado el apoyo de una familia y de otras amistades externas a la universidad, quienes también forman parte de este logro, Adrián, David, Kevin; también tienen una valiosa participación a lo largo de estos años.

A todos ustedes. Muchas gracias.

Oscar Surio

AGRADECIMIENTOS

A nuestros asesores: Ing. Numa Jiménez e Ing. Jorge Zetino, por aportar con muchas ideas, sugerencias, conocimiento teórico, su experiencia y por corregirnos cuando ha sido necesario, y por supuesto por el tiempo que nos han dedicado, damos infinitos agradecimientos, ya que nos han ayudado a formular y ejecutar el presente informe.

Agradecemos a LaGeo y ETESAL, quienes forman parte de Grupo CEL, y a sus autoridades: Ing. Jorge Castillo, Ing. Armando Rugamas, Ing. William Rivas e Ing. Julio Artero, por el apoyo que nos brindaron durante la realización de nuestro trabajo de investigación, poniendo a nuestra disposición los recursos necesarios para alcanzar los objetivos planteados.

Agradecimientos a los ingenieros de ETESAL: Ing. Arturo Maza por compartir sus conocimientos, experiencia y tiempo en la realización y análisis de mediciones; Al Ing. Walter Cartagena por su colaboración en mediciones y ayuda en la coordinación de actividades; y a los técnicos e ingenieros que nos ayudaron en el proceso de mediciones, quienes pusieron a nuestra disposición su tiempo y experiencia.

Damos gracias a los ingenieros de LaGeo, que compartieron su conocimiento teórico y práctico en nuestras actividades: Ing. Luis Aguirre e Ing. Francisco González. Al Ing. Fidel Serrano, Ing. Edgardo Panameño y a los ingenieros y técnicos que apoyaron nuestro trabajo de campo con su tiempo y recursos disponibles.

Al Lic. Luis Castillo de la Escuela de Física de la Universidad de El Salvador, por compartir sus conocimientos teóricos y prácticos en prospección de suelos; Al Ing. Mauricio López e Ing. Álvaro Ibarra, de Grupo CEL, por el apoyo en los trabajos de campo. Agradecemos enormemente al Ing. Jorge Basagoitia por su dedicación a las gestiones necesarias para que las actividades se llevaran de la mejor manera y por su empeño en que nuestro conocimiento y experiencia en campo se enriqueciera grandemente.

Finalmente, pero no menos importante, agradecemos en gran manera al Lic. Salvador Handal, por su apoyo incondicional en nuestro trabajo, por estar pendiente siempre de nuestros avances, por sus consejos y por tener el cuidado que siempre tuviéramos lo necesario para llevar a cabo cada una de nuestras actividades y las aprovecháramos para nuestro crecimiento profesional.

Walter Pérez, Christian Serrano, Oscar Surio

INDICE

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	XIII
ABSTRACT	XV
OBJETIVOS.....	XVI
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	1
1.3 Justificación.....	2
1.4 Alcances y Limitaciones	2
1.5 Metodología de Investigación.....	3
1.6 Definiciones	4
1.7 Normas aplicables	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	8
2.1 Objetivos de los Sistemas de Puesta a Tierra.....	8
2.2 Requerimientos básicos.....	8
2.3 Necesidad de las mediciones de los parámetros.....	10
2.3.1 Resistencia de puesta a tierra.....	10
2.3.2 Potenciales superficiales.....	11
2.4 Objetivos de las mediciones.....	12
2.4.1 Medición de resistividad de la tierra	12
2.4.2 Medición de la resistencia de puesta a tierra	13
2.4.3 Medición de la impedancia y potenciales superficiales	13
2.5 Resistividad del suelo.....	13
2.5.1 Principios de prospección eléctrica	14
2.5.2 Resistividad aparente.....	15
2.5.3 Tipos de prospecciones para mediciones de resistividad	16
2.5.3.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV).....	17
2.5.3.2 Calicatas eléctricas.....	18

2.5.3.3 Tomografía eléctrica resistiva.....	18
2.5.4 Métodos de medición de resistividad del suelo.....	21
2.5.4.1 Método de tres puntos o Método de variación de profundidad.....	21
2.5.4.2 Método de cuatro puntos.....	22
2.5.4.3 Sitios recomendados para realizar mediciones (MOTOROLA STD R56) ...	25
2.5.5 Ventajas y desventajas de los métodos de medición de resistividad del suelo ..	26
2.5.6 Modelado del terreno.....	28
2.5.7 Factores que afectan la resistividad del suelo	29
2.5.8 Factores que afectan la medición de resistividad del suelo.....	29
2.6 Resistencia de puesta a tierra	30
2.6.1 Métodos de medición de resistencia de puesta a tierra	31
2.6.1.1 Método de dos puntos	31
2.6.1.2 Método de tres puntos	31
2.6.1.3 Método de caída de potencial.....	32
2.6.1.4 Método de Clamp-on	34
2.6.1.5 Método de la pendiente (Variante de caída de potencial)	37
2.6.1.6 Medición en sistemas de puesta a tierra en servicio (Corrección para el método de caída de potencial).....	38
2.6.1.6 Método alternativo para la medición de grandes sistemas de puesta a tierra (Soto Ortiz & García González, 2005)	39
2.6.2 Factores que afectan el valor de la resistencia de PAT	39
2.6.3 Factores que afectan las mediciones de la resistencia de PAT después de ser instalada.....	40
2.7 Potenciales superficiales	40
2.7.1 Elevación de potencial de tierra (GPR).....	40
2.7.2 Potencial de toque	41
2.7.3 Potencial de paso.....	41
2.7.3 Factores que afectan el valor de los potenciales superficiales	41
2.7.4 Métodos de medición de potenciales superficiales	41
2.7.4.1 Falla preparada.....	41

2.7.4.2	Falla a bajo voltaje	42
2.7.4.3	Medición con un telurómetro convencional.....	43
2.7.4.4	Medición con un multímetro de tierra basado en computadora.....	44
2.7.4.5	Medición del GPR.....	46
CAPÍTULO 3: MANUAL DE PRUEBAS		48
3.1	Condiciones de seguridad para las mediciones	48
3.1.1	Precauciones generales.....	48
3.1.2	Equipo de protección personal	50
3.2	Criterios para la selección de equipo de medición.....	51
3.3	Procedimiento de mediciones.....	53
3.3.1	Resistividad del suelo.....	53
3.3.1.1	Método de cuatro puntos (Wenner y Schlumberger).....	53
3.3.1.2	Tomografía eléctrica resistiva.....	55
3.3.1.4	Procedimiento para el modelado de terreno.....	57
3.3.2	Resistencia de puesta a tierra.....	63
3.3.2.1	Método de dos puntos	65
3.3.2.2	Método de caída de potencial (62%).....	66
3.3.2.3	Método de caída de potencial completo.....	67
3.3.2.4	Método de clamp-on	69
3.3.2.5	Método de caída de potencial/Clamp-on (Torres de transmisión).....	70
3.3.2.6	Método de la pendiente	71
3.3.2.7	Método de medición de sistemas de puesta a tierra en servicio.....	74
3.3.2.8	Método alternativo para la medición de grandes sistemas de puesta a tierra.....	75
3.3.3	Potenciales superficiales.....	77
3.3.3.1	Método con telurómetro convencional	77
3.3.3.2	Cálculo del GPR.....	80
3.4	Soluciones prácticas a errores comunes	80
CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE CASOS		82
4.1	Equipo de medición.....	82
4.2	Sitios de mediciones.....	83

4.3 Mediciones de resistividad de suelo.....	84
4.3.1 Metodología.....	84
4.3.2 Pasos para realizar mediciones.....	84
4.3.3 Resultados de mediciones	84
4.3.4 Modelado de terreno.....	92
4.3.5 Análisis de resultados.....	108
4.4 Mediciones de resistencia de puesta a tierra	109
4.4.1 Metodología.....	109
4.4.2 Pasos para realizar mediciones.....	109
4.4.3 Resultados de mediciones	109
4.4.4 Análisis de resultados.....	121
4.5 Mediciones de potenciales superficiales	122
4.4.1 Metodología.....	122
4.4.2 Pasos para realizar mediciones.....	122
4.4.3 Resultados de mediciones	123
4.4.4 Análisis de resultados.....	127
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	129
BIBLIOGRAFÍA	132
ANEXOS	134
ANEXO A Formatos de campo	134
ANEXO B: Procedimiento utilizado para las mediciones de campo en terrenos, subestaciones y torres de transmisión.	146
ANEXO C: Determinación de S_f y cálculo de radio de hemiesfera equivalente para corrección de medición tomada en una subestación en servicio.	149
ANEXO D: Ejemplo de aplicación del método gráfico de Sunde para modelado de suelo de dos capas	152
ANEXO E: Ejemplo de aplicación del método de Box Cox para modelado de suelo homogéneo	156
ANEXO F. Modelado de suelo de dos capas por el método analítico de la pendiente más inclinada.	158

ANEXO G: Diseño de red de tierra para una torre arriostrada de medición de recurso eólico.	
161	
ANEXO H Propuesta de red de tierra de pruebas para la escuela de ingeniería eléctrica ues.	
171	
ANEXO I Datos de equipos usados en las mediciones.....	173
ANEXO J: Fotografías de las mediciones realizadas a lo largo del presente trabajo de graduación.....	174

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Distribución de gradiente de voltaje y potenciales de toque y paso</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2: a) principio de prospección. b) medición de potenciales debido a corrientes inyectadas.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3: Suelo heterogéneo. Resistividad aparente es el “promedio” de las resistividades presentes.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4: Líneas de corriente y equipotenciales presentes en el momento de la medición.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5: Esquema simplificado de una calicata eléctrica.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 6: Distribución de los electrodos de prueba para una tomografía eléctrica resistiva.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 7: Equipo tradicional para realizar una tomografía eléctrica resistiva.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 8: Resultado de una tomografía. Las resistividades se aprecian en un modelo 2D.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9: Método de tres puntos o variación de profundidad.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10: Arreglo Wenner.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11: Arreglo Schlumberger.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12: Direcciones recomendadas para realizar mediciones de resistividad.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 13: Descripción del método de dos puntos con equipo especializado.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14: Método de tres puntos.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15: Método de caída de potencial.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16: Superposición de los gradientes de potencial.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17: Curva de resistencia vs distancia del electrodo en estudio y electrodo de potencial. No hay superposición de gradientes de potencial.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 18: Medición con Clamp-On.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 19: Incorrecta aplicación del método con Clamp-On para medición de impedancia de tierra.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 20: Método de caída de potencial/Clamp-On para la medición de resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 21: Modelo utilizado para la corrección del valor medido de la resistencia de puesta a tierra por el método de caída de potencial.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 22: Falla a bajo voltaje o inyección de corriente</i>	<i>42</i>
<i>Figura 23: Ubicación de sondas de medición del telurómetro para medición de potenciales de toque y paso.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 24: Ubicación de electrodo de referencia para medición del GPR.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 25: Resultado esperado del modelado de 2 capas</i>	<i>59</i>
<i>Figura 26: Gráfica de Sunde</i>	<i>61</i>
<i>Figura 27: Flujograma para modelado de suelos de dos capas</i>	<i>64</i>
<i>Figura 28: Esquema de conexión para medición de resistencia de la unión de puesta a tierra (Con clamp y telurómetro)</i>	<i>78</i>
<i>Figura 29: Esquema de conexión para medición de potenciales de toque y paso</i>	<i>79</i>
<i>Figura 30: Tomografías resultantes Candelaria de la Frontera.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 31: Comparación de perfiles de resistividad del predio baldío UES con diferentes arreglos de electrodos</i>	<i>86</i>
<i>Figura 32: Comparación de perfiles de resistividad del terreno de construcción Centro Comercial Santa Rosa con diferentes arreglos de electrodos.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 33: Perfiles de resistividad aparente en dos sitios diferentes en Ciudad Corinto, Mejicanos</i>	<i>88</i>
<i>Figura 34: Perfiles de resistividad aparente en terreno de Subestación 1</i>	<i>89</i>
<i>Figura 35: Perfil de resistividad aparente en terreno cercano a subestación 2</i>	<i>90</i>
<i>Figura 36: Perfil de resistividad en terreno cercano a subestación 3.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 37: Tomografía eléctrica resultante en Cerro La Cuchilla, Metapán.....</i>	<i>91</i>

<i>Figura 38: Tomografía eléctrica resultante en Cantón Malpaso, Metapán</i>	<i>92</i>
<i>Figura 39: Resultados de modelado por software para terreno de construcción de Centro Comercial Santa Rosa, Santa Tecla.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 40: Resultados de modelado por software para terreno en Ciudad Corinto, Mejicanos.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 41: Resultados de modelado utilizando el método gráfico de Sunde para el terreno cercano a subestación 1.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 42: Resultados de modelado por software para terreno cercano a subestación 1</i>	<i>104</i>
<i>Figura 43: Resultados de modelado utilizando el método gráfico de Sunde para cancha cercana a la Subestación 3.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 44: Resultados de modelado por software para terreno cercano a subestación 2</i>	<i>107</i>
<i>Figura 45: Punto de prueba para medición de resistencia de puesta a tierra en subestación 1.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 46: Perfil de caída de potencial completo subestación 1</i>	<i>110</i>
<i>Figura 47: Corrección por medición en subestación 1 en servicio.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 48: Punto de prueba para medición de resistencia de puesta a tierra en subestación 2.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 49: Perfil de caída de potencial completo subestación 2</i>	<i>113</i>
<i>Figura 50: Corrección por medición en subestación 2 en servicio.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 51: Puntos de medición de resistencia de puesta a tierra y trayectoria de electrodos auxiliares en Subestación 3</i>	<i>116</i>
<i>Figura 52: Perfil de caída de potencial completo subestación 3 punto de medición 2.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 53: Perfil de caída de potencial completo subestación 3 punto de medición 3.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 54: Corrección por medición en la subestación 3 en servicio.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 55: Identificación de estructuras y puntos de medición de potencial de toque en subestación 1.</i>	<i>124</i>
<i>Figura 56: Puntos de medición de potenciales de toque en subestación 2.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 57: Gradiente de potencial hacia el exterior de la red de tierra desde la estructura D.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 58: Gradiente de potencial hacia el interior de la red de tierra desde la estructura E.....</i>	<i>126</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Valores recomendados de la resistencia de puesta a tierra de sistemas eléctricos</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 2: Valores recomendados de la resistencia de puesta a tierra para subestaciones</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 3: Diferentes combinaciones del arreglo Wenner.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4: Ventajas y desventajas de los métodos de medición de resistividad del suelo.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 5: Cuadro de ventajas del arreglo Wenner y Schlumberger.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6: Ventajas y desventajas de los métodos de medición de potencial superficiales.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 7: EPP requerido para llevar a cabo mediciones de resistencia de puesta a tierra</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8: Coeficientes del método de la pendiente</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 9: Ejemplo de valores de corriente de cortocircuito en una subestación</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 10: Equipos y accesorios a utilizar</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 11: Descripción y mediciones llevadas a cabo por sitio</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 12: Puntos de resistividad aparente obtenidos en predio baldío UES.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 13: Puntos de resistividad aparente obtenidos terreno de construcción Cenro Comercial Santa Rosa</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 14: Puntos de resistividad aparente obtenidos en Ciudad Corinto, Mejicanos por el arreglo Wenner.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 15: Puntos de resistividad aparente obtenidos en terreno cercano a subestación 1 por el arreglo Wenner.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 16: Puntos de resistividad aparente obtenidos en terreno cercano a subestación 2</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 17: Puntos de resistividad aparente obtenidos en terreno cercano a subestación 3</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 18: Resultados de modelado de suelo por método BOX COX para predio baldío UES.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 19: Resultados del método BOX COX en cancha de BKB, Ciudad Corinto</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 20: Resultados del método BOX COX terreno cercano a Subestación 2</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 21: Mediciones de resistencia PAT, método de caída de potencial completo en subestación 1</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 22: Comparación de resultados obtenidos con diferentes</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 23: Aplicación del método de caída de potencial en subestación 1.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 24: Comparación de mediciones de resistencia de puesta a tierra en torre de transmisión en subestación 1</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 25: Aplicación del método de caída de potencial completo en subestación 2.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 26: Aplicación del método de caída de potencial en subestación 2.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 27: Aplicación del método de la pendiente en subestación 2</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 28: Resultados punto de medición 1 en Subestación 3.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 29: Resultados punto de medición 2 en Subestación 3.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 30: Resultados punto de medición 3 en Subestación de 3.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 31: Comparación del método de caída de potencial a diferentes distancias de electrodos auxiliares en Subestación 3</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 32: Resultado del método de caída de potencial para el punto de medición 3 en subestación 3.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 33: Resultado del método de la pendiente para el punto de medición 3 en subestación 3</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 34: Resultado de medición de resistencia de puesta a tierra en torre de transmisión L7-21-34 cercana a subestación 3.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 35: Corrientes de Cortocircuito para la subestación 1.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 36: Resultados de potenciales de paso en la subestación</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 37: Corrientes de Cortocircuito para la subestación 2 (Valores de Prueba)</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 38: Resultados de potenciales de paso en la subestación</i>	<i>124</i>

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de puesta a tierra son elementos primordiales en la seguridad de los equipos y personas que operan o utilizan los sistemas eléctricos, ya sea en transmisión, generación o distribución de la energía. Estos sistemas se diseñan tomando como criterio valores recomendados de resistencia de puesta a tierra, voltajes superficiales y prácticas recomendadas para equipotenciar las instalaciones, haciendo estudios previos entre los cuales están las mediciones de resistividad del suelo.

Estos valores de diseño deberían ser monitoreados después de la instalación del sistema, y mediante un programa de mediciones basados en metodologías bajo norma, corroborar que estos cumplen con los requerimientos de seguridad y valores recomendados para un buen funcionamiento del sistema.

Este trabajo presenta las metodologías con las cuales se hacen estas mediciones antes y después de la instalación de un sistema de tierras, enfocada a subestaciones y torres de transmisión. No obstante, estas metodologías se pueden aplicar a subestaciones de distribución, siempre que las condiciones lo permitan. Las metodologías están basadas en la norma IEEE std 81 2012 como eje principal y también se han utilizado criterios de otras normas internacionales y artículos técnicos relacionados con el tema de mediciones de los parámetros de redes de tierras.

Se presentan los estudios de casos en los que se ha puesto en práctica la metodología para la medición de los valores en estudio. Estas prácticas fueron hechas en subestaciones y torres de transmisión para medición de resistencia de puesta a tierra y potenciales superficiales, así como mediciones de resistividad en diversos terrenos para la medición de la resistividad eléctrica del suelo, la cual sirve para el diseño de la red de tierra de todo sistema eléctrico.

Se muestran las comparaciones de resultados entre distintos métodos; para el caso de resistividad se presenta además, resultados en diferentes programas de análisis y un algoritmo basado en la norma en estudio, para modelado de terrenos en dos capas.

Se espera que este manual de mediciones pueda ser aplicado para modelar terrenos en base a mediciones de resistividad y a comprobar que las redes de tierra sigan cumpliendo de la mejor manera su funcionamiento y que ayuden a detectar problemas o valores fuera del rango recomendado, ya que repercute como se mencionó, en la seguridad de las personas y equipos.

ABSTRACT

Grounding systems are essential elements in the safety of equipment and people that operate or use electrical systems, either in transmission, generation or distribution of electrical energy. These systems are designed using recommended criteria of grounding resistance, surface potentials and recommended practices for bonding, with previous studies made such as measurements of soil resistivity.

These design values should be monitored after installation of the system, and through a scheduled program of measurements based on standard methodologies, confirm that they comply with safety requirements and recommended values for good system performance.

This paper presents the methods with which these measurements were made before and after the installation of a grounding system, focusing on substations and transmission towers. However, these methodologies can be applied to distribution substations, whenever conditions allow. The methodologies are based on the IEEE std 81-2012 as the main axis and criteria have also been used from other international standards and technical articles related to the topic of measurements of grounding systems parameters.

Study cases in which is implemented the measuring methods of the parameters on study are presented. These practices were made in substations and transmission towers to obtain grounding resistance measurements, surface potentials and resistivity measurements in various fields to measure the electrical resistivity of the soil, which is used for the design of the grounding system of all electrical installation.

Comparisons of results between different methods are shown; in the case of resistivity results, different software's results and an analysis and study based on an algorithm presented in the standard for two-layer terrain modeling are also presented.

It is hoped that this measurements handbook can be applied to model terrains based on resistivity measurements and check that grounding systems continue to meet in the best way its functionality and to help problem detection or values outside the recommended ranges, since it affects, as mentioned, in the safety of people and equipment.

OBJETIVOS

General

- Elaborar un manual que describa los pasos para la medición de la resistencia e impedancia de la red de tierra, resistividad del suelo y los potenciales superficiales de líneas y subestaciones eléctricas aplicando la norma IEEE Std 81.

Específicos

- Estudiar los métodos que existen para la medición de los parámetros de redes de tierra, ya sea para el diseño o para el análisis de una instalación eléctrica en funcionamiento.
- Elaborar una guía de selección y entrenamiento sobre el uso de equipos de medición según los requerimientos descritos en las metodologías propuestas por la norma IEEE Std 81.
- Identificar errores que se cometen al momento de realizar las mediciones mediante los diferentes métodos para cada parámetro proponiendo una o varias soluciones para los mismos.
- Realizar estudios de casos como mediciones de resistividad de terrenos y medición de parámetros de redes de tierra en subestaciones a fin de aplicar las metodologías presentadas.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

En nuestro país, hasta el momento, no existe una metodología que muestre los pasos a seguir para hacer mediciones de resistencia e impedancia de la red de tierra y los voltajes superficiales de acuerdo a un estándar. La norma IEEE Std 81 presenta una metodología para efectuar dichas mediciones y será la que se tomará como referencia, junto con otras existentes, para el presente estudio. El acuerdo 29-E-2000, Normas Técnicas de Diseño, Seguridad y Operación de las Instalaciones de Distribución Eléctrica de la SIGET establece los criterios de diseño y resistencias máximas de puesta a tierra tomando como referencia la norma IEEE Std 80 que se refiere a *Guía para la seguridad de la puesta a tierra de subestaciones de corriente alterna*, y cuyo enfoque no son las líneas de transmisión, pero si involucra las subestaciones. Hay procedimientos que no se realizan de rutina en las subestaciones y que es necesario hacerlos, tales como: las mediciones de voltaje de toque y de paso. Las investigaciones previas generalmente se basan en el diseño de las redes de tierra, pero la metodología para comprobar los valores de resistencia y demás parámetros no está dada. De igual manera esos estudios servirán de referencia para desarrollar el manual del que se habla en el presente documento.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La SIGET en el acuerdo 29-E2000, ha establecido los valores máximos de la resistencia de una red de tierra de acuerdo a la capacidad en MVA de la instalación eléctrica y el valor máximo del GPR. De acuerdo al estándar IEEE 80, existen condiciones de diseño en los valores de los potenciales de paso y de contacto como también del GPR. Para lo cual es necesario realizar mediciones bajo una metodología que garantice la validez de los resultados obtenidos de estos parámetros. En el país las mediciones se realizan sin seguir un estándar, por lo cual existe incertidumbre de que los resultados garanticen los niveles de seguridad requeridos por la normativa regulatoria aplicada.

El problema central es que en el país no existe una norma o reglamento con una metodología para la medición de los parámetros de la red de tierra de líneas y subestaciones eléctricas, lo que puede provocar una medición errónea al usar métodos no estandarizados o en el peor de los

casos que las mediciones no se hagan y no se tenga el control de la variabilidad de estos parámetros a lo largo del tiempo.

La problemática será resuelta al presentar un método bajo una norma específica, la IEEE std 81, para las mediciones de los parámetros de las redes de tierra. El procedimiento se respaldará mediante estudios de campo, mediciones de resistividad de un terreno y su modelado; mediciones en torres y subestaciones eléctricas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La seguridad del personal, la integridad de los equipos de potencia, de comunicación y de electrónica sensible que se operan o se instalan cerca de las torres y subestaciones de transmisión, se ven amenazados por la incorrecta implementación del sistema de puesta a tierra, y es que el diseño de los esquemas de protección requiere un valor máximo de la resistencia de tierra que garantice el correcto funcionamiento de éstas. Por lo cual es necesario seguir una metodología en cumplimiento de un estándar tal como la norma IEEE Std 81 para asegurar que la instalación de la red de tierra cumpla con los requerimientos establecidos. Antes de realizar un diseño de una red de tierra es necesario conocer los parámetros de resistividad del suelo e incluso llevar a cabo el modelado del terreno. Es por ello que se hace necesario crear una guía con los pasos para medir los parámetros reales con los que actualmente están trabajando los equipos mencionados.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

Se pretende hacer el estudio de caso en torres y subestaciones de transmisión, bajo la norma IEEE Std 81 para luego ser analizadas y verificar y comprobar si el sistema de red de tierra en estudio es confiable en términos de seguridad, de ser necesario dicho estudio podría ampliarse a algunas de las subestaciones que ETESAL ponga a disposición para realizar las pruebas, luego de comprobar la factibilidad por parte de esta entidad. El contenido del manual podrá ser utilizado en todas las torres y subestaciones de transmisión actualmente instaladas y las que se instalarán en un futuro. Se harán mediciones de resistividad del terreno y su modelado, utilizando los diferentes métodos y haciendo una comparativa entre ellos permitiendo elegir los que mejor se adecuen a las aplicaciones de sistemas de puesta a tierra.

Las limitaciones de la investigación son el tiempo que conllevan los permisos a los diferentes lugares para mediciones, como por ejemplo las subestaciones eléctricas puesto que para realizar el trabajo de campo no se pueden desenergizar y se debe esperar a que estas unidades salgan a mantenimiento o hacerlo con medidas de seguridad más rigurosas. Así también el tiempo para obtener los equipos que se ocuparán. La seguridad del equipo de investigación al hacer mediciones de resistividad eléctrica en diferentes tipos de suelo también debe ser garantizada a la hora de hacer la toma de mediciones en distintos lugares.

1.5 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El trabajo de investigación está estructurado en distintas etapas con las cuales se busca darle solución a la problemática presentada. Será realizado de manera teórica y con trabajo de campo para comprender las metodologías que presentan las normas que se estudiarán y la que se toma como base para la realización del manual. Este trabajo de campo será hecho en la Universidad de El Salvador y se complementa con el apoyo de algunas instituciones que han accedido a colaborar con el grupo de investigación.

El trabajo de graduación se llevará a cabo con la realización de las siguientes actividades:

1. Lectura de las normas que tratan la temática planteada. Tomando de cada una los tópicos más importantes y haciendo una comparación entre ellas, conociendo la metodología que mejor se adapte al objetivo de estudio.
2. Investigación sobre los equipos que se utilizan en las mediciones de los parámetros en estudio, leyendo los instructivos del fabricante y poder aplicar los pasos en la creación del manual.
3. Realizar trabajo de campo que incluye mediciones de resistividad de distintos terrenos y su modelado. Mediciones de resistencia de puesta a tierra y potenciales superficiales de subestaciones y líneas eléctricas de transmisión, utilizando los métodos descritos en la norma y aplicar métodos alternativos que sugieren algunos papers o documentos técnicos.
4. Analizar la información obtenida en el trabajo de campo y contrastarla con la teoría que se explica en las normativas, con el objetivo de dejar plasmado en el manual todos los aspectos que puedan influir en los resultados obtenidos en la práctica.

1.6 DEFINICIONES

Conductor de puesta a tierra: Conductor utilizado para conectar un equipo o el circuito de tierra, al electrodo o a los electrodos de tierra de la instalación.

Contrapeso (Protección contra rayos): Es un conductor o conjunto de conductores que se encuentran por debajo de una línea de transmisión o distribución, bajo la superficie del suelo y que está conectado al sistema de tierras de la línea o a las torres de soporte para protegerlas contra las descargas de los rayos.

Electrodo de tierra: Es un conductor o conjunto de conductores incrustados en la tierra que se utiliza para drenar las corrientes de falla a tierra. Es también un cable que permita la unión de dos partes del sistema para mantenerlos al mismo potencial.

Elevación del potencial de tierra (GPR): El máximo potencial eléctrico que un electrodo de tierra, malla o sistema puede alcanzar con respecto a un punto distante de tierra asumido a ser el potencial de tierra remota. Elevación de voltaje debido a fallas en el sistema y por la configuración de la conexión de los cables de neutro al sistema de tierra.

Falla a tierra: Es una conexión no intencional entre un conductor activo de un circuito y los conductores que normalmente no conducen corriente, las envolventes metálicas, canalizaciones metálicas, equipo metálico o tierra.

Impedancia de tierra: El vector suma de la resistencia y la reactancia entre un electrodo de tierra, rejilla o sistema y la tierra remota.

Curva de gradiente de potencial: Es una gráfica del potencial de un sistema como función de la distancia a lo largo de una ruta especificada.

Perfil del suelo estratificado: Es la representación esquemática de la sección transversal del suelo en una localización donde se conoce su conformación por superposición de capas de diferente resistividad y espesor.

Potencial de toque o contacto: La diferencia de potencial entre el aumento potencial de tierra (GPR) de una red o sistema de puesta a tierra y el potencial de superficie en la que una persona

puede estar de pie, mientras que al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura u objeto conectado a tierra. Las mediciones del voltaje de toque pueden ser en "circuito abierto" (sin la resistencia del cuerpo equivalente incluido en el circuito de medición) o en "circuito cerrado" (con la resistencia del cuerpo equivalente incluido en el circuito de medición).

Potencial de paso: La diferencia de potencial de superficie que podría ser experimentado por una persona a una distancia de 1 metro con los pies sin hacer contacto con cualquier objeto conectado a tierra.

Profundidad de exploración: Es el alcance eficaz de las medidas de Resistividad del Suelo, es aproximadamente el doble de la profundidad del Electrodo Piloto (Método de los tres puntos) o de la distancia de los Electrodos de Medida (Método de Wenner).

Resistividad del suelo: Es la resistencia eléctrica específica de un material, medida en ohmios por metro. Es la constante de proporcionalidad entre la caída de potencial por unidad de longitud y la densidad de corriente.

Resistividad aparente del suelo: La resistividad global de un volumen de suelo con diferentes propiedades. Es la que se obtiene en el trabajo de campo aplicando los diferentes métodos de medición.

Resistencia de tierra: La impedancia, con exclusión de reactancia, entre un electrodo de tierra, rejilla o el sistema y la tierra remota. Es de tomar en cuenta que a veces se refiere a impedancia de tierra como resistencia de tierra si la parte reactiva de la impedancia se considera insignificante.

Resistencia de dispersión de un electrodo de puesta a tierra: Es la resistencia entre el electrodo de tierra y la tierra remota.

Resistencia mutua de los electrodos de puesta a tierra: Es igual a la variación de voltaje en un electrodo producido por un cambio de la corriente en otro electrodo y se expresa en ohmios.

Tierra (sistema de tierra): Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por el cual un circuito eléctrico o un equipo está conectado a tierra o a algún cuerpo conductor de medida relativamente grande que cumple la función de tierra.

Tierra remota: Es un concepto teórico que se refiere a un electrodo de tierra con impedancia cero ubicado a una distancia infinitamente lejana de la tierra bajo prueba. En la práctica, se aproxima a la tierra remota cuando la resistencia mutua entre la tierra bajo prueba y el electrodo de prueba es despreciable. La tierra remota se considera normalmente a un potencial de cero.

1.7 NORMAS APLICABLES

Dentro de la biblioteca de normas y estándares que se dedican a la puesta a tierra de sistemas eléctricos, están las del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, en una de las cuales se basa la investigación. Sin embargo, no está demás conocer otros estándares que también describen metodologías de diseño y medición de estos sistemas, en los que la seguridad del personal y del equipo es prioridad, además del buen funcionamiento de los sistemas eléctricos ya sea en Generación, Transmisión y Distribución de la energía; y en el uso que se le da en el sector industrial, comercial, gubernamental y residencial.

Algunas de estas normas consultadas se listan a continuación:

IEEE STD 81-1983 y 2012 "Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System": Es la guía que se tomará de base en el trabajo. Presenta las prácticas y técnicas recomendadas para la medición de las características eléctricas de los sistemas de Puesta a Tierra.

IEEE STD 80-2000 "Guide for Safety in AC Substation Grounding": Es una guía que provee la información pertinente sobre las prácticas de seguridad recomendadas para el diseño de la puesta a tierra de Subestaciones AC.

IEEE STD 142-2007 Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. Describe las prácticas correctas para la conexión de los sistemas comerciales e industriales, para los diferentes equipos que operan en ella. Se toman algunos conceptos de esta norma.

ESPECIFICACIÓN 00J00-52 Comisión Federal de Electricidad: “Red de Puesta a Tierra Para Estructuras de Líneas de Transmisión Aéreas de 69kV a 400kV En Construcción”: Muestra los criterios de diseño de líneas de transmisión y algunos métodos de medición de los parámetros de redes de tierra para estos sistemas.

MOTOROLA R56 “Standards and Guidelines For Communication Sites” Norma aplicada para la puesta a tierra de sistemas de comunicación. Muestra la metodología de diseño y comprobación de la resistencia de puesta a tierra de estos sistemas. Sugerencias para las mediciones de resistividad del suelo y su modelado.

ASTM G57-95a: Es el estándar que rige las mediciones de campo de la resistividad del suelo mediante el método de Wenner o de los cuatro puntos. Presenta la forma correcta de realizarlas y sus esquemas.

ASTM D3633-98: Es un estándar que muestra cómo medir la resistividad del suelo cuando es imposible hacerlo directamente en este por la presencia de pavimentos de gran extensión y se quiere evitar romper el concreto para clavar los electrodos de prueba.

NEC 2007: Código Eléctrico Nacional. Se toman las recomendaciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos y conceptos básicos relacionadas con este.

EPM RA6-014 Medida de resistividad eléctrica de suelo. Norma Colombiana que describe los métodos a seguir para la medición de la resistividad del suelo.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Los Sistemas de puesta a tierra son una parte imprescindible de todo sistema eléctrico en cualquiera de sus niveles: Generación, Transmisión y Distribución de la energía, pues es el que protege al sistema, personas y equipos conectados. Desde su diseño e implementación hasta su mantenimiento se deben seguir las normas correspondientes que garanticen el cumplimiento de los principales objetivos de las puestas a tierra. Se enumeran pues, estos objetivos.

2.1 OBJETIVOS DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

- Limitar el voltaje debido a rayos, sobrevoltajes transitorios y por contacto accidental con líneas de alto voltaje.
- Estabilizar el voltaje durante operaciones normales
- Facilitar la operación de las protecciones del circuito (NEC, 2007)

2.2 REQUERIMIENTOS BÁSICOS

Todo sistema de puesta a tierra necesita cumplir algunos requerimientos para que cumpla con los objetivos planteados. Estos son:

PRESENTAR UNA BAJA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA: Esto previene que existan potenciales peligrosos durante una falla. Los valores recomendados por las normas según el tipo de instalación se presentan en la tabla 1.

Los valores requeridos por la SIGET en el acuerdo 29-E-2000, cuyo valor de resistencia de puesta a tierra depende de la capacidad de la subestación, se presentan en la tabla 2.

GARANTIZAR BAJOS POTENCIALES SUPERFICIALES DENTRO DE LA INSTALACIÓN: En las normas IEEE 80, 142 y Acuerdo 29-E-2000 no se presenta un valor máximo para potenciales de toque y paso a excepción de los siguientes criterios de diseño $E_{malla} < E_{toque\ tolerable}$ y $E_{paso} < E_{paso\ tolerable}$. Mientras que para el GPR se toma un valor de 5000V máximo referenciados al Código Eléctrico Canadiense. Este valor se establece buscando la seguridad de las personas dentro de la subestación o en contacto con la valla perimetral.

Tipo de instalación eléctrica	Resistencia de Puesta a Tierra [Ohmios]
Subestaciones de gran tamaño (20,000m ²) y de Transmisión	1 o menos
Subestaciones de plantas industriales, edificios e instalaciones comerciales grandes y subestaciones pequeñas.	Rango de 1 a 5
Electrodos individuales (Residenciales)	25
Torres de transmisión individuales	10

Tabla 1: Valores recomendados de la resistencia de puesta a tierra de sistemas eléctricos

Capacidad de la Subestación [MVA]	Resistencia de la Red de Tierra [Ohmios]
≤0.05	12
0.05-0.1	6
0.1-0.5	2
0.5-1	1.5
1-50	1
50-100	0.5
>100	0.2

Tabla 2: Valores recomendados de la resistencia de puesta a tierra para subestaciones

ESTABLECER CONEXIONES EQUIPOTENCIALES: Toda estructura metálica conductiva expuesta que puede ser tocada por una persona, se conecta a través de conductores de conexión eléctrica. La mayoría de los equipos eléctricos se aloja en el interior de cubiertas metálicas y si un conductor energizado llega a entrar en contacto con éstas, la cubierta también quedará temporalmente energizada. La conexión eléctrica es para asegurar que, si tal falla ocurriese, el potencial sobre todas las estructuras metálicas conductivas expuestas sea virtualmente el mismo. Existen pruebas de continuidad que se realizan para corroborarla, la cual

se puede ver alterada por la corrosión, que afecta el acoplamiento perfecto de los elementos, entre otras causas.

SUFICIENTE CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN EFECTIVA DE LA CORRIENTE DE FALLA: esto es el efecto de poseer una baja impedancia. El sistema debe ser capaz de permitir que la corriente regrese a su origen de una forma controlada, es decir que se disipe y que permita la actuación de los sistemas de protección. Este camino de retorno debe ser tal que se eviten lesiones a las personas o daños en los equipos. El valor de la impedancia debe diseñarse para tal fin, tomando en cuenta el tipo de instalación y las frecuencias que maneja.

2.3 NECESIDAD DE LAS MEDICIONES DE LOS PARÁMETROS

2.3.1 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Antes que una instalación eléctrica entre a servicio, generalmente se hace una medición de la resistencia de puesta a tierra y si se trata de subestaciones, se hacen las mediciones de los potenciales superficiales para corroborar que cumplen con los valores de diseño, puesto que los modelos de cálculo no consideran los factores que inciden directamente en la resistencia del sistema, como la humedad y temperatura del terreno. Esta medición es la única manera de saber su valor real. (IEEE Std 142, 2007).

Ya en servicio, es necesario hacer pruebas periódicas para corroborar que el sistema de puesta a tierra sigue en condiciones óptimas de trabajo, y prestando seguridad a las personas y equipos. Después de la instalación de una subestación u otra estructura puesta a tierra, el asentamiento de la tierra con los cambios climáticos cíclicos anuales tiende a reducir la impedancia de tierra durante el primer año o dos. Para grandes sistemas de puesta a tierra se ha determinado que hasta en un periodo de 18 años se presenta poca variación en el valor medido inicialmente de la resistencia (IEEE Std 81, 2012). Puede ocurrir también, que la resistencia esté aumentando con el tiempo, para ello son necesarias acciones que tengan la finalidad de devolverle al sistema el valor óptimo para el que fue diseñado. (IEEE Std 142, 2007).

Estas acciones pueden ser, dependiendo de la gravedad de la situación: añadir electrodos a la instalación, sustitución de conexiones que presenten corrosión, aumentar el contenido de humedad y/o el tratamiento químico del suelo. (IEEE Std 142, 2007). Los valores de resistencia bajos son requeridos para mantener a un nivel seguro los potenciales que se puedan dar en caso de falla en instalaciones eléctricas.

Generalmente el valor de la impedancia del sistema es medido sólo en términos de la resistencia debido a que la reactancia se considera despreciable con respecto a esta. La reactancia aumenta con el tamaño del sistema o por conexiones a neutros aterrizados o a los sistemas de blindajes de cables. La determinación de la componente reactiva del sistema es necesaria cuando los análisis son para corrientes transitorias o de impulso, por ejemplo, las descargas atmosféricas.

2.3.2 POTENCIALES SUPERFICIALES

Al ocurrir una falla en una subestación las estructuras metálicas pueden quedar energizadas a una diferencia de potencial peligrosa en caso de no estar aterrizadas correctamente. Aun estando aterrizada, por Ley de Ohm, dada una corriente circulando a través de una resistencia provoca una caída de voltaje en sus extremos, teniendo así el concepto de GPR. A partir de este efecto y la resistencia de tierra circundante en el sistema (IEEE Std 80, 2000) se tienen dos potenciales importantes a la hora de evaluar la seguridad en una subestación (OSHA 1910.269), el potencial de toque y potencial de paso.

Teniéndose una curva de la distribución del gradiente de potencial (figura 1) se puede observar que, a medida se aleja del electrodo de tierra, el potencial medido entre un punto a una distancia x y un punto remoto que se asume a un potencial de 0V, disminuye rápidamente de forma exponencial. Además, tanto el potencial de toque como el de paso dependen directamente de esta curva y del valor de GPR. En este punto surge la necesidad de comprobar que el valor teórico de diseño se cumpla en la práctica para garantizar que el nivel de aislamiento del equipo de protección personal, con el que se esté trabajando dentro de la subestación, sea superior al del voltaje al que se vería sometida una persona.

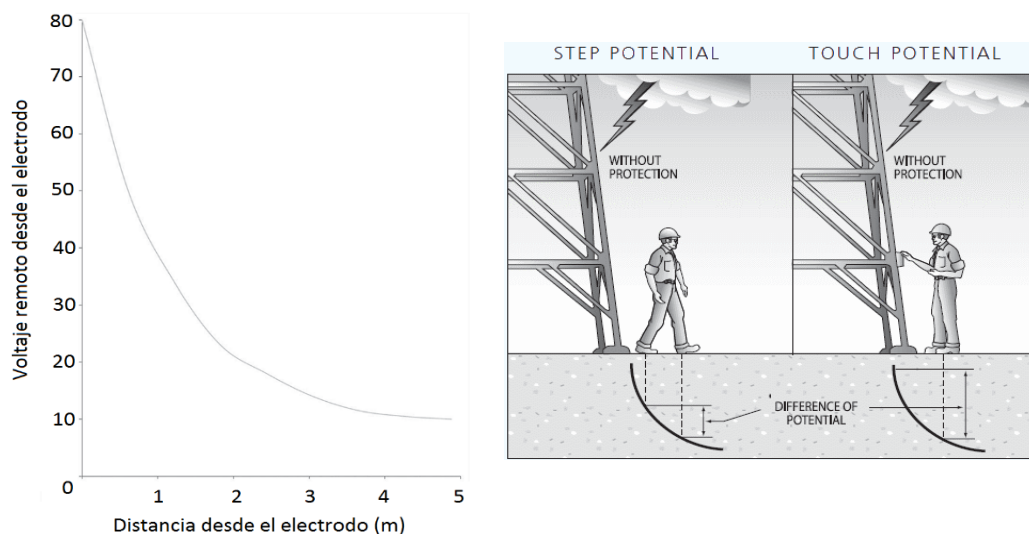


Figura 1: Distribución de gradiente de voltaje y potenciales de toque y paso

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional del gobierno de los Estados Unidos de América, OSHA, exige la determinación de estos potenciales para la determinación del nivel de aislamiento requerido y de ser necesario, la instalación de zonas equipotenciales, por ejemplo, con una malla metálica conectada a una estructura aterrizada.

Usualmente en las subestaciones se utiliza grava para crear una capa superficial con alta resistividad que reduzca significativamente estos potenciales.

2.4 OBJETIVOS DE LAS MEDICIONES

La norma describe los objetivos principales que se desean cumplir cuando se hacen las mediciones de los parámetros de tierra. Pueden ir enfocadas tanto al diseño como al mantenimiento de los sistemas. Para el fin de esta investigación, no se buscará cumplir todos sino los que se apeguen a los alcances del proyecto.

2.4.1 MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE LA TIERRA

- Estimar la resistencia de tierra de un sistema aterrizado
- Estimar los potenciales superficiales incluyendo los voltajes de toque y de paso

- Calcular el acoplamiento inductivo entre circuitos vecinos de potencia y de comunicación.
- Diseñar los sistemas de protección catódica.
- Llevar a cabo estudios geológicos.

2.4.2 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

- Determinar la resistencia actual de un sistema de puesta a tierra
- Como una revisión de los cálculos de diseño
- Determinar la elevación del potencial de tierra (GPR) y su variación a lo largo de un área.
- Determinar la necesidad de una conexión a tierra de protección contra rayos
- Obtener los datos necesarios para el diseño de la protección de edificios, equipos y personal que esté involucrado en lugar en donde está el sistema de puesta a tierra

2.4.3 MEDICIÓN DE LA IMPEDANCIA Y POTENCIALES SUPERFICIALES

- Verificar la adecuación de un nuevo sistema de tierra
- Detectar cambios en un sistema de tierra existente
- Identificar potenciales de toque y paso peligrosos
- Determinar el GPR para diseñar la protección de sistemas de potencia y comunicación.

2.5 RESISTIVIDAD DEL SUELO

Se define como la resistencia específica del suelo o de un estrato de este a una profundidad dada, se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo. Su unidad de medida es el ohmio-metro que corresponde a *la intensidad de un amperio que permite pasar un conductor de sección de un metro cuadrado y longitud de un metro, cuando se le aplica en sus caras opuestas una diferencia de potencial de un voltio* (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, 2013). Es el valor con el cual se diseñan las redes de puesta a tierra de un sistema eléctrico. De ahí la importancia de conocerla. La resistividad se obtiene con el uso de métodos

de prospección del suelo mediante la inyección de corriente continua que se basan en los principios físicos que se describen a continuación.

2.5.1 PRINCIPIOS DE PROSPECCIÓN ELÉCTRICA

Los métodos de prospección eléctrica en corriente continua se fundamentan en la teoría general del campo eléctrico estacionario y se basan en detectar los efectos superficiales que produce el flujo de una corriente eléctrica, natural o inducida, por el subsuelo. Se sabe que todo material tiene cierto grado de conductividad, la cual es inversa a la resistividad. Este parámetro es la constante de proporcionalidad que relaciona la corriente que circula a través de un material cuando se le aplica un voltaje, lo cual corresponde con la Ley de Ohm. Pero para el caso de los estudios de suelo por métodos geoelectrónicos es necesario determinar una magnitud física independiente del volumen de la muestra bajo prueba. Primeramente, se asume una muestra homogénea e isotrópica con una longitud L y una sección transversal A (figura 2a).

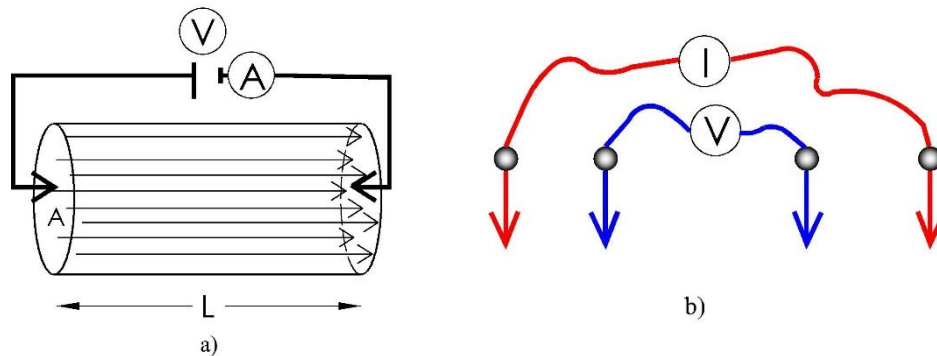


Figura 2: a) principio de prospección. b) medición de potenciales debido a corrientes inyectadas.

Este volumen de un material homogéneo, cuando se le aplica una diferencia de potencial en sus extremos circula una corriente que se distribuye uniformemente en toda la sección transversal del volumen, teniéndose así una densidad de corriente J en A/m^2 , el cual es constante para diferentes secciones de un mismo material sometido a una misma diferencia de potencial. Mientras que el campo eléctrico E , generado a partir del voltaje aplicado entre los extremos del volumen, en V/m dentro del material varía linealmente a lo largo de la longitud total, teniendo entonces la forma puntual de la ley de Ohm:

$$\vec{E} = k \cdot \vec{J} \quad (1)$$

El campo eléctrico es uniforme en un material homogéneo. Por lo cual se puede relacionar con el voltaje aplicado en sus extremos (figura 2b).

Además, la corriente se distribuye uniformemente en toda la sección transversal perpendicular a las líneas de campo eléctrico, teniéndose:

$$J = \frac{I}{A} \quad (2) \quad \text{Y} \quad E = \frac{V}{d} \quad (3)$$

Al relacionar las ecuaciones 1, 2 y 3 obtenemos 4 y al relacionarlo con la forma general de la ley de Ohm tenemos:

$$\frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A} = R(4)$$

De aquí tenemos la relación entre la resistividad y resistencia. En la ecuación 4 se basan los métodos utilizados para la medición de la resistividad de los suelos. Se inyecta una corriente y se mide un voltaje inducido. En prospección geoelectricas las resistividades se pueden calcular porque se conoce V, I y L (la distancia entre electrodos). El área A se estima unitaria.

Si se aplica la ley de Ohm directamente, el parámetro que se obtiene es la resistencia total del circuito "R", lo cual no es un buen indicador del tipo de material ya que depende del área y de su longitud. Se necesita, por tanto, un parámetro específico de cada material e independiente de sus dimensiones. Es donde nace el concepto de resistividad de un material. Al cociente L/A se le denomina factor geométrico. Este depende del dispositivo usado para la inyección de la corriente (Wenner, Schlumberger, etc).

2.5.2 RESISTIVIDAD APARENTE

El concepto de resistividad solamente aplica para suelos homogéneos. Como en la práctica se tienen suelos con concentraciones de diferentes elementos y cantidades variables surge aquí el concepto de resistividad aparente. Esto se debe a que las propiedades heterogéneas del terreno provoca que las líneas de campo eléctrico y de corriente no se distribuyan uniformemente. Los suelos son por naturaleza de este tipo.

Es un concepto de importancia fundamental en prospección y surge cuando se realizan mediciones sobre un subsuelo heterogéneo donde la resistividad medida llamada resistividad aparente es ficticia ya que es un “promedio” de las resistividades bajo cada uno de los electrodos; ni siquiera puede considerarse media ponderada. La resistividad aparente es la variable experimental con que expresan los datos de campo de los métodos de prospección y se toma como base de su interpretación. (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, 2013)

Requiere experiencia de parte del investigador interpretar los resultados de resistividad aparente obtenidos en trabajo de campo, con el fin de determinar los modelos con un grado de exactitud de acuerdo a la aplicación para la cual se realiza.

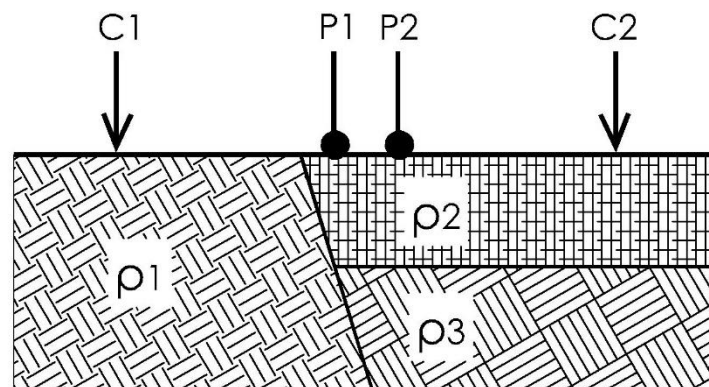


Figura 3: Suelo heterogéneo. Resistividad aparente es el “promedio” de las resistividades presentes

2.5.3 TIPOS DE PROSPECCIONES PARA MEDICIONES DE RESISTIVIDAD

Para la determinación de la resistividad se usan prospecciones geoelectricas mediante diferentes métodos. Estas prospecciones son necesarias porque permiten trazar mapas de resistividades aparentes de las capas del subsuelo mediante las mediciones hechas en la superficie del mismo, con lo que se obtiene el modelado del terreno. En otras aplicaciones se utilizan para encontrar el tamaño, forma y composición de estructuras o cuerpos inmersos en el subsuelo; encontrar mantos acuíferos, aplicaciones de geofísica aplicada, etc.

Los tipos principales de prospecciones geoelectricas son:

2.5.3.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV)

Este tipo de prospección se utiliza cuando se desea tener un modelado del suelo que describa la variación de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado en relación a la profundidad del mismo. El producto final que se obtiene es un modelo de varias capas, cada una con un valor de resistividad aparente con un cambio considerable con respecto a otra, con lo que se puede suponer o demostrar que hay materiales de distinta naturaleza en el terreno en estudio.

Se tienen cuatro electrodos (Figura 4) generalmente dispuestos en una línea recta, dos de ellos (A y B) son los inyectores de corriente, que son los de los extremos del arreglo; y los del centro (M y N) que es donde se mide el potencial generado debido a la corriente inyectada.

La profundidad a la que penetra la corriente eléctrica inyectada depende de la separación de los electrodos A y B. Si estos electrodos se separan más, mayor será la profundidad a la que llegará. La densidad de corriente va disminuyendo conforme aumenta la profundidad. El modelo obtenido es una gráfica de una dimensión, que corresponde al punto en el suelo bajo el punto de prueba. Los dispositivos más utilizados con los que se aplican los Sondeos Eléctricos Verticales son: Wenner y Schlumberger, sus metodologías se explican en el apartado 2.5.4.2.

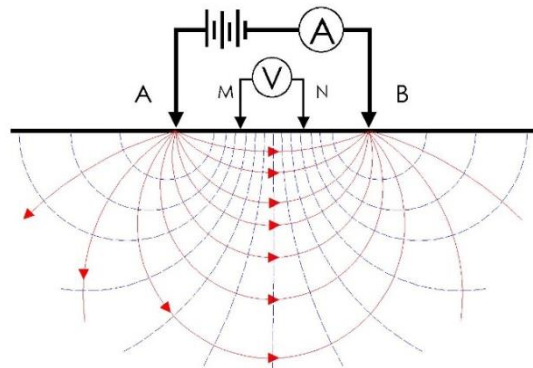


Figura 4: Líneas de corriente y equipotenciales presentes en el momento de la medición.

2.5.3.2 Calicatas eléctricas

La calicata (calar: penetrar, cata: hacia abajo) eléctrica busca hacer una distribución del suelo a una profundidad casi constante. Su objetivo es hacer un perfil de las variaciones laterales de resistividad de un terreno. La zona explorada en el calicateo eléctrico se extiende desde la superficie hasta una profundidad más o menos constante, que es función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos (Arias, 2011)

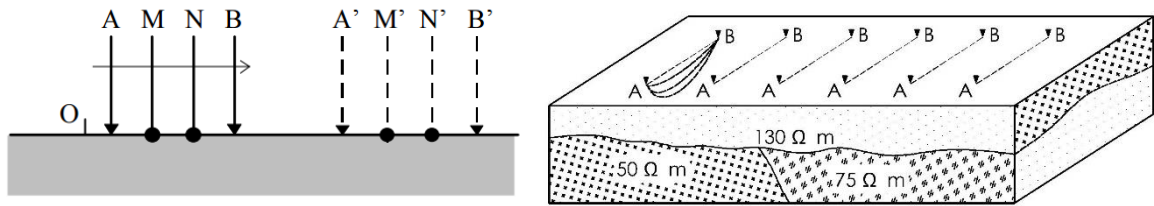


Figura 5: Esquema simplificado de una calicata eléctrica.

Experimentalmente consiste en ir trasladando los cuatro electrodos hacia los laterales manteniendo la distancia entre ellos para cumplir la profundidad casi constante de exploración. El esquema simplificado se muestra en la figura 5. Todos los electrodos se desplazan horizontalmente y manteniendo la separación entre ellos para una profundidad casi constante de exploración. Se usan por ejemplo para encontrar elementos que puedan influir en las mediciones de resistividad del terreno, es decir, que alteren la homogeneidad del suelo.

2.5.3.3 Tomografía eléctrica resistiva

Es una técnica geofísica de prospección del subsuelo que consiste en determinar la distribución de un parámetro de este, como la resistividad eléctrica, dentro de un espacio limitado y mediante un gran número de medidas de potenciales en la superficie debido a la inyección de corrientes eléctricas continuas de prueba. Es un método multielectródico y caracterizado por presentar una modelización 2D del terreno. La gráfica que se obtiene es distancia-profundidad, y según como se use, la prospección podría llegar a unos cientos de metros de profundidad del terreno, y extenderse en líneas de varios kilómetros de distancia.

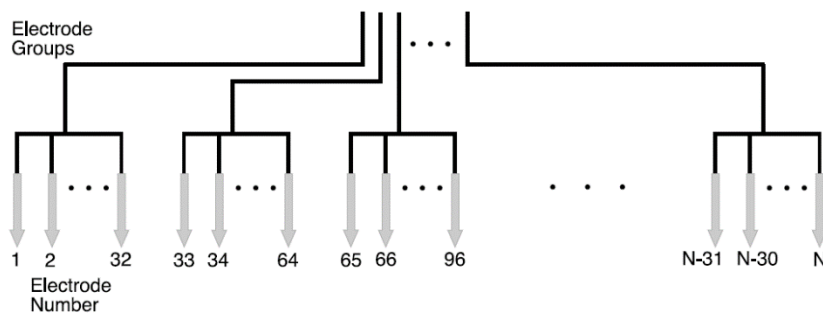


Figura 6: Distribución de los electrodos de prueba para una tomografía eléctrica resistiva.

La técnica consiste en obtener medidas de resistividad aparente mediante un dispositivo capaz de manejar una gran cantidad de electrodos conectándolos con una separación constante entre ellos. Luego se programa el equipo para que tome las medidas a distintas distancias y profundidades. El resultado es un modelo del terreno con varias calicatas a distintas profundidades. La técnica ofrece información en dos dimensiones. La distribución de electrodos es generalmente de 20 hasta poco más de 80 por línea (Figura 6).

En la figura 7 se muestra un dispositivo característico para la toma de datos mediante tomografía eléctrica resistiva. Cuenta con un resistímetro, un control de switcheo donde se conectan los grupos de electrodos, una fuente de energía, electrodos y una serie de cables “inteligentes”. Todo esto se programa para que las medidas sean tomadas bajo una secuencia específica y obtener resultados controlados, es decir, limitados en espacio, pero con una alta resolución. La resolución depende de la cantidad de datos tomados y la distribución de los electrodos, que pueden estar muy cerca o muy lejos entre ellos. Combinando adecuadamente resolución lateral y profundidad de investigación, la Tomografía eléctrica es, sin duda, una de las herramientas de carácter no destructivo más eficaz para el estudio y caracterización de posibles discontinuidades del subsuelo.

La figura 8 muestra una tomografía. Este es el resultado que arroja la técnica. Se puede observar que se tiene una alta resolución del corte del terreno, cuya profundidad y distancia se han realizado aproximadamente a 7 y 80 metros respectivamente.



Figura 7: Equipo tradicional para realizar una tomografía eléctrica resistiva.

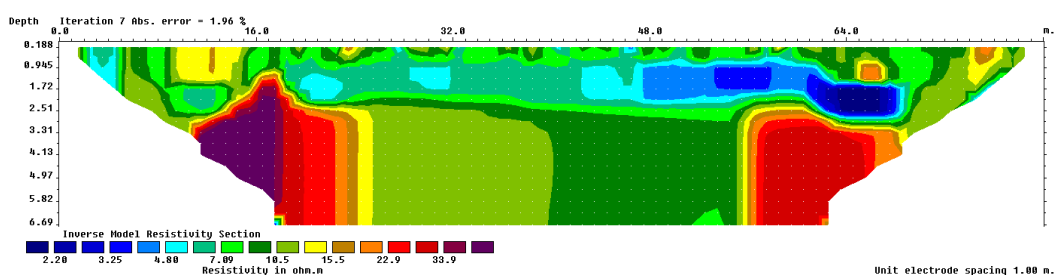


Figura 8: Resultado de una tomografía. Las resistividades se aprecian en un modelo 2D

Entre sus ventajas está que el proceso de captura de los datos es totalmente automatizado, se pueden realizar un gran número de medidas sin necesidad de mover los electrodos, de forma que se obtienen secciones 2-D de excepcional resolución tanto en profundidad como lateralmente. Además, el procesamiento de los datos se puede realizar en el propio campo, mediante la ayuda de un portátil y en un tiempo muy reducido. Esta manera de actuar, casi a tiempo real, le confiere al método una gran versatilidad a la hora de resolver posibles problemas surgidos durante todo el proceso de campo, o decidir la ejecución de nuevos perfiles que inicialmente no estaban proyectados. Se puede controlar la profundidad máxima de estudio. Es un método no destructivo.

Sus desventajas son que, a diferencia de otros métodos, la Tomografía Eléctrica precisa de un equipo bastante caro. Y como pasa en todos los métodos de resistividad eléctrica, la presencia de material muy resistivo en superficie imposibilita un buen funcionamiento del método, siendo necesaria la utilización de otras técnicas, en este caso las electromagnéticas, en los que no se precisa un contacto físico con el suelo.

Para aplicaciones eléctricas, es posible que no sea el método más óptimo. Dado que no presenta un valor homogéneo del terreno si no que presenta un modelo real de las variaciones de resistividad. Una ventaja es que se pueden detectar obstáculos para los materiales de puesta a tierra, y que se tiene una idea más general de las resistividades más altas y más bajas presentes en el área de estudio. Queda a criterio del diseñador, el valor con el cual va a calcular la resistencia de puesta a tierra para un sistema eléctrico.

2.5.4 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL SUELO

La resistividad del suelo puede ser calculada mediante fórmulas que dependen del método y arreglo utilizado los cuales se mencionan en este apartado, pero también pueden ser medidas directamente con equipos especializados para ello, los cuales serán mencionados más adelante.

2.5.4.1 Método de tres puntos o Método de variación de profundidad

Este método consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo tipo varilla y calcular la resistividad del suelo basado en la ecuación de resistencia a tierra de un electrodo vertical en un suelo homogéneo y los datos geométricos de la varilla.

En la figura 9 se muestra el diagrama de conexión del presente método.

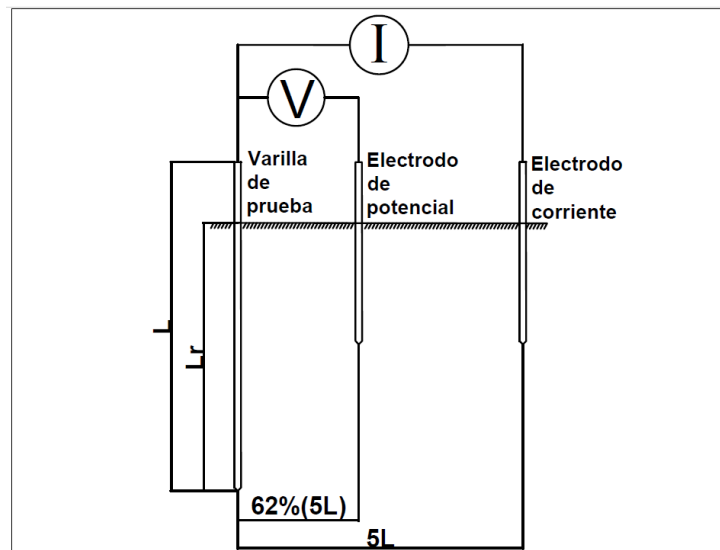


Figura 9: Método de tres puntos o variación de profundidad.

En donde:

Lr: Longitud enterrada del electrodo

E, P y C: Electrodo tipo varilla, electrodo auxiliar de potencial y electrodo auxiliar de corriente respectivamente.

La resistividad se calcula por medio de la ecuación 5:

$$\rho = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right)-1} [\Omega \cdot m] \quad (5)$$

En donde:

$$R = \frac{V}{I} [\Omega] \text{ Por ley de Ohm}$$

d: Diámetro de la varilla

La profundidad a la cual se calcula la resistividad es la misma que la profundidad de enterramiento del electrodo. Este método da un buen estimado de comportamiento del suelo en el entorno de colocación del electrodo, de cinco a diez veces su longitud (IEEE Std 81, 2012).

2.5.4.2 Método de cuatro puntos

El método de cuatro puntos es el más utilizado para la medición de la resistividad aparente del suelo en superficies grandes de tierra.

En este método se instalan cuatro puntas de pruebas, también llamados electrodos, todos con la misma profundidad y con un espaciamiento el cual depende del arreglo que se utilice. Para conocer la resistividad más profunda se aumenta la separación entre los electrodos.

El método consiste en inyectar una corriente controlada en los electrodos externos llamados *electrodos de corriente*, y a partir de esta y con la resistencia que presenta la tierra, se genera una diferencia de potencial entre los dos electrodos internos llamados *electrodos de potencial* con estos dos parámetros medidos se calcula la resistividad aparente mediante una fórmula que depende del factor geométrico del arreglo.

A continuación, se presentan los arreglos que se pueden utilizar para el método de cuatro puntos:

A) ARREGLO WENNER

En este arreglo los electrodos de prueba son espaciados a una misma distancia como se muestra en la figura 10.

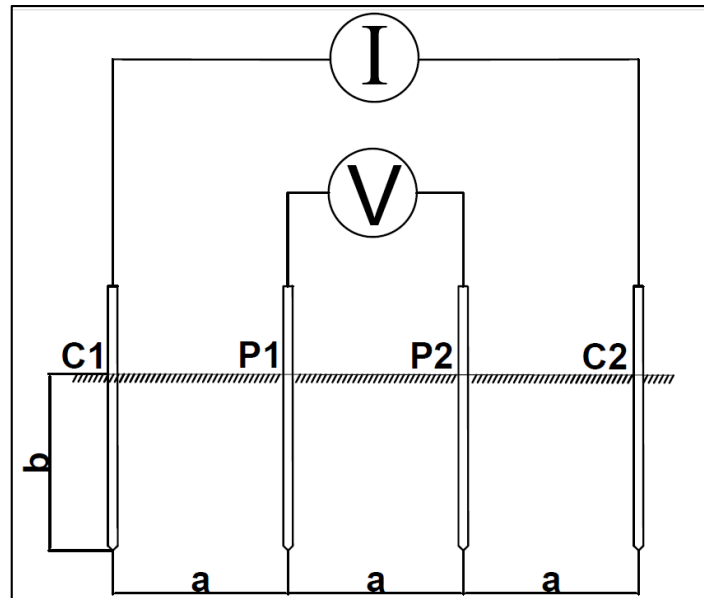


Figura 10: Arreglo Wenner.

En donde:

C1 y C2: Electrodos de corriente

P1 y P2: Electrodos de potencial

La profundidad b no debe ser mayor de $0.1a$.

A partir de la resistencia se puede calcular la resistividad aparente del suelo medida en $\Omega \cdot m$ para una profundidad " a " igual a la separación entre electrodos con la ecuación 6 ya establecida para el arreglo Wenner:

$$\rho = 2\pi a R \quad [\Omega \cdot m] \quad (6)$$

El arreglo Wenner tiene diferentes combinaciones (Loke, 1999) las cuales se presentan en la tabla 3.


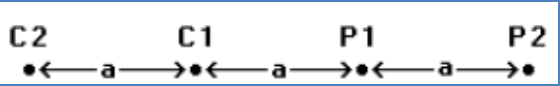
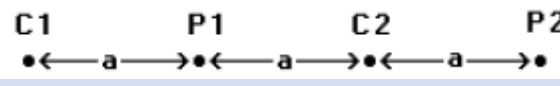
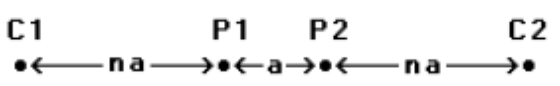
<p>Alfa Wenner</p>  <p>$\rho = 2\pi aR [\Omega \cdot m]$</p>	<p>Beta Wenner</p>  <p>$\rho = 6\pi aR [\Omega \cdot m]$</p>
<p>Gama Wenner</p>  <p>$\rho = 3\pi aR [\Omega \cdot m]$</p>	<p>Wenner – Schlumberger</p>  <p>$\rho = \pi n(n + 1)aR [\Omega \cdot m]$</p>

Tabla 3: Diferentes combinaciones del arreglo Wenner.

Este arreglo también puede ser utilizado en sitios con suelos cubiertos de pavimento, concreto o cemento, al aplicarlo en este tipo de suelos se utilizan placas de cobre como electrodos auxiliares las cuales deben ser de 30x30 cm con espesor de 3.8 cm. Se debe verter agua sobre las placas y remojar el sitio donde serán ubicadas cada una de ellas con el cuidado de que las áreas humedecidas no se interconecten entre sí. Es necesario esperar un tiempo prudencial, que depende del espesor y permeabilidad de la capa que cubre el suelo (30 minutos son normalmente suficientes), para que la resistencia de contacto entre la placa y el suelo disminuya y se estabilice. (ASTM D3633-98, 1998)

B) ARREGLO SCHLUMBERGER

Este arreglo, al contrario del Wenner, el espaciamiento no es igual para los cuatro electrodos ya que los *electrodos de corriente* están espaciados de los *electrodos de potencial* una distancia diferente como se muestra en la figura 11.

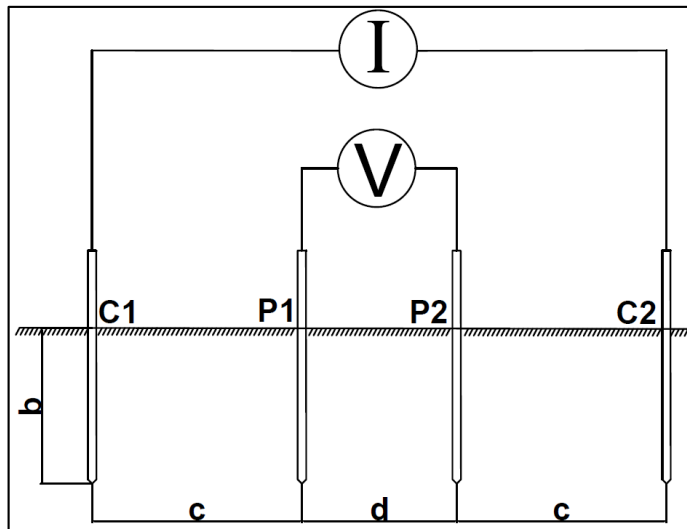


Figura 11: Arreglo Schlumberger.

El arreglo de Schlumberger también requiere ampliar el espaciamiento de los *electrodos de corriente* para obtener una prospección a profundidad mayor.

Al igual que en el arreglo Wenner, primero se calcula la resistencia del suelo a partir de la corriente y el potencial medido utilizando la *ley de Ohm*. La resistividad aparente se puede calcular mediante la ecuación 7:

$$\rho = \frac{\pi(c)(c+d)R}{d} [\Omega \cdot m] \quad (7)$$

La resistividad obtenida mediante la fórmula anterior es la resistividad aparente a una profundidad aproximada de $\frac{2c+d}{2}$. Para utilizar la ecuación 7 la profundidad b debe de ser pequeña en comparación a la separación d y c , y $c > 2d$. (IEEE Std 81, 2012).

2.5.4.3 Sitios recomendados para realizar mediciones (MOTOROLA STD R56)

Debido a las corrientes parasitas, tuberías de agua, cables enterrados o algún otro factor inusual, se pueden obtener mediciones erróneas, es por esto que se deben realizar en al menos tres direcciones diferentes. En la figura 12 se muestran los sitios en donde es recomendado realizar mediciones en un determinado terreno.

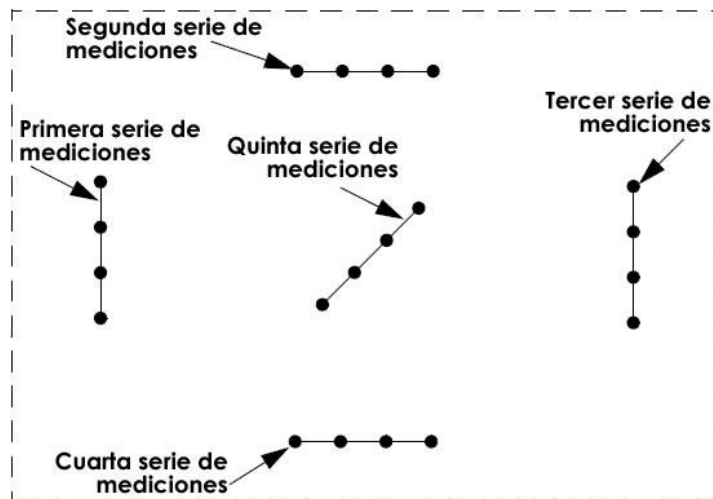


Figura 12: Direcciones recomendadas para realizar mediciones de resistividad

2.5.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL SUELO

Anteriormente se presentaron los métodos de medición de resistividad del suelo los cuales presentan ciertas ventajas y desventajas con respecto del contrario, estas son presentadas en la tabla 4.

	Ventajas	Desventajas
Método de tres puntos	<ul style="list-style-type: none"> • Se aplica cuando no se dispone del espacio suficiente para realizar la medición mediante el método de cuatro puntos. • Aunque no tiene que ver directamente con las mediciones, una ventaja que presenta este método es determinar la profundidad hasta la cual puede ser introducido un 	<ul style="list-style-type: none"> • La medición que resulta de este método es muy limitada y solo se obtiene información de las capas más superficiales. • El electrodo usualmente pierde contacto directo con la tierra debido a las vibraciones provocadas por los golpes al introducirlo

	electrodo de puesta a tierra.	
Método de cuatro puntos	<ul style="list-style-type: none"> • No es necesario introducir los electrodos demasiado para lograr mediciones de resistividad a mayor profundidad. • Los resultados de las mediciones no son afectados por la resistencia que presentan los electrodos de prueba. 	<ul style="list-style-type: none"> • En cuanto a los tipos de arreglos que se pueden utilizar en este método todos presentan la desventaja que se necesita un espacio amplio para lograr mediciones de resistividad a mayor profundidad ya que la separación de los electrodos va en aumento.

Tabla 4: Ventajas y desventajas de los métodos de medición de resistividad del suelo.

En el método de cuatro puntos los arreglos más utilizados son el *arreglo Wenner* y el *arreglo Schlumberger*. En la tabla 5 se presenta una comparación entre ellos la cual describe las ventajas de cada uno.

Arreglo Wenner	Arreglo Schlumberger
<ul style="list-style-type: none"> • La interpretación de los valores de R medidos en terreno, es más directa en términos de resistividad aparente. Esto permite visualizar con facilidad la tendencia del gráfico de campo. • Los instrumentos pueden ser de menor sensibilidad que los empleados con la configuración de Schlumberger, ya que a medida que se separan los electrodos de 	<ul style="list-style-type: none"> • Esta configuración es menos sensible a las variaciones laterales del terreno, debido a que los electrodos de potencial permanecen inmóviles. • En la realización práctica de la medición se presentan menos obstáculos, ya que sólo se desplazan los electrodos de corriente.

corriente, también lo hacen los de potencial.

Tabla 5: Cuadro de ventajas del arreglo Wenner y Schlumberger.

2.5.6 MODELADO DEL TERRENO

Posiblemente la parte más difícil es la interpretación de los resultados obtenidos debido a que se tiene que realizar una buena aproximación en el modelado del suelo del cual se han realizado las mediciones. Debe tomarse en cuenta que la resistividad aparente varía con respecto a la profundidad ya sea por la humedad en tiempo de invierno o por las diferentes capas que podría tener.

Los modelos existentes son los siguientes:

- Modelo de suelo homogéneo
- Modelo de suelo no homogéneo

El modelo de suelo homogéneo puede ser utilizado cuando la variación de las mediciones de resistividad aparente es moderada, no más del 30% del valor máximo, lo que raramente ocurre en la práctica (Moreno Ospina, Valencia Velásquez, Cárdenas Agudelo , & Villa Acevedo , 2007).

El modelo de suelo no homogéneo se puede dividir en dos sub-modelos los cuales se mencionan a continuación:

- Modelo de dos capas
- Modelo multicapas

El modelo de dos capas es el más utilizado para casos en los cuales no es apropiado aplicar el modelo de suelo homogéneo como por ejemplo cuando existe una gran variación en las mediciones de resistividad aparente, ya que este representa con más precisión al terreno en estudio.

Los pasos de cálculos y ejemplos de modelado se presentan en los capítulos 3 y 4 respectivamente.

2.5.7 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Existen ciertos factores que se considera tienen influencia sobre el valor de la resistividad en un terreno, de los cuales algunos pueden ser tratados químicamente para reducir dicho valor. A continuación, se enlistan los principales:

- Tipo de tierra (Arcilla, arena, tierra blanca, etc)
- Estratificación de capas de diferentes tipos de suelo
- Humedad
- Temperatura
- Composición química

2.5.8 FACTORES QUE AFECTAN LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL SUELO

En las mediciones de resistividad, ya sea mediante cálculo con alguno de los métodos anteriormente descritos o con equipo especializado para mostrar directamente el valor en ohm-m, se tienden a cometer errores que afectan la resistividad, aunque se obtenga un valor numérico que parezca aceptable. Es por esto que se enlistan algunos de los errores más comunes al realizar mediciones de resistividad para evitar caer en ellos y dar confiabilidad de las mediciones

- No se deben realizar mediciones de resistividad en terrenos en donde se tenga la certeza o se sospeche que existe una red de puesta a tierra.
- Evitar medir en lugares en donde existan tuberías de agua o algún otro tipo de objetos enterrados debido a que pueden ser dañadas por los electrodos, además de afectar los resultados de las mediciones.
- Si se sospecha que existe algún tipo de cableado eléctrico subterráneo, evitar realizar mediciones en dicho lugar.
- Las mediciones se deben de realizar perpendicular a las líneas eléctricas aéreas, no paralelo debido a que se puede inducir algún potencial por acoplamiento magnético con los conductores tendidos para realizar la medición.
- El equipo especializado para la medición directa de resistividad debe de conectarse como lo indica el fabricante debido a que la simbología entre algunas marcas puede ser diferente.

- Se debe tener al menos una idea de qué tipo de suelo es la capa más superficial del terreno para comparar con las mediciones a menos profundidad realizadas con los métodos anteriormente descritos, si la resistividad es muy diferente a la que se espera entonces no es una medición aceptable.
- Si se realizan mediciones con las diferentes combinaciones del arreglo Wenner a manera de comparación entre ellos mismos, se debe asegurar, mediante el manual del equipo, que este soporte las combinaciones del arreglo.

2.6 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

La resistencia de un sistema de puesta a tierra está compuesta por tres componentes (IRAM 2281-4, 1989):

$$R_T = R_s + R_A + R_E [\Omega] \quad (8)$$

En donde:

R_T : Resistencia total del sistema de puesta a tierra

R_s : Resistencia específica del suelo o resistividad del suelo.

R_A : Resistencia de dispersión de un electrodo de puesta a tierra.

R_E : Resistencia del electrodo.

La resistencia de dispersión puede ser una porción significativa de la resistencia total, esta depende fundamentalmente de la resistividad del suelo y de la longitud del electrodo de tierra o del cable enterrado que compone la malla y puede ser calculada mediante la ecuación $\frac{\rho}{2D}$, en donde D es el diámetro de un círculo que tiene la misma área de la malla de tierra. Esta resistencia es pequeña en suelos húmedos y alta en terrenos secos. La resistencia del electrodo tiene un valor muy bajo en comparación con las otras componentes. De la resistencia total de un sistema de puesta a tierra.

2.6.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

El valor de la resistencia de un sistema de puesta a tierra puede obtenerse mediante cálculo o medición directa con equipo especializado para ello.

2.6.1.1 Método de dos puntos

En este método la resistencia del sistema de puesta a tierra es medida en serie con el electrodo auxiliar, la resistencia de este último es despreciable en comparación con la del sistema, usualmente este método se utiliza para realizar mediciones en una residencia, en donde el electrodo auxiliar puede ser las tuberías metálicas que suministran agua las cuales presentan una resistencia de alrededor de 1Ω y la resistencia de un sistema de puesta a tierra de una casa se presume debería de ser 25Ω que es mucho mayor que la resistencia del electrodo auxiliar. Este método se presta a muchos errores como por ejemplo si la tubería que funciona como electrodo auxiliar se acerca demasiado al sistema de puesta a tierra en estudio o si la resistencia del sistema está en el rango de la resistencia del electrodo auxiliar.

En la figura 13 se presenta el método de dos puntos utilizando un equipo especializado que más adelante será descrito.

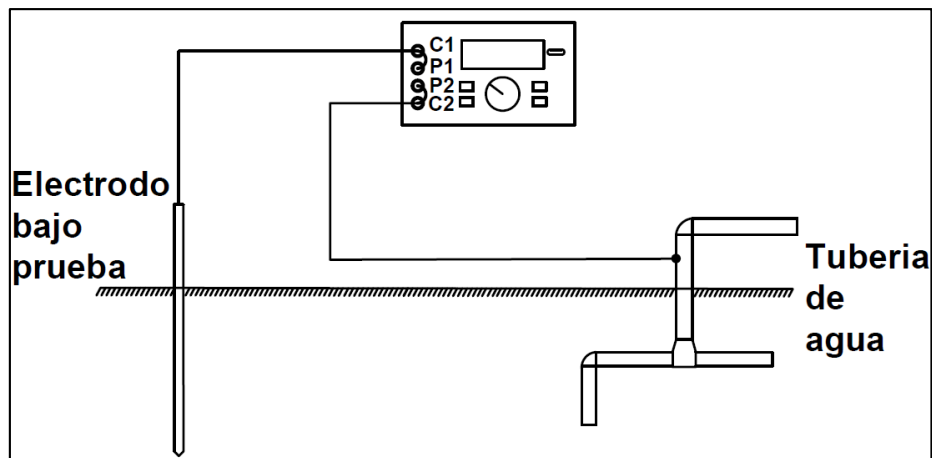
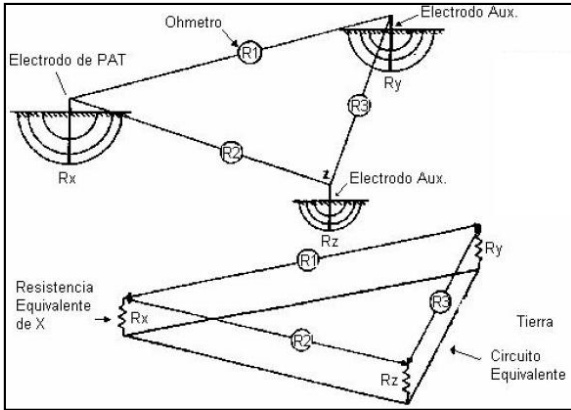


Figura 13: Descripción del método de dos puntos con equipo especializado.

2.6.1.2 Método de tres puntos

En este método se utilizan dos electrodos auxiliares con resistencias conocidas R_y y R_z respectivamente, que se pretende sean similares a la del electrodo o sistema en estudio. Estos dos electrodos se colocan formando un triángulo con el electrodo en estudio, luego con un

equipo especializado se mide la resistencia entre cada uno de los electrodos como se muestra en la figura 14, no se inyecta corriente de prueba.



Se puede notar que:

$$R_x + R_y + 0 = R_1$$

$$R_x + 0 + R_z = R_2$$

$$0 + R_y + R_z = R_3$$

Figura 14: Método de tres puntos.

Al realizar las operaciones necesarias para despejar \$R_x\$, obtenemos como resultado:

$$R_x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2} [\Omega] \quad (13)$$

Con la ecuación 13 se obtiene la resistencia del electrodo en estudio.

Se recomienda que la distancia entre electrodos sea de 8 metros o más para un electrodo simple para evitar superposición de gradientes de potencial (Aguillero & Martinez Lozano). Este método es complicado de aplicar en sistemas de puesta a tierra grandes, se prefiere utilizar otros métodos sobre todo si se desea más precisión

2.6.1.3 Método de caída de potencial

En este método se utilizan dos electrodos auxiliares conocidos como *electrodo de corriente* y *electrodo de potencial* que se colocan en una misma dirección.

El método consiste en inyectar una corriente constante entre el electrodo en estudio y el electrodo de corriente, seguidamente leer el valor de voltaje entre el electrodo en estudio y el electrodo de potencial, todo esto utilizando equipo como un voltímetro, un amperímetro y una fuente de corriente como se presenta en la figura 15.

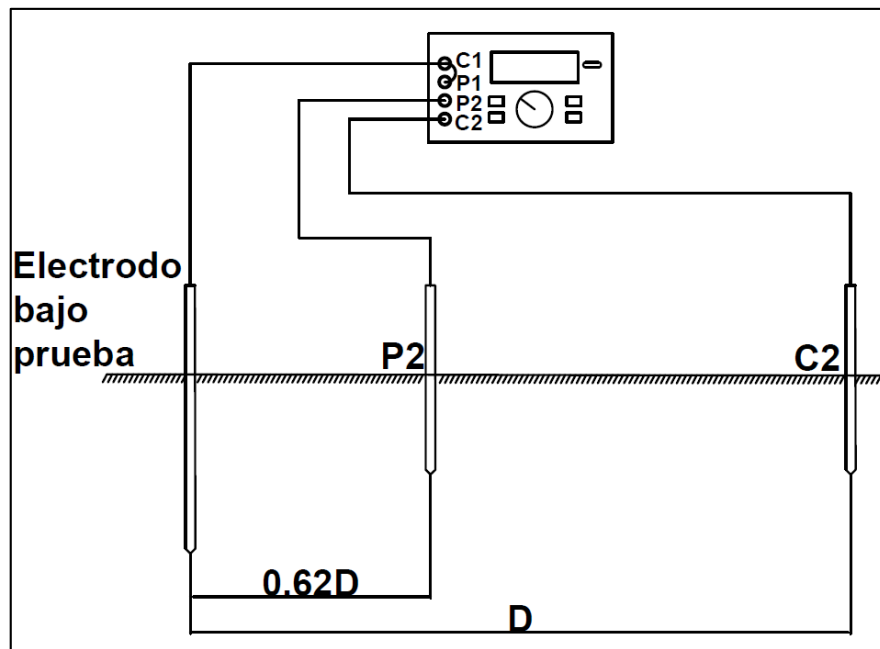


Figura 15: Método de caída de potencial.

La distancia D , debe de ser 5 veces la longitud más larga del sistema de puesta a tierra en estudio (IEEE Std 81, 2012), el electrodo de potencial debe de estar a una longitud que sea el 62% de la longitud entre el electrodo o sistema de puesta a tierra en estudio, esta distancia se basa en la posición teóricamente correcta para medir la exacta impedancia de los electrodos para un suelo con resistividad uniforme.

Este método, al igual que el arreglo Wenner del método de cuatro puntos para la medición de resistividad del suelo, también se puede utilizar en suelos con cubiertas de pavimento, concreto o cemento siguiendo las mismas disposiciones mencionadas en el apartado 2.5.4.2 literal a).

PRECAUCIONES AL UTILIZAR EL MÉTODO DE CAÍDA DE POTENCIAL (AGUILLERO & MARTINEZ LOZANO)

La medición de la resistencia de puesta a tierra por el método de caída de potencial genera gradientes de potencial en el terreno producto de la corriente inyectada a través del electrodo de corriente. Es por esto que se debe tener cuidado con las distancias entre los tres electrodos debido a que si no se deja la distancia recomendada puede ocurrir una superposición de los gradientes generados por los electrodos, esto dará como resultado una curva en la cual la resistencia aumenta a medida que aumenta la distancia y no se obtendrá un valor constante el cual se pueda tomar como valor medido. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 16.

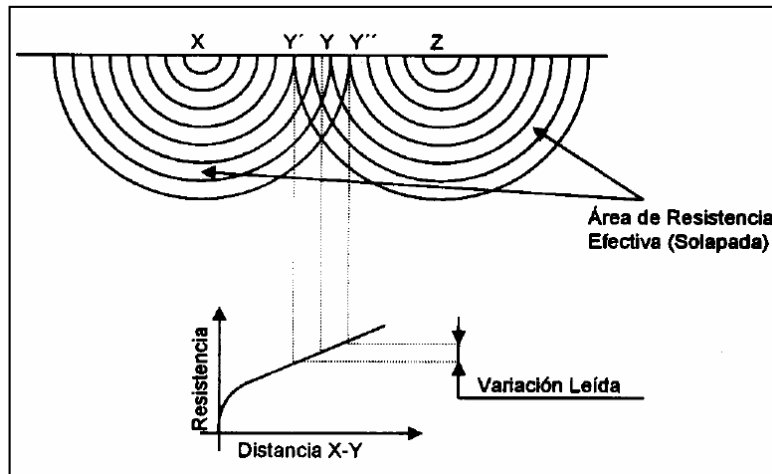


Figura 16: Superposición de los gradientes de potencial.

En cambio si se utilizan las distancias recomendadas los gradientes de potencial de los electrodos no hay superposición entre si y la curva de resistencia vs distancia entre el electrodo en estudio y el electrodo de potencial dará como resultado una porción que se mantiene constante, la cual se toma como el valor medido de la resistencia de puesta a tierra. Lo anterior se muestra en la figura 17.

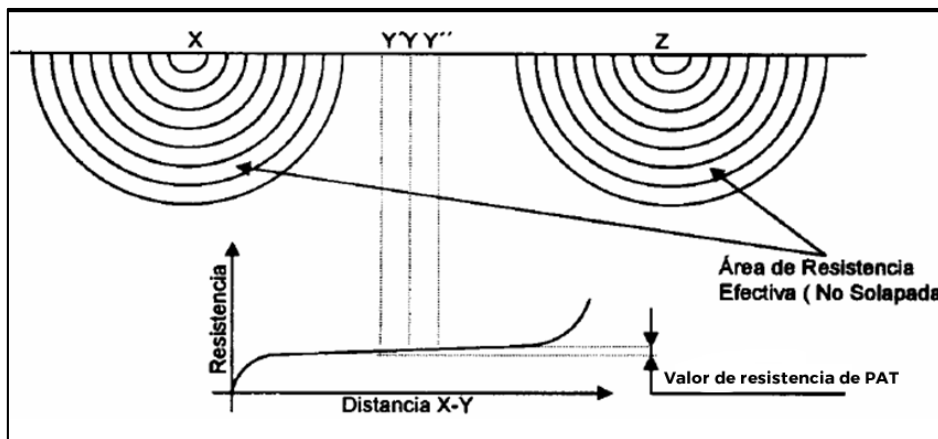


Figura 17: Curva de resistencia vs distancia del electrodo en estudio y electrodo de potencial. No hay superposición de gradientes de potencial.

2.6.1.4 Método de Clamp-on

Este método involucra la utilización de una tenaza, conocida también como clamp. Para la medición de la resistencia de puesta a tierra, la clamp induce un voltaje con una frecuencia definida, casi siempre esta en el rango de 1 kHz a 3.4 kHz, al sistema de puesta a tierra que

contiene el electrodo en estudio. El voltaje inducido produce una corriente que fluye hasta el sistema de puesta a tierra, la cual es medida por la misma clamp. La resistencia es obtenida mediante la ley de ohm y mostrada por el dispositivo de medición. Para llevarse a cabo la medición de resistencia en los demás métodos discutidos anteriormente, se necesita la utilización de dos electrodos auxiliares e, idealmente, desconectar el sistema de puesta a tierra para eliminar el error introducido por algún otro sistema o electrodo de tierra en paralelo, lo cual en este método no es necesario ya que se basa en la interconexión existente entre el sistema de tierra bajo medición y otros sistemas cercanos para obtener un circuito conformado por las impedancias de estos, cerrado en la parte superior por el conductor neutro aterrizado en diferentes puntos y en la parte inferior por el suelo (Figura 18).

El principal requisito para obtener un resultado con alto grado de exactitud, es necesario que se cumpla la condición que el sistema bajo prueba tiene una impedancia significativamente mayor a la equivalente en paralelo. Una condición extra es que el sistema debe tener una baja reactivancia en comparación a la resistencia para obtener resultados que puedan considerarse correctos, esto debido a que la reactivancia aumenta significativamente en respuesta a la frecuencia de la corriente de prueba. (IEEE Std 81, 2012)

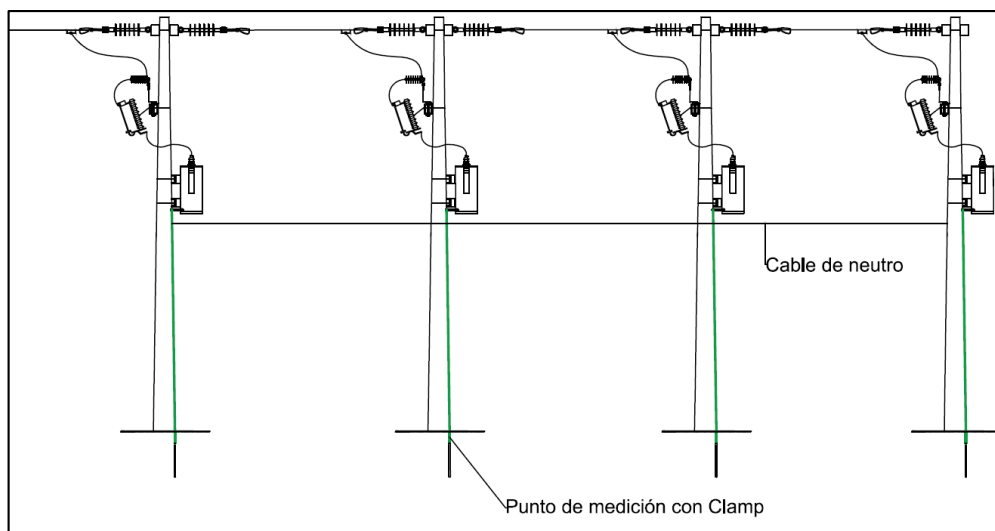


Figura 18: Medición con Clamp-On.

Es importante además la correcta ubicación de la pinza con el fin de que el lazo de retorno de la corriente de prueba se cierre a través de la tierra y no de algún conductor que conforme el sistema de la red de tierra bajo prueba (Figura 19) ya que en este caso se estaría midiendo la resistencia

del conductor y de los puntos de unión; sean soldaduras, o accesorios mecánicos. Esto última deriva en otra medición muy útil, que se aleja del propósito de la medición de impedancia de tierra, que implica la integridad del sistema de puesta a tierra permitiendo la identificación de malas conexiones producto de deterioro de accesorios, por la corrosión o mala conexión debido a alguna desconexión realizada con el propósito de dar mantenimiento a algún equipo, o de los electrodos que conforman el sistema. (IEEE Std 81,1983)

Algunos fabricantes han desarrollado variaciones del método Clamp-on, con el fin de expandir su aplicación a sistemas de red de tierra de baja impedancia, que no cumplen con la primera condición descrita, aprovechando los beneficios de no desconectar el sistema bajo prueba agregando un transformador de corriente que mida la corriente de prueba que efectivamente circula hacia el sistema bajo prueba y otro transformador que determine la corriente que se dirige a los sistemas adyacentes filtrando además el ruido de fondo tomando en cuenta únicamente la corriente inyectada por el medidor (MEGGER, 2010). Otros fabricantes separan el clamp en dos pinzas independientes con el fin de reducir interferencia electromagnética entre ellas proporcionando tablas indicando la separación entre ellas acorde al rango dentro del cual se espera el valor de impedancia medida.

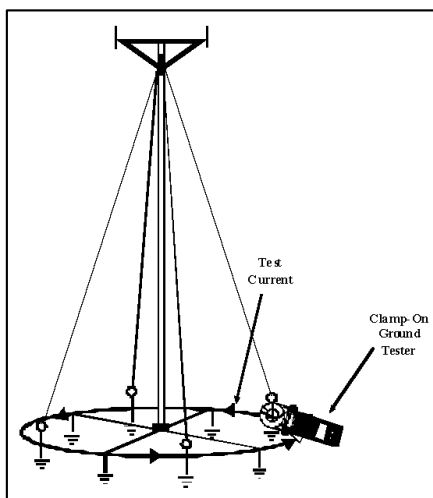


Figura 19: Incorrecta aplicación del método con Clamp-On para medición de impedancia de tierra.

Combinar el método de caída de potencial y el método de la Clamp-On da como resultado un método más para medir la resistencia independiente de un sistema de puesta a tierra que está en paralelo con otro, aplicando la medición de la distribución de la corriente de prueba.

Este método es utilizado para medir la resistencia de puesta a tierra de torres de transmisión ya que con este método no es necesario desconectar el cable de guarda. Para medir la corriente de prueba se utiliza un transformador de núcleo partido en cada pata de la torre como se muestra en la figura 20. Existen equipos en los cuales se debe hacer una medición por pata y luego calcular la resistencia de puesta a tierra con el paralelo de las cuatro patas pero también existen equipos que se colocan los cuatro transformadores de núcleo partido y se mide la resistencia simultáneamente.

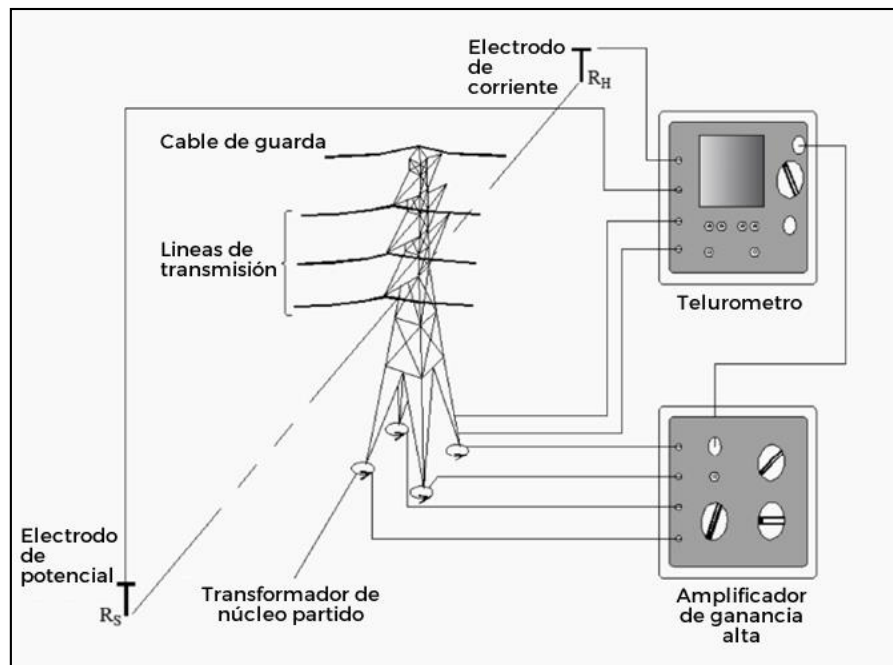


Figura 20: Método de caída de potencial/Clamp-On para la medición de resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión.

2.6.1.5 Método de la pendiente (Variante de caída de potencial)

Este método se utiliza la mayoría de veces en sistemas de puesta a tierra grandes o cuando la posición del centro de puesta a tierra no es conocido o es inaccesible, también puede usarse cuando otros métodos dan resultados poco razonables, puede decirse que este método es más preciso.

La forma de conexión de los electrodos y del equipo es como el del método de caída de potencial, con la diferencia que se realiza un barrido más completo con el electrodo de potencial entre el electrodo de puesta a tierra en estudio y el electrodo de corriente.

2.6.1.6 Medición en sistemas de puesta a tierra en servicio (Corrección para el método de caída de potencial)

Al momento de llevar a cabo mediciones en sistemas de puesta a tierra que se encuentran interconectados a otros a través de cables de guarda y/o el neutro del sistema, se introduce un error significativo que reduce el valor de resistencia medido debido a la distribución de la corriente de prueba que inyecta al medidor entre todos los sistemas interconectados obteniéndose así las resistencias en paralelo de todo el sistema.

Para estos casos existe un procedimiento probado (Choi, Ahn, Woo, Jung, Han, & Kim, 2005) en una subestación energizada obteniendo un valor corregido con un error aproximado del 15% con respecto al valor teórico obtenido de un software de simulación especializado (CDEGS) utilizando un modelo de tres capas del terreno. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes a partir del modelo de la figura 21.

$$k(x) = \frac{(a-D)(x^2-Dx)}{(aS_f - S_f D + a)x^2 + (S_f D^2 - a^2 S_f - a^2)x + a S_f D(a+D)} \quad (10)$$

$$R(x) = \frac{V(a) - V(x)}{I} \quad (11)$$

$$V(x) = \rho \frac{S_f I}{2\pi x} - \rho \frac{I}{2\pi(D-x)} \quad (12)$$

$$R_{TRUE} = k(x)R(x) \quad (13)$$

En donde:

Sf: Factor de distribución de la corriente de falla.

a: Radio de la hemiesfera equivalente al sistema de tierra bajo medición.

ρ : Resistividad de un suelo uniforme.

D: Distancia entre el electrodo de corriente y el centro de la hemiesfera equivalente.

x: Distancia del electrodo de potencial desde el centro de la hemiesfera equivalente.

I: Corriente de prueba

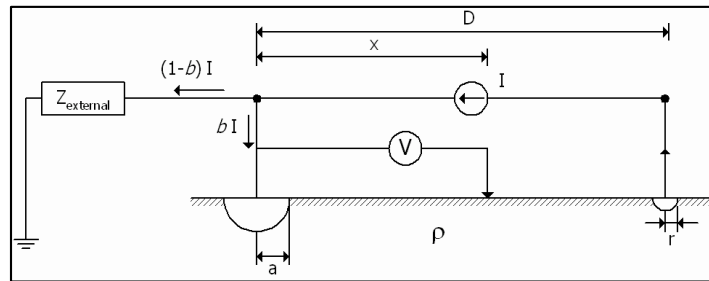


Figura 21: Modelo utilizado para la corrección del valor medido de la resistencia de puesta a tierra por el método de caída de potencial.

2.6.1.6 Método alternativo para la medición de grandes sistemas de puesta a tierra (Soto Ortiz & García González, 2005)

Un sistema de puesta a tierra se considera grande cuando su área es mayor a $20,000\text{m}^2$ (IEEE Std 81.2, 1991), este método consiste en la reducción de las distancias de ubicación de los electrodos auxiliares con respecto a los métodos que ya han sido descritos anteriormente. Se basa en el método de caída de potencial y la resistencia es obtenida de forma gráfica.

Hay que tomar en cuenta que para usar este método se debe contar con un telurómetro y conectarlo tal y como en el método de caída de potencial.

En el apartado 3.3.2.8 se describen los pasos a seguir para la utilización de este método.

2.6.2 FACTORES QUE AFECTAN EL VALOR DE LA RESISTENCIA DE PAT

Los cálculos y la experiencia, muestran que los factores que son capaces de modificar el valor de la resistencia de la puesta a tierra en una subestación o torre de transmisión son:

- La resistividad del suelo circundante.
- Configuración de la puesta a tierra.
- Extensión de la puesta a tierra. Una mayor extensión no solamente se logra con el tamaño de una rejilla, sino también con los puntos en donde se conecta, por ejemplo, estructuras metálicas, fundaciones de edificios, etc.

2.6.3 FACTORES QUE AFECTAN LAS MEDICIONES DE LA RESISTENCIA DE PAT DESPUÉS DE SER INSTALADA

- a) Por la aplicación de métodos analíticos no apropiados para el cálculo del valor de diseño de la resistencia.
- b) La resistividad del suelo en el momento de la medición de la resistencia es distinta a la medida al momento de realizar el diseño. Es decir que se diseñó en base a otra resistividad, ya que esta varía por factores como los meteorológicos.
- c) Se realizar medidas inexactas de la medición de resistividad para el diseño del sistema de tierra, número y distribución inadecuados de las pruebas, espaciados de las sondas, etc.
- d) Por la existencia de estructuras metálicas enterradas como tuberías de agua, cimentaciones de edificios u otros sistemas de tierra cercanos, que puedan alterar la distribución de las corrientes de prueba cuando esta circula por ellos.
- e) Los medidores de resistencia de tenaza o Clamp-On pueden tener un error grande si la reactancia del circuito de prueba es significativa en comparación con la resistencia ya que las frecuencias de prueba pueden oscilar entre 1kHz Y 3.4kHz. También porque tienen filtros inadecuados para las frecuencias de 50Hz/60Hz que son causadas por corrientes parásitas.

La diferencia entre los valores medidos y calculados de la resistencia puede ser minimizada si las mediciones de resistividad del suelo y sistema de tierra de resistencia se obtienen bajo condiciones climáticas similares.

Se recomienda hacer las mediciones de red de tierra en la peor situación en cuanto a condiciones meteorológicas, así se puede tener una referencia de la localidad en donde está instalada.

2.7 POTENCIALES SUPERFICIALES

2.7.1 ELEVACIÓN DE POTENCIAL DE TIERRA (GPR)

El GPR depende únicamente de dos parámetros, la corriente de falla que efectivamente circula por la red de tierra I_G y la impedancia de la red de tierra R_g . (IEEE Std 80)

$$GPR = R_g I_G [V] \quad (14)$$

2.7.2 POTENCIAL DE TOQUE

El nivel de tensión que se encuentra presente en una estructura metálica depende del arreglo del sistema de la red de tierra, de la ubicación dentro del mismo y del valor del GPR (IEEE Std 80, 2000). Dada la distribución de gradiente de voltaje, una persona dentro de la subestación nunca se verá sometida al potencial total del GPR, pero sí a una fracción de este, por lo que es necesario medir o, en su defecto, estimar el potencial de toque para poder determinar el grado de aislamiento necesario en los equipos de protección personal y así garantizar su efectividad.

2.7.3 POTENCIAL DE PASO

Para el caso del potencial de paso, el contacto del sistema de tierra con una persona es a través de las extremidades inferiores con una separación de 1m entre sí a través de la superficie de la subestación considerando la capa de grava y la tierra que cubre el sistema de puesta a tierra. La diferencia de potencial es mayor cerca de las estructuras conectadas a tierra disminuyendo a medida se aleja de ellas.

2.7.3 FACTORES QUE AFECTAN EL VALOR DE LOS POTENCIALES SUPERFICIALES

A continuación se listan los factores que afectan directamente el valor de potencial de toque (Day & Patel, 2010)

- Resistividad del terreno y resistividad de la capa superficial (grava).
- Ubicación dentro de la cuadrícula de la red de tierra, aumenta al acercarse a los bordes de los conductores que conforman el sistema de puesta a tierra debido a la circulación de la corriente de falla.

2.7.4 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE POTENCIALES SUPERFICIALES

2.7.4.1 Falla preparada

Se prepara una falla real con el voltaje total al que trabaja la subestación y se realizan las mediciones de ambos voltajes con un voltímetro capaz de medir tensiones en el orden de los 10kV.

2.7.4.2 Falla a bajo voltaje

Es similar a la falla preparada a diferencia que la corriente de falla es de unos cientos de amperios. Su principio se fundamenta en que la resistencia de puesta a tierra es constante, por lo que las mediciones realizadas con un voltímetro, cuyo único requisito es de ser de alta impedancia, pueden ser ajustadas al valor real multiplicando el valor medido V por la razón de la corriente de corto circuito real I_{sc} y la corriente de prueba I_{test} (ecuación 15). La figura 22 muestra un esquema general de las conexiones realizadas.

$$E_{touch} = V \frac{I_{sc}}{I_{test}} \quad (15)$$

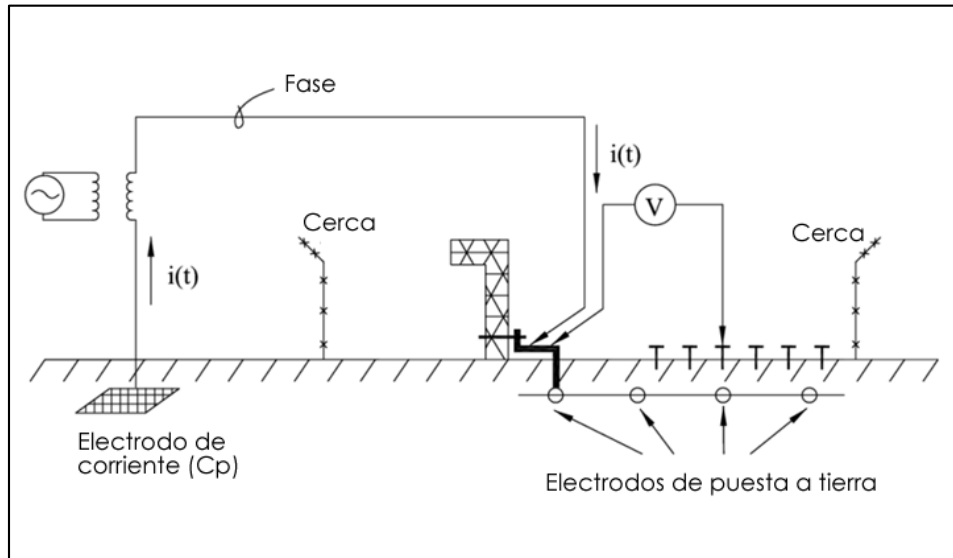


Figura 22: Falla a bajo voltaje o inyección de corriente

Para realizar esta medición se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

1. Se coloca un electrodo (Cp) que servirá como electrodo para el retorno de la corriente de “falla” a una distancia fuera del campo de efecto de la red de tierra bajo medición.
2. Se inyecta una corriente a frecuencia del sistema (60Hz) a través del conductor de una de las fases de la subestación en cortocircuito con una estructura aterrizada.
3. Con un voltímetro se mide el voltaje entre la estructura aterrizada y un electrodo pequeño enterrado unos pocos centímetros en la superficie de la subestación determinando así el potencial de toque.

4. Para obtener el potencial de paso se calcula la diferencia entre potenciales de toque con el electrodo enterrado desplazado un metro entre mediciones.

2.7.4.3 Medición con un telurómetro convencional

El funcionamiento se basa en la medición de la impedancia entre dos puntos y estimación de los potenciales de toque y paso a partir de la corriente de falla esperada. La función principal del equipo es medir un valor de resistencia inyectando una corriente entre dos puntos y midiendo un potencial en otros dos, es posible entonces inyectar una corriente en un electrodo alejado del área de efecto de la red de tierra que circule entre él y una estructura aterrizada midiendo el voltaje inducido entre esta misma y un punto en la superficie de la subestación obteniendo así una impedancia Thevenin entre los puntos de contacto para la determinación del potencial de toque.

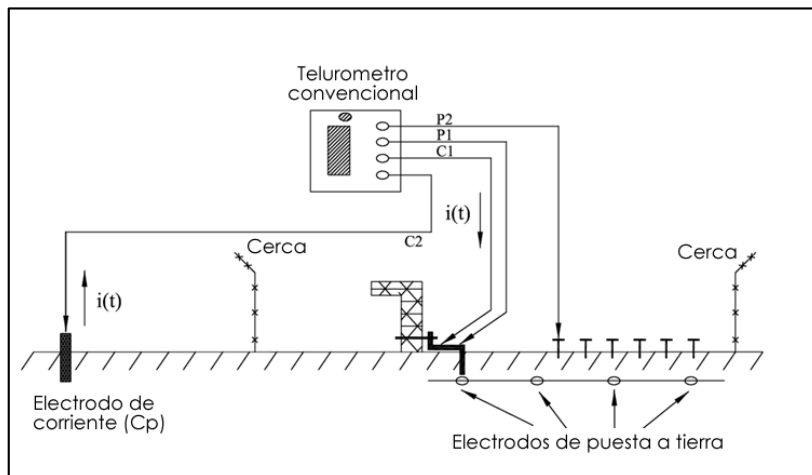


Figura 23: Ubicación de sondas de medición del telurómetro para medición de potenciales de toque y paso.

La figura 23 muestra un esquema de las conexiones a realizar utilizando los terminales para los electrodos de corriente del equipo (C1 y C2), ubicando el primero en un electrodo enterrado fuera del campo de efecto del sistema de tierra bajo medición (Cp) y el segundo en una estructura metálica aterrizada para la cual se determinará el potencial de toque, en este mismo punto se ubica uno de los electrodos de potencial (P1) y el sobrante (P2) se conecta en un electrodo enterrado unos pocos centímetros en la superficie de la subestación. Para la determinación del potencial de paso se lleva a cabo el mismo procedimiento descrito en el método anterior a partir de las mediciones del potencial de toque.

2.7.4.4 Medición con un multímetro de tierra basado en computadora

El principio de funcionamiento es el mismo que con un telurómetro, la diferencia radica en que el proceso de análisis de los resultados filtra ruido existente en las mediciones por el método de correlación.

En la tabla 6 se muestra cada método con sus ventajas y desventajas.

Método	Ventaja	Desventaja
Falla preparada	Provee el valor más exacto.	Requiere especial cuidado y preparación para llevarse a cabo de manera segura. No se justifica para determinar este tipo de parámetros.
Falla bajo voltaje	Precisión depende de la exactitud de la corriente de cortocircuito esperada en la subestación	Necesaria des energización de la subestación.
Medición con telurómetro	Fácil de realizar. Poca o nula preparación previa. Al igual que el método anterior, se necesita la corriente de cortocircuito en la subestación.	Si ocurre una falla al momento de realizar la prueba el equipo puede resultar dañado
Medición con multímetro basado en computadora	Buena precisión. El algoritmo compensa los errores introducidos en la medición.	Equipo caro.

Tabla 6: Ventajas y desventajas de los métodos de medición de potencial superficiales

En la medición de estos parámetros, es usual la implementación de algunas técnicas para simular mejor las condiciones reales cuando ocurra en una falla, tales como la preparación de calzado

con una lámina metálica en la suela conectados directamente a una resistencia de 1000Ω que represente el cuerpo humano, la medición puede ser realizada con una persona utilizando dicho calzado (Day & Patel, 2010) o posicionando las placas con pesas para tomar la medición (INGELMEC S.A) la resistencia se aplica entre ambas láminas para el potencial de paso y entre la superficie de contacto y las láminas para el potencial de paso. Al momento de tomar estas mediciones puede existir una variante en la medición de potenciales de toque en circuito cerrado y abierto (Day & Patel, 2010). Se distinguen por la interconexión de una resistencia de 1000Ω para las mediciones de circuito cerrado o sin ella para la medición de circuito abierto.

Otra forma válida para la determinación del potencial de paso es tomar dos mediciones de potencial de toque, una con la punta de medición del suelo separadas un metro respecto de la otra, y evaluar la diferencia. Esto se basa en la ecuación 16 y 17.

$$V_{Step} = V_{touch\ 1} - V_{touch\ 2} = (V_{estr\ 1} - V_{sup\ 1}) - (V_{estr\ 1} - V_{sup\ 2}) \quad (16)$$

$$V_{step} = V_{sup\ 2} - V_{sup\ 1} \quad (17)$$

En donde:

$V_{estr\ 1}$: Voltaje en la superficie de la estructura metálica conectada a tierra

V_{sup} : Voltaje en un punto de la superficie.

Existe el concepto de contornos de potencial correspondiente a estudios en los que se determinan curvas, muy parecidas a las curvas de nivel en topografía, que delimitan zonas con un mismo potencial en la superficie de la subestación por lo que entre más cercanas se encuentren las líneas equipotenciales mayor será el nivel de potencial de paso experimentado en ese punto (IEEE Std 81,1983).

Es importante tomar en cuenta que dependiendo de la línea que transporte la corriente de falla, así será el potencial en un punto dentro de la subestación, dado que la corriente de falla tiende a circular por debajo de la misma para retornar a su origen, por lo que el gradiente de potencial tendrá una pendiente mucho más inclinada en esa trayectoria que en la tierra adyacente.

Las mediciones deben ser tomadas por el método de falla a bajo voltaje definido en el apartado 2.7.4.2 con corriente de prueba en el orden de los 50 a 100 amperios. Estos mapas resultantes pueden determinar zonas donde el potencial de paso puede alcanzar niveles que sobrepasen el aislamiento del equipo de protección.

2.7.4.5 Medición del GPR

Para la medición del GPR solamente es necesario hacer pasar una corriente a través de la red de tierra determinando así la caída de potencial en la misma. La norma IEEE Std 81 no describe un procedimiento para la medición del GPR, por lo que el cálculo se dejará a partir de la ecuación 21, tomando como datos principales la impedancia de puesta a tierra por alguno de los métodos del apartado 2.6 (Métodos de medición de resistencia de puesta a tierra). Al momento de diseño de la subestación se tiene prevista la capacidad de corriente de cortocircuito, además de estimar con el factor de división de la corriente de falla S_f como se mencionó en el apartado 2.6.1.6.

Existen experimentos realizados en otros países para la determinación práctica del valor de GPR ante la caída de rayos (Yang, y otros, 2010) (Wolinski & Wiater, 2007), el ensayo se lleva a cabo utilizando un equipo generador de transitorios de alto voltaje inyectando el impulso a través de uno de los pararrayos de la subestación. La medición del potencial generado por la corriente inyectada se realiza entre una tierra remota que se considera a un potencial de 0V y un punto dentro de la subestación. La distancia debe considerarse lejana, tendiendo al infinito, en relación al tamaño del sistema de puesta a tierra. El mismo criterio utilizado para seleccionar la distancia del electrodo de corriente en la medición de la impedancia de puesta a tierra por el método de caída de potencial puede ser aplicado aquí.

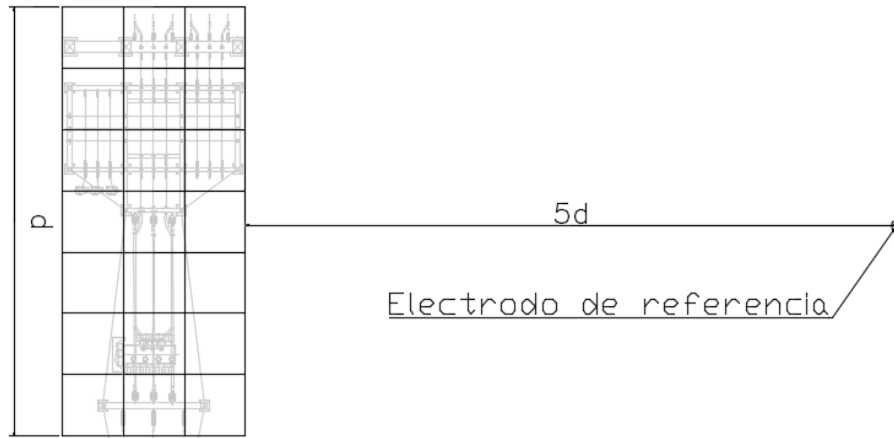


Figura 24: Ubicación de electrodo de referencia para medición del GPR.

CAPÍTULO 3: MANUAL DE PRUEBAS

3.1 CONDICIONES DE SEGURIDAD PARA LAS MEDICIONES

3.1.1 PRECAUCIONES GENERALES

- En terrenos que abarquen la subestación en prueba o a su red de alimentación, no se deben programar mediciones si existen probabilidades de tormentas eléctricas o en curso.
- No conectar ni exponer los cables de prueba a las torres de transmisión fuera de servicio durante un período donde los rayos podrían ser frecuentes.
- Mientras las mediciones no se están realizando, todos los cables de prueba que estén listos para llevarlas a cabo, deben ser desconectados del sistema eléctrico y se deben tomar las precauciones tratándolos como si estuvieran energizados.
- Si comienza una tormenta eléctrica en la zona de prueba, detenga todas las mediciones inmediatamente y desconecte de los electrodos o de la malla de tierra los cables de prueba que han sido instalados temporalmente para la toma de las mediciones.
- No está permitido que las manos cierren el circuito entre dos puntos con riesgo de un voltaje peligroso. El EPP puede reducir los riesgos asociados al manejo de cables de prueba que se extienden fuera de la subestación o de la malla de tierra.
- Los cables y los electrodos de prueba en uso deben estar aislados del equipo de trabajo y del público antes de aplicar los voltajes de prueba. También se deben aislar antes de ser conectados al sistema de tierra de la subestación o cualquier sistema de que pueda transportar corrientes peligrosas en caso de falla.
- Debido a que las mediciones duran poco tiempo, se deben desconectar los electrodos y cables de prueba después de realizarlas.
- Si los electrodos o cables de prueba no están a la vista del personal o si están sobre el acceso público, estos puntos deben estar bajo observación continua por otra persona comunicada vía radio si es necesario, siempre que los voltajes aplicados sean mayores de 50V. Estos elementos pueden causar voltajes transferidos que sobrepasaría por mucho el valor mencionado y deben ser observados siempre que se encuentren conectados a la malla de tierra.

- Los cables de prueba que no están aterrizados y se extienden paralelamente a una línea energizada por varios cientos de pies, pueden presentar voltajes peligrosos si esta línea maneja grandes cantidades de corriente debido a la inducción. Se puede mitigar este problema con la orientación de los cables de prueba (ponerlos perpendicular a la línea energizada) también conectándolos a tierra, o haciendo ambas cosas.

ASPECTOS DE SEGURIDAD PARA LA PREPARACIÓN DE PRUEBAS

- Usar equipo de protección personal con aislamiento para alto voltaje: Guantes, botas, protección para ojos y cascos.
- Trabajar sobre grava o un material aislante como una manta eléctrica.
- Evitar el contacto desnudo “mano a mano” entre el equipo y los cables de prueba extendidos.
- Asegurar que el carrete del cable está aislado o montado sobre una superficie aislada.
- Hacer las conexiones de los cables a los equipos hasta que el personal se encuentre en una zona segura.
- Recoger los electrodos de trabajo después de la última prueba.

LOS PELIGROS DE MAYOR RIESGO

- Cuando una línea de transmisión fuera de servicio comparte el derecho de vía con líneas energizadas, pueden existir voltajes peligrosos debido a la inducción en la terminación de la línea.
- Puede existir un voltaje peligroso entre el electrodo bajo prueba y la tierra remota durante el procedimiento o si, mientras se lleven a cabo las pruebas, ocurre una falla en el sistema de potencia que involucre el sistema de tierra de la subestación. El GPR puede ser en el orden de varios miles de voltios. Los voltajes de toque y paso alrededor del electrodo bajo pruebas, equipos de medición y la tierra remota también pueden ser letales.

3.1.2 EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Es necesario que el encargado y los involucrados en el proceso de medición utilicen el equipo de protección personal, y aunque este no garantiza al cien por ciento la exención de daños, puede disminuir los efectos provocados por un accidente eléctrico. Estos elementos, se presentan en la tabla 7.




EQUIPO	IMAGEN	OBSERVACIONES
Casco		Protección contra golpes. Tienen grado de aislamiento eléctrico según tipo, por ejemplo hay normas que los clasifican como A, B, C etc.
Lentes		Protección ocular de los rayos UV o materiales en el medio. Se recomienda utilizar con cordón para mayor fijeza
Guantes de carnaza		Protección contra golpes, rayones, cortaduras, altas temperaturas etc. Recomendado para trabajos de fuerza.
Guantes aislantes		Guantes con aislamiento según clase, que pueden ser 00, 0, 1, 2, 3, etc. Cada uno con un nivel de tensión de prueba y con un máximo de utilización.
Botas		Se recomiendan que sean con aislamiento eléctrico. Puede o no tener cubo de acero según sea la aplicación.
Chalecos		Se recomienda usar para trabajos que se hacen en la vía pública y alertar a los peatones y conductores sobre la presencia de trabajadores.
Manta Aislante		Se utiliza para trabajar sobre ella, también colocar el equipo de medición y carretes de cables que se usen para las pruebas.

Tabla 7: EPP requerido para llevar a cabo mediciones de resistencia de puesta a tierra

Además, se recomienda usar equipo de comunicación por radio ya que las mediciones se extienden por varios metros y es posible que se pierda el contacto entre el operador del equipo y el que lleva los electrodos al lugar correspondiente de la prueba.

No se recomienda el uso del equipo de protección personal si presenta las siguientes características:

- Rotura, orificios, cortes
- Si están agrietados, endurecidos o que estén pegajosos o inelásticos.
- Objetos insertados o cualquier otra característica que afecte su aislamiento.

Si las presentara, se recomienda la suspensión de su uso. El equipo debe ser revisado continuamente y probado su aislamiento al menos una vez al año.

3.2 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPO DE MEDICIÓN

En el capítulo 2 se desarrollaron los métodos para tomar mediciones de resistividad, resistencia de puesta a tierra y estimaciones de potenciales superficiales. Por lo que el equipo puede resumirse en un medidor de resistencia, el cual, para estas aplicaciones, se le conoce como telurómetro. Es posible escoger un único equipo que disponga de la capacidad de realizar todas las funciones, para lo cual debe contar con cuatro terminales o medición de resistencia de cuatro puntos. Esto es para tener separados el par de inyección de corriente de prueba y el par de medición de potencial.

CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD

Para aplicaciones de diseño de redes de puesta a tierra, se considera una profundidad de prospección máxima de 10 metros. Para el método de Wenner; el cuál es el que necesita una mayor separación entre electrodos y longitud de los conductores requeridos; fácilmente se cumplen los requisitos de conductores con las bobinas incluidas con el equipo por el fabricante. Por lo que este último detalle se ve determinado por los métodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra.

Dependiendo del tipo de terrenos que se espera medir, así es la capacidad de inyección de corriente del equipo de medición: corriente máxima y voltaje máximo aplicado, esto para lograr hacer circular la corriente de prueba en suelos altamente resistivos. La norma IEEE 81, establece que un valor comercial para estos parámetros es de 250mA y 50V respectivamente, mientras que la norma IEC 61557-5 indica que el valor de 50V RMS y 70V pico deben ser los máximos en esta aplicación para evitar la existencia de voltajes peligrosos durante las mediciones. Para un mejor resultado se recomienda el uso de señales AC para descartar efectos capacitivos en el suelo bajo medición a frecuencias variables que permitan descartar los efectos de corrientes parásitas circulando naturalmente en el suelo.

CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS PARA LA MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA Y POTENCIALES SUPERFICIALES.

Para el caso de la aplicación del método de caída de potencial en el cual se utilizan solamente tres puntos, se cortocircuitan en la red de puesta a tierra bajo medición una punta de corriente con una de potencial; esta unión se realiza en la red de tierra y no en el equipo por lo que deben tenderse ambos conductores, esto se explicará con mayor detenimiento en un apartado posterior.

Otro factor muy importante que debe considerarse es la dimensión de las redes de tierra que se espera medir, lo cual influye en la longitud de conductores requeridos para alejarse del área de efecto de la red bajo prueba. Una opción es buscar un kit en el cual el fabricante incluya los conductores requeridos o adquirir por separado la longitud deseada tomando en cuenta la posición de los electrodos de prueba por lo que no es necesario que los conductores de cada terminal sean de la longitud del electrodo más lejano.

La frecuencia de la señal de prueba es importante para desprestigiar las posibles corrientes parásitas que circulen dentro de la red bajo prueba las cuales corresponden a la frecuencia de operación del sistema, 60Hz en El Salvador, pero también es importante que la señal tenga una frecuencia cercana a esta con el fin de que la resistencia medida sea el valor visto por el sistema en situaciones bajo falla a frecuencia de 60Hz. Es importante considerar a su vez que para fines de protección contra descargas atmosféricas no solamente es importante el valor de resistencia

sino también la componente inductiva que puede volverse significativa a la alta frecuencia que corresponde a este tipo de descarga.

Una característica importante que debe considerarse es la variedad de accesorios o expansiones que pueda tener el equipo, por ejemplo, la utilización de tenazas tipo amperimétrica, que puedan conectarse al equipo para poder realizar mediciones con un electrodo o arreglo de electrodos conectados al sistema eléctrico utilizando el método Clamp-on. Siendo algunos tipos capaces de agregar la funcionalidad de medir la resistencia de puesta a tierra de líneas de transmisión eliminando la necesidad de desconectarlas del cable de guarda.

3.3 PROCEDIMIENTO DE MEDICIONES

3.3.1 RESISTIVIDAD DEL SUELO

Las mediciones de resistividad del suelo se realizan con un medidor de tierra comúnmente llamado *Telurómetro* y el equipo adicional descrito en el apartado 3.2

A continuación, se describen los pasos a seguir para realizar una correcta medición de resistividad del suelo.

3.3.1.1 Método de cuatro puntos (Wenner y Schlumberger)

1. Identificar el terreno en el cual se harán las mediciones, limitando el área de interés previamente.
2. Utilizar una cinta métrica para identificar las posiciones iniciales de los electrodos de prueba en el terreno según el arreglo seleccionado, Wenner o Schlumberger.
3. Enterrar los electrodos de prueba en el terreno con la ayuda de una almádana. La profundidad de enterramiento debe ser mucho menor al espaciamiento entre electrodos, de 20 a 30 cm.
4. Conectar los electrodos de prueba al telurómetro mediante los cables proporcionados por el fabricante del mismo. Verificar el manual del equipo para la correcta conexión del cableado.
5. Encender el equipo y seleccionar la prueba a realizar, que en este caso es de resistividad del suelo, la mayoría de equipos indican con ρ dicha prueba.

6. Seleccionar el método o arreglo de los electrodos, en caso de ser Wenner introducir la distancia del espaciamiento entre cada electrodo la cual varía para cada medición, en caso de ser Schlumberger introducir la distancia entre los electrodos de potencial la cual es fija y la distancia entre el electrodo de corriente y potencial la cual es variable en cada medición. En ciertos telurómetros esta última distancia mencionada varía ya sea desde el centro hasta el electrodo de corriente o desde el electrodo de potencial hacia el electrodo de corriente. Consultar el manual del equipo.
7. Verificar que todos los pasos anteriores se hayan realizado correctamente.
8. Ejecutar la prueba, esperar los resultados y anotarlos en el formato RhoW o RhoS. Algunos equipos muestran la medición de la resistencia que presenta la tierra y calculan internamente la resistividad y la presentan en $\Omega.m$, otros solo muestran la medición de resistencia luego se debe de calcular la resistividad a parte mediante las ecuaciones correspondientes al arreglo utilizado.
9. Ampliar el espaciamiento de los electrodos según sea el arreglo utilizado desde el principio
10. Realizar la prueba una vez más y repetir los pasos 8 y 9 hasta finalizar con todas las mediciones.
11. Apagar el equipo, desmontar los electrodos y cables.

Precauciones al tomar mediciones de resistividad por este método

- Los electrodos o placas deben estar limpios y exentos de óxido para posibilitar un buen contacto con el suelo.
- Asegurarse que en el terreno en donde se realizarán las mediciones no existe ninguna red de tierra, estructuras o tuberías metálicas, líneas de tensión subterráneas, o algún tipo de objetos que afecten dichas mediciones.
- Si el equipo no muestra alguna medición o en algunos casos muestra errores de lectura debido a la resequedad del terreno, aumentar el voltaje de prueba poco a poco en el rango que el fabricante provee en el manual. Si este problema persiste remojar el contacto entre el electrodo y la tierra con agua salada.

- Cuando existe demasiado ruido en la medición los equipos muestran un error, para corregirlo se debe cambiar la frecuencia a la cual se está realizando dicha medición. Consultar con el manual del fabricante las frecuencias de prueba con las que cuenta el equipo.

3.3.1.2 Tomografía eléctrica resistiva

Equipo requerido a utilizar exclusivamente en este método

1. Electrodo de baja resistencia
2. Cables de gran extensión que permitan conectar electrodos cada cierto metraje
3. Conectores cable-electrodos
4. Fuente de Energía DC: batería
5. Unidad central o Resistivímetro
6. Conmutadores para conectar los grupos de electrodos.
7. Laptop por si se desea procesar en el campo los resultados

Pasos para la tomografía eléctrica resistiva

1. Se define el espaciamiento entre electrodos. Distancias de 1 metro son suficientes para los fines de un sistema de puesta a tierra debido a que no se necesita una descripción demasiado detallada del terreno.
2. Se extiende la cinta métrica para llevar un control de los puntos donde se han de enterrar los electrodos y respetar los espaciamientos definidos.
3. Se enclavan los electrodos usando una almádana. El electrodo se entierra hasta que se tiene una buena resistencia mecánica, es decir un buen contacto con el suelo para disminuir la resistencia entre este y la tierra.
4. Debido a que la tomografía pierde resolución en los extremos debido a la dirección de las corrientes inyectadas y también a que bajo el primer y último electrodo no se puede sondear muy profundo, se debe proyectar la línea de los electrodos a una distancia prudencial fuera del área en estudio para que se obtenga la cobertura de esta.

5. Se enlazan los electrodos al cable por medio de los conectores. Generalmente estos cables presentan áreas sin aislamiento para tal fin. Se deben conectar lo más cercano al suelo. Si los electrodos tienen la palanca o cruz que se utiliza para sacarlos de la tierra, se debe evitar conectar en esta parte pues la soldadura presenta una alta resistencia e influiría de manera negativa a los resultados.
6. Se conecta el grupo o grupos de electrodos a la unidad de switcheo. El número de electrodos por grupo depende de cuántos se puedan conectar al cable. Puede variar dependiendo de la marca del equipo, de cuántos grupos se puedan conectar al dispositivo y de la distancia de los cables.
7. Se procede con la programación del equipo iniciando con una comprobación de que todos los electrodos están perfectamente conectados y que no tienen una resistencia muy alta en su unión con el suelo. En el caso de tener una alta resistencia entre el suelo y alguno de los electrodos, se puede introducir más a la tierra o también se puede remojar usando agua con sal para mejorar la conductividad.
8. Se procede a programar la unidad central o resistivímetro y se introduce el nombre del archivo donde se guardarán los datos y luego se introducen sus variables: número y espaciamiento entre electrodos, dispositivo a utilizar (Wenner, Schlumberger, etc) el número de mediciones a tomar, etc. La forma de introducir estas configuraciones depende de cada modelo del equipo pero son las que se deben programar en todos.
9. Como un dato de referencia los equipos actuales pueden tomar alrededor de 500 mediciones en el transcurso de una hora. Haciendo que este proceso además de automatizado sea rápido.
10. La secuencia de medida es un programa que puede ser realizado por el investigador según sus necesidades o se pueden utilizar las que los equipos traen por defecto.
11. Se espera a que el equipo termine de realizar las mediciones y luego de esto se desconecta para proceder con una nueva línea de mediciones y se repite el proceso.
12. El procesado de datos se puede realizar en el campo o posteriormente. Basta con descargar los datos al programa que trae el equipo utilizado, y mediante el método de inversión, crea el modelo que se está buscando. Este proceso es iterativo, va eliminando

los datos atípicos y hasta que el error RMS sea más bajo que el que el investigador ha definido, se deja de iterar y se obtiene el modelo.

Precauciones al tomar mediciones de resistividad por este método

- Los electrodos o placas deben estar limpios y exentos de óxido para posibilitar un buen contacto con el suelo.
- Asegurarse que en el terreno en donde se realizarán las mediciones no existe ninguna red de tierra, estructuras o tuberías metálicas, líneas de tensión subterráneas, o algún tipo de objetos que afecten dichas mediciones.
- Dependiendo del fabricante, el equipo muestra un mensaje cuando existe una mala conexión o mal contacto entre el cable y los electrodos, deberá revisarse dicho electrodo para su correcto funcionamiento. Si este problema persiste remojar el contacto entre el electrodo y la tierra con agua salada para mejorar el contacto entre estos.
- Cuando existe demasiado ruido en la medición los equipos muestran un error, para corregirlo se debe cambiar la frecuencia a la cual se está realizando dicha medición. Consultar con el manual del fabricante las frecuencias de prueba con las que cuenta el equipo.

3.3.1.4 Procedimiento para el modelado de terreno

Un terreno se puede modelar como suelo homogéneo y no homogéneo.

Clasificación de los métodos de modelado de suelo homogéneo:

- a) Valor promedio de las resistividades medidas
- b) Promedio de la medición mínima y la medición máxima de resistividades aparentes
- c) Método estadístico BOX-COX

Se debe tener en cuenta que estos métodos pueden ser aplicados cuando la diferencia de variación de las mediciones es moderada como se mencionó en el apartado 2.5.6.

- a) *Valor promedio de las resistividades medidas*: Es uno de los modelos más rápidos de elaborar, pero menos preciso, este puede ser utilizado como una primera aproximación,

el cual puede obtenerse mediante el promedio aritmético de las mediciones como se muestra en la ecuación 18:

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} [\Omega \cdot m] \quad (18)$$

En donde:

$\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}$: Mediciones de resistividad aparente realizadas

n : Número de mediciones realizadas

b) Promedio de la medición mínima y la medición máxima de resistividades aparentes:

Se aplica la ecuación 19:

$$\rho_{2(av2)} = \frac{\rho_{a(\max)} + \rho_{a(\min)}}{2} [\Omega \cdot m] \quad (19)$$

En donde:

$\rho_{a(\max)}$: Valor máximo de la resistividad aparente medida

$\rho_{a(\min)}$: Valor mínimo de la resistividad aparente medida

El modelo de suelo homogéneo determinado utilizando la ecuación 9, del máximo y mínimo de las resistividades, debe emplearse para diseñar una malla de tierra con varillas, las cuales deben, por lo menos, alcanzar la profundidad a la cual corresponde la resistividad promedio.

c) Método estadístico BOX-COX: Este método busca un valor con probabilidad de 70% de ser el valor real (Moreno Ospina, Valencia Velásquez, Cárdenas Agudelo , & Villa Acevedo , 2007). Este método se emplea aplicando los siguientes pasos:

1. Elaborar una tabla, en una columna se tabulan los datos de resistividad aparente medida ρ_i
2. En otra columna se colocan los logaritmos naturales de las resistividades aparentes $\ln(\rho_i)$
3. Se encuentra el promedio de los valores obtenidos en el paso 2 que serán $\ln(\rho)_{\text{PROM}}$.

4. En otra columna se coloca el resultado de la siguiente operación $(Ln(\rho_i) - Ln(\rho)_{prom})^2$ para cada medición

5. Se calcula la desviación estándar como:

$$S = \sqrt{\frac{(Ln(\rho_1) - Ln(\rho)_{prom})^2 + (Ln(\rho_2) - Ln(\rho)_{prom})^2 + \dots + (Ln(\rho_i) - Ln(\rho)_{prom})^2}{n}} \quad (20)$$

6. De la distribución normal se toma Z para 70%, del cual se obtiene como resultado 0.524411

7. Se utiliza la ecuación 21 para encontrar la resistividad con 70% de probabilidad de ser la real:

$$\rho = e^{(S \cdot Z) + Ln(\rho)_{prom}} [\Omega \cdot m] \quad (21)$$

Clasificación de los métodos de modelado de suelo no homogéneo:

- a) Método gráfico de Sunde
- b) Método del gradiente

Los métodos de modelado de suelo no homogéneo es el más complicado de aplicar ya que se buscan las resistividades de la capa superficial y su espesor y la capa más profunda asumiendo espesor infinito (Figura 25).

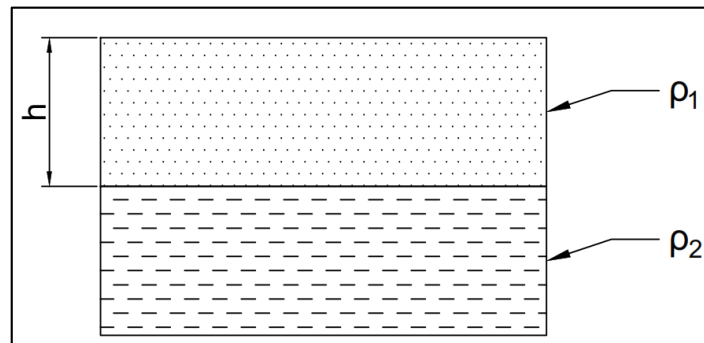


Figura 25: Resultado esperado del modelado de 2 capas

a) **Método gráfico de Sunde** (IEEE Std 80, 2000): El cual involucra un coeficiente de reflexión, calculado por medio de la ecuación 22, que es un factor que representa el cambio abrupto de la resistividad aparente en los límites de cada capa del suelo.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (22)$$

En donde:

ρ_1 : Resistividad de la capa superficial

ρ_2 : Resistividad de la capa interna

A continuación, se enlistan los pasos a seguir para determinar la profundidad de la capa superficial h en el método gráfico de Sunde. Las resistividades de ambas capas tanto la superficial como la más profunda son determinadas por simple inspección mediante la gráfica resistividad aparente vs espaciamento de electrodos de prueba. Las mediciones de resistividad deben ser tomadas con el método de cuatro puntos arreglo Wenner.

1. Dibujar la gráfica de resistividad aparente vs espaciamento de electrodos de prueba con los datos obtenidos de las mediciones.
2. Estimar, de la gráfica del paso 1, la resistividad de la capa superficial y la resistividad de la capa más profunda, ρ_1 y ρ_2 respectivamente.
3. Determinar $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ y seleccionar la curva de la gráfica de Sunde (figura 26), si no existe una curva exacta, se debe interpolar y dibujar una nueva curva o tomar la curva más cercana.
4. Seleccionar el valor en el eje Y de $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ dentro de la región de la pendiente de la curva $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ encontrada en el paso 3.
5. Leer el correspondiente valor de $\frac{a}{h}$ en el eje X
6. Calcular ρ_a , despejando de $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ del paso 4.

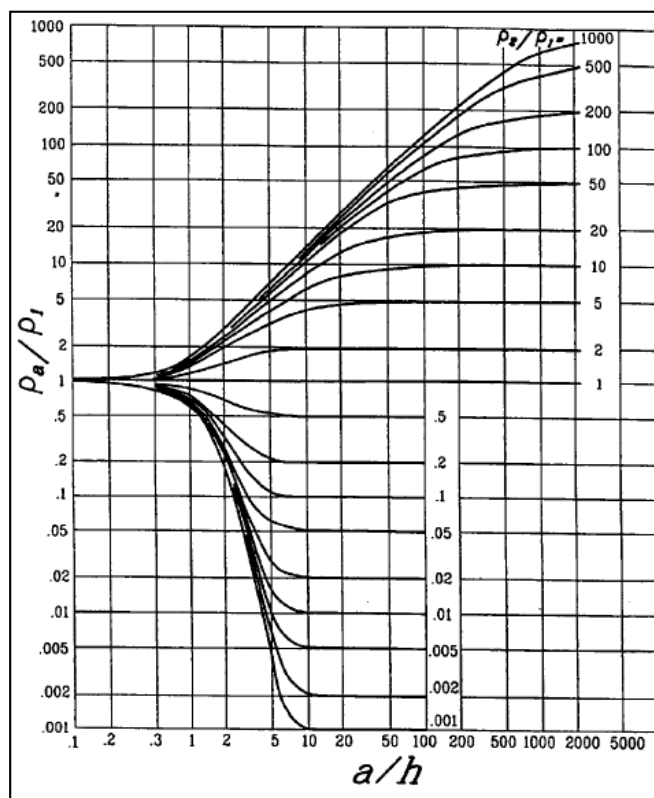


Figura 26: Gráfica de Sunde

7. Leer el espaciamento de electrodos de prueba a de la gráfica del paso 1, con la resistividad aparente ρ_a encontrada en el paso 6.
8. Calcular la profundidad de la capa superficial h con resistividad ρ_1 despejando de la ecuación $\frac{a}{h}$ del paso 5, conociendo a obtenido en el paso 7.

b) Método del gradiente descendente: Este método puede ser utilizado cuando las mediciones han sido obtenidas mediante el arreglo Wenner (IEEE Std 81, 2012)

Primeramente, se tiene la ecuación 23 que se utiliza para obtener la resistividad aparente

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right) \right] \quad (23)$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (24)$$

A partir de esta ecuación se implementa un algoritmo denominado método del gradiente descendente, que utiliza las ecuaciones 31-33 para minimizar una función error dada por la ecuación 25.

$$\psi(\rho_1, \rho_2, h) = \sum_{m=1}^N \left[\frac{(\rho_m^0 - \rho_m)}{\rho_m^0} \right]^2 \quad (25)$$

Donde:

N: Número total de valores de resistividad medidos con un espaciamiento entre electrodos a como parámetro

ρ_m^0 Resistividad medida para un espaciamiento a entre electrodos

ρ_m Resistividad calculada con la ecuación 23 para un espaciamiento a entre electrodos

Para minimizar el error se reajustan los valores para ρ_1 , ρ_2 y h sumando un valor dependiente del error que se tiene en la iteración actual. Dichos valores se definen en las ecuaciones 26-28.

$$\Delta\rho_1 = -0.005|\rho_1| \text{sign} \left(\frac{\partial\psi}{\partial\rho_1} \right) \quad (26)$$

$$\Delta\rho_2 = -0.005|\rho_2| \text{sign} \left(\frac{\partial\psi}{\partial\rho_2} \right) \quad (27)$$

$$\Delta h = -0.005|h| \text{sign} \left(\frac{\partial\psi}{\partial h} \right) \quad (28)$$

El error viene dado por la ecuación 29. Un valor de error común para este método es de 0.0001.

$$|\Delta\psi| > \epsilon \quad (29)$$

$$\Delta\psi = \frac{\partial\psi}{\partial\rho_1} \Delta\rho_1 + \frac{\partial\psi}{\partial\rho_2} \Delta\rho_2 + \frac{\partial\psi}{\partial h} \Delta h \quad (30)$$

Donde:

$$\frac{\partial\psi}{\partial\rho_1} = -2 \sum_{i=1}^N \left\{ \left[\frac{\rho^0(a_i) - \rho(a_i)}{[\rho^0(a_i)]^2} \right] \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(1 - \frac{n(1-K^2)}{2K} \right) \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a_i} \right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a_i} \right)^2}} \right) \right] \right] \right\} \quad (31)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \rho_2} = -2 \sum_{i=1}^N \left\{ \left[\frac{\rho^0(a_i) - \rho(a_i)}{[\rho^0(a_i)]^2} \right] \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2n}{K} (1 - K^2) \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a_i}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a_i}\right)^2}} \right) \right] \right] \right\} \quad (32)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial h} = -2 \sum_{i=1}^N \left\{ \left[\frac{\rho^0(a_i) - \rho(a_i)}{[\rho^0(a_i)]^2} \right] \left[\frac{16\rho_1 h}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[n^2 \left(\frac{K^n}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a_i}\right)^2} \right)^3} - \frac{K^n}{\left(\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a_i}\right)^2} \right)^3} \right) \right] \right] \right\} \quad (33)$$

En la figura 27 se muestra un flujograma que muestra el proceso de cálculo a ser implementado en una herramienta informática como Matlab u Octave

En el diseño de sistemas de puesta a tierra el modelo de dos capas es generalmente el adecuado para utilizar (Ibsaim & Ammar, 2014).

3.3.2 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

En la medición de la resistencia de puesta a tierra pueden cometerse errores los cuales no son tan sencillos de identificar ya que hay casos en los que se obtiene un valor el cual puede parecer correcto, pero no lo es, mediante la experiencia se determinan los casos en los que esto puede ocurrir, es por esto que se enlistan los pasos para cada uno de los métodos de medición de la resistencia de puesta a tierra y sus debidas precauciones.

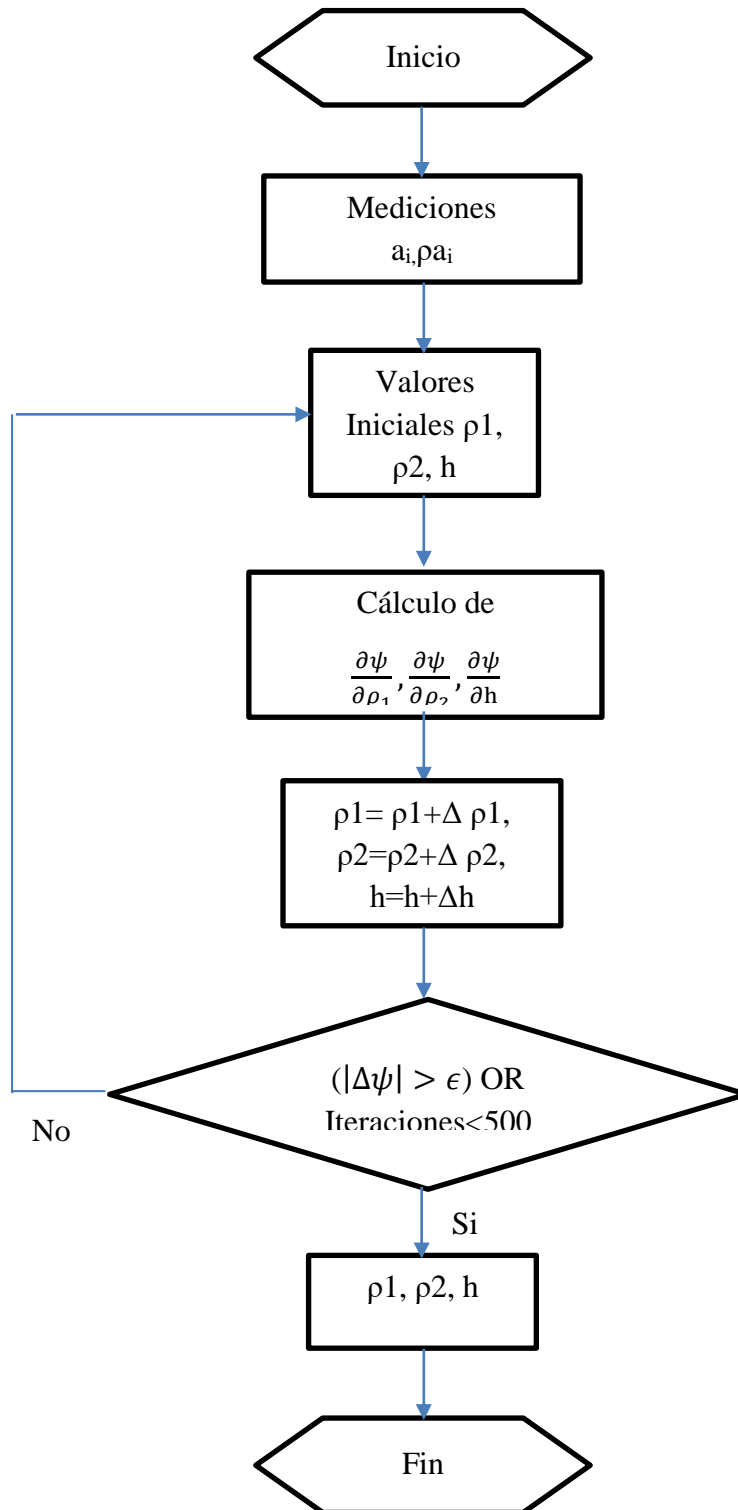


Figura 27: Flujograma para modelado de suelos de dos capas

3.3.2.1 Método de dos puntos

1. Identificar el sitio en el cual se realizarán las mediciones y el electrodo auxiliar a utilizar por ejemplo una tubería metálica que transporta agua.
2. Desconectar el electrodo de puesta a tierra del sistema.
3. En el telurómetro, conectar mediante cables, puentes cortos entre el terminal de potencial 1 y el terminal de corriente 1 al igual que en los terminales 2. Consultar con el manual del fabricante la simbología de las terminales.
4. Conectar el terminal de corriente 1 y 2 en el electrodo de tierra bajo estudio y el electrodo auxiliar respectivamente.
5. Verificar que todos los pasos anteriores se hayan realizado correctamente
6. Encender el equipo y seleccionar la prueba a realizar, en este caso resistencia de puesta a tierra.
7. Ejecutar la prueba y esperar los resultados.
8. Realizar la prueba una vez más. Si se dispone de otro electrodo auxiliar con las mismas características que el primero y con una distancia similar al electrodo de tierra en estudio, realizar la prueba en ese punto. Si la medición no varía en gran manera que la obtenida en el paso 7, sacar el promedio de ambas mediciones y tomarla como valor de la resistencia de puesta a tierra.
9. Si no se dispone de otro electrodo auxiliar, realizar la prueba en los mismos puntos de 4 a 5 veces y obtener, mediante el promedio de las mediciones, el valor de la resistencia de puesta a tierra.
10. Apagar el equipo, desmontar los electrodos y cables.
11. Conectar la malla de tierra nuevamente al sistema.

Precauciones al tomar mediciones de resistencia por este método

- La distancia entre el electrodo auxiliar y el electrodo de tierra no debe ser tan corta
- Si el electrodo en estudio no se desconecta del sistema, el valor obtenido de la resistencia de puesta a tierra será erróneo debido a las corrientes de neutro que circulan por él.
- Si el equipo no muestra alguna medición o en algunos casos muestra errores de lectura debido a la resequedad del terreno, remojar el contacto entre el electrodo en estudio y la tierra con agua salada.

- Cuando existe demasiado ruido en la medición los equipos muestran un error, para corregirlo se debe cambiar la frecuencia a la cual se está realizando dicha medición. Consultar con el manual del fabricante las frecuencias de prueba con las que cuenta el equipo.

3.3.2.2 Método de caída de potencial (62%)

1. Estudiar la malla de tierra mediante los planos, identificando sus longitudes y los puntos de prueba.
2. Desconectar el neutro del sistema o de la malla de tierra.
3. Conectar el punto de prueba al telurómetro mediante los cables proporcionados por el fabricante. El punto de prueba debe ser tomado de los pozos de tierra dedicados para este fin, de no existir se deben tomar un cable que esté conectado a la malla de tierra por ejemplo el cable de puesta a tierra de la carcasa de un equipo en una subestación
4. Colocar el electrodo auxiliar de corriente a 5 veces la mayor longitud de la malla y conectar mediante cable a la terminal de corriente 2 del telurómetro. Consultar en el manual del equipo dicha terminal.
5. Colocar el electrodo auxiliar de potencial a una longitud que debe ser el 62% de la distancia del electrodo de corriente a la malla de tierra en estudio y conectar mediante cable a la terminal de potencial 2 del telurómetro. Consultar en el manual del equipo dicha terminal.
6. En el telurómetro, colocar un puente mediante cable entre la terminal de potencial y corriente 1, este puente debe de ser lo más corto posible. Consultar en el manual del equipo dichas terminales
7. Verificar que todos los pasos anteriores se hayan realizado correctamente
8. Encender el equipo y seleccionar la prueba a realizar, en este caso resistencia de puesta a tierra.
9. Ejecutar la prueba, esperar los resultados y anotarlos en el formato RFOP62.
10. Si se dispone de espacio, realizar la prueba una vez más con las mismas distancias, pero en otra dirección. De ser posible, tomar hasta 3 mediciones en diferentes direcciones.
11. Si no se dispone de espacio, tomar la medición en los mismos puntos de 2 a 3 veces.

12. El valor de resistencia de puesta a tierra se obtiene mediante el promedio de las mediciones realizadas.
13. Apagar el equipo, desmontar los electrodos y cables.
14. Conectar la malla de tierra nuevamente al sistema.

Precauciones al tomar mediciones de resistencia por este método

- Las distancias entre los electrodos auxiliares y la malla de tierra deben cumplir con las mencionadas anteriormente.
- El puente entre las terminales de corriente y potencial 1 debe ser lo más corto posible, de no cumplir lo anterior se presentará una lectura de resistencia de puesta a tierra muy elevada e incorrecta.
- Si el neutro no se desconecta de la malla de tierra en estudio, el valor obtenido de la resistencia de puesta a tierra será erróneo debido a las corrientes de neutro que circulan por ella.
- Si el equipo no muestra alguna medición o en algunos casos muestra errores de lectura debido a la resequedad del terreno, remojar el contacto entre el electrodo en estudio y los electrodos auxiliares con la tierra utilizando agua salada.
- Cuando existe demasiado ruido en la medición los equipos muestran un error, para corregirlo se debe cambiar la frecuencia a la cual se está realizando dicha medición. Consultar con el manual del fabricante las frecuencias de prueba con las que cuenta el equipo.

3.3.2.3 Método de caída de potencial completo

1. Estudiar la malla de tierra mediante los planos, identificando sus longitudes y los puntos de prueba.
2. Desconectar el neutro del sistema o de la malla de tierra.
3. Conectar el punto de prueba al telurómetro mediante los cables proporcionados por el fabricante. El punto de prueba debe ser tomado de los pozos de tierra dedicados para este fin, de no existir se deben tomar un cable que esté conectado a la malla de tierra por ejemplo el cable de puesta a tierra de la carcasa de un equipo en una subestación

4. Colocar el electrodo auxiliar de corriente a 5 veces la mayor longitud de la malla y conectar mediante cable a la terminal de corriente 2 del telurómetro. Consultar en el manual del equipo dicha terminal.
5. Colocar el electrodo auxiliar de potencial a una longitud del 10% de la distancia del electrodo de corriente a la malla de tierra en estudio y conectar mediante cable a la terminal de potencial 2 del telurómetro. Consultar en el manual del equipo dicha terminal.
6. En el telurómetro, colocar un puente mediante cable entre la terminal de potencial y corriente 1, este puente debe de ser lo más corto posible. Consultar en el manual del equipo dichas terminales
7. Verificar que todos los pasos anteriores se hayan realizado correctamente
8. Encender el equipo y seleccionar la prueba a realizar, en este caso resistencia de puesta a tierra.
9. Ejecutar la prueba, esperar los resultados y anotarlo en el formato RFOP.
10. Realizar el paso 5 pero colocar el electrodo de potencial a una longitud del 20% de la distancia del electrodo de corriente realizar el paso 9. Este paso se debe realizar hasta alcanzar el 90% de la distancia del electrodo de corriente
11. El valor de resistencia de puesta a tierra se obtiene mediante el promedio de las mediciones obtenidas en el rango del 50% al 70% de distancia del electrodo de potencial.
12. Apagar el equipo, desmontar los electrodos y cables.
13. Conectar la malla de tierra nuevamente al sistema.

Precauciones al tomar mediciones de resistencia por este método

- Las distancias entre los electrodos auxiliares y la malla de tierra deben cumplir con las mencionadas anteriormente.
- El puente entre las terminales de corriente y potencial 1 debe ser lo más corto posible, de no cumplir lo anterior se presentará una lectura de resistencia de puesta a tierra muy elevada e incorrecta.

- Si el neutro no se desconecta de la malla de tierra en estudio, el valor obtenido de la resistencia de puesta a tierra será erróneo debido a las corrientes de neutro que circulan por ella.
- Si el equipo no muestra alguna medición o en algunos casos muestra errores de lectura debido a la resequedad del terreno, remojar el contacto entre el electrodo en estudio y los electrodos auxiliares con la tierra utilizando agua salada.
- Cuando existe demasiado ruido en la medición los equipos muestran un error, para corregirlo se debe cambiar la frecuencia a la cual se está realizando dicha medición. Consultar con el manual del fabricante las frecuencias de prueba con las que cuenta el equipo.

3.3.2.4 Método de clamp-on

1. Estudiar el sistema de puesta a tierra mediante los planos e identificar los puntos de prueba.
2. Colocar la clamp que induce el voltaje rodeando el punto de prueba
3. Colocar la clamp que mide la corriente rodeando el mismo punto de prueba anterior. Si la clamp con la que se cuenta realiza las dos funciones de inducir el voltaje y medir la corriente producida, no es necesario colocar dos tenazas. Consultar con el fabricante dicha función.
4. Verificar que los pasos anteriores se hayan realizado correctamente
5. Encender las clamp, ejecutar la prueba y anotar los resultados en el formato RClamp
6. El valor de resistencia de puesta a tierra se obtiene mediante ley de ohm, si la clamp realiza las dos funciones mencionadas en el paso 3 entonces el resultado será mostrado en la pantalla de la clamp. Consultar con el fabricante.
7. Si es posible, realizar los pasos anteriores en otros puntos de prueba del mismo sistema de tierra.
8. Apagar la/las clamp/s.

Precauciones al tomar mediciones de resistencia por este método

- La clamp debe colocarse de tal forma que el lazo de retorno de la corriente de prueba se cierre a través de tierra y no de algún conductor que conforme el sistema de puesta a tierra en estudio ya que en este caso se estaría midiendo la continuidad en el mismo.
- Cuando existe demasiado ruido en la medición los equipos muestran un error, para corregirlo se debe cambiar la frecuencia a la cual se está realizando dicha medición. Consultar con el manual del fabricante las frecuencias de prueba con las que cuenta el equipo.

3.3.2.5 Método de caída de potencial/Clamp-on (Torres de transmisión)

1. Identificar la torre de transmisión a medir
2. Colocar el transformador de núcleo partido rodeando una pata de la torre. Si el equipo cuenta con los cuatro transformadores y el amplificador de alta ganancia, colocarlos como indique el fabricante para que la medición de la resistencia de puesta a tierra de la torre sea directa.
3. Colocar el electrodo de corriente en dirección perpendicular a las líneas de transmisión a una distancia de 38 a 46 metros de la cara de la torre.
4. Colocar el electrodo de potencial en dirección perpendicular a las líneas de transmisión y opuesta al electrodo de corriente a una distancia del 62% del mismo.
5. Conectar mediante cables el transformador de núcleo partido y los electrodos de prueba. Consultar con el fabricante dichas conexiones.
6. Verificar que los pasos anteriores se hayan realizado correctamente
7. Encender el equipo.
8. Ejecutar la prueba, esperar resultados y anotarlos en el formato RTT
9. El valor de resistencia de puesta a tierra se obtiene mediante el paralelo de las cuatro patas si se realizan las mediciones de cada pata por separado, si el equipo cuenta con los cuatro transformadores el resultado será el arrojado por el telurómetro.
10. Desconectar el equipo y los accesorios
11. Apagar el equipo

Precauciones al tomar mediciones de resistencia por este método

- La colocación de los transformadores de núcleo partido debe realizarse como indique el fabricante, ya que no pueden colocarse de manera genérica. Consultar el manual del equipo.
- Cuando existe demasiado ruido en la medición los equipos muestran un error, para corregirlo se debe cambiar la frecuencia a la cual se está realizando dicha medición.
- Consultar con el manual del fabricante las frecuencias de prueba con las que cuenta el equipo.
- Similar al método Clamp-on, un ruido de alta frecuencia en el sistema puede influir en la lectura. Una alta relación de ruido a señal también puede ocurrir durante la medición de una alta resistencia de tierra.

3.3.2.6 Método de la pendiente

1. Estudiar la malla de tierra mediante los planos, identificando sus longitudes y los puntos de prueba.
2. Desconectar el neutro del sistema o de la malla de tierra.
3. Colocar el electrodo auxiliar de corriente a 5 veces la mayor longitud de la malla y conectar mediante cable a la terminal de corriente 2 del telurómetro. Consultar en el manual del equipo dicha terminal.
4. Colocar el electrodo auxiliar de potencial a una longitud del 20% de la distancia del electrodo de corriente a la malla de tierra en estudio y conectar mediante cable a la terminal de potencial 2 del telurómetro. Consultar en el manual del equipo dicha terminal.
5. En el telurómetro, colocar un puente mediante cable entre la terminal de potencial y corriente 1, este puente debe de ser lo más corto posible. Consultar en el manual del equipo dichas terminales
6. Verificar que todos los pasos anteriores se hayan realizado correctamente
7. Encender el equipo y seleccionar la prueba a realizar, en este caso resistencia de puesta a tierra.

8. Ejecutar la prueba, esperar los resultados y anotarlos en el formato RPDT
9. Realizar el paso 4 cambiando el electrodo de potencial a una distancia del 40% del electrodo de corriente y realizar una vez más los pasos 6, 7 y 8.
10. Realizar el paso 4 cambiando el electrodo de potencial a una distancia del 60% del electrodo de corriente y realizar una vez más los pasos 6, 7 y 8.
11. Desconectar el equipo y los accesorios
12. Apagar el equipo
13. Los valores obtenidos anteriormente serán R1, R2 y R3 respectivamente, con estos valores calcular el coeficiente de la pendiente μ con la siguiente ecuación (34).

$$\mu = \frac{R3-R2}{R2-R1} \quad (34)$$

14. Con el coeficiente μ conocido, obtener el valor de PPt/EC, simbolizado con la letra “k” de la tabla 8. PPt es la distancia al electrodo de potencial a la cual la resistencia real sería medida.
15. Luego el valor de k encontrado en el paso anterior se multiplica por la distancia del electrodo de corriente EC y así se obtiene PPt
16. Ahora se realiza la medición de resistencia colocando el electrodo de potencial a una distancia PPt obtenida en el paso anterior y esa es la resistencia del sistema de puesta a tierra más precisa.

Precauciones al tomar mediciones de resistencia por este método

- Las distancias entre los electrodos auxiliares y la malla de tierra deben cumplir con las mencionadas anteriormente.
- El puente entre las terminales de corriente y potencial 1 debe ser lo más corto posible, de no cumplir lo anterior se presentará una lectura de resistencia de puesta a tierra muy elevada e incorrecta.
- Si el neutro no se desconecta de la malla de tierra en estudio, el valor obtenido de la resistencia de puesta a tierra será erróneo debido a las corrientes de neutro que circulan por ella.

- Si el valor de μ obtenido no se encuentra en la tabla, entonces se debe colocar más lejos el electrodo de corriente del electrodo o sistema en estudio.
- Cuando existe demasiado ruido en la medición los equipos muestran un error, para corregirlo se debe cambiar la frecuencia a la cual se está realizando dicha medición. Consultar con el manual del fabricante las frecuencias de prueba con las que cuenta el equipo.

VALORES DE k EN FUNCION DE u PARA EL METODO DE LA PENDIENTE									
u	k	u	k	u	k	u	k	u	k
0.01	0.6932	0.3900	0.6446	0.7700	0.5856	1.1500	0.5071	1.5300	0.3740
0.02	0.6921	0.4000	0.6432	0.7800	0.5838	1.1600	0.5046	1.5400	0.3688
0.03	0.6909	0.4100	0.6418	0.7900	0.5821	1.1700	0.5020	1.5500	0.3635
0.04	0.6898	0.4200	0.6404	0.8000	0.5803	1.1800	0.4994	1.5600	0.3580
0.05	0.6886	0.4300	0.6390	0.8100	0.5785	1.1900	0.4968	1.5700	0.3523
0.06	0.6874	0.4400	0.6375	0.8200	0.5767	1.2000	0.4941	1.5800	0.3465
0.07	0.6862	0.4500	0.6361	0.8300	0.5749	1.2100	0.4914	1.5900	0.3404
0.08	0.6850	0.4600	0.6346	0.8400	0.5731	1.2200	0.4887	1.6000	0.3342
0.09	0.6838	0.4700	0.6331	0.8500	0.5712	1.2300	0.4859	1.6100	0.3278
0.10	0.6826	0.4800	0.6317	0.8600	0.5693	1.2400	0.4831	1.6200	0.3211
0.11	0.6814	0.4900	0.6302	0.8700	0.5675	1.2500	0.4802	1.6300	0.3143
0.12	0.6801	0.5000	0.6287	0.8800	0.5656	1.2600	0.4773	1.6400	0.3071
0.13	0.6789	0.5100	0.6272	0.8900	0.5637	1.2700	0.4743	1.6500	0.2997
0.14	0.6777	0.5200	0.6258	0.9000	0.5618	1.2800	0.4713	1.6600	0.2920
0.15	0.6764	0.5300	0.6243	0.9100	0.5598	1.2900	0.4683	1.6700	0.2840
0.16	0.6752	0.5400	0.6228	0.9200	0.5579	1.3000	0.4652	1.6800	0.2758
0.17	0.6739	0.5500	0.6212	0.9300	0.5559	1.3100	0.4620	1.6900	0.2669
0.18	0.6727	0.5600	0.6197	0.9400	0.5539	1.3200	0.4588	1.7000	0.2578
0.19	0.6714	0.5700	0.6182	0.9500	0.5519	1.3300	0.4556	1.7100	0.2483
0.20	0.6701	0.5800	0.6167	0.9600	0.5499	1.3400	0.4522	1.7200	0.2383
0.21	0.6688	0.5900	0.6151	0.9700	0.5479	1.3500	0.4489	1.7300	0.2278
0.22	0.6675	0.6000	0.6136	0.9800	0.5458	1.3600	0.4454	1.7400	0.2167
0.23	0.6662	0.6100	0.6120	0.9900	0.5437	1.3700	0.4419	1.7500	0.2051
0.24	0.6649	0.6200	0.6104	1.0000	0.5416	1.3800	0.4383	1.7600	0.1928
0.25	0.6636	0.6300	0.6088	1.0100	0.5395	1.3900	0.4346	1.7700	0.1797
0.26	0.6623	0.6400	0.6072	1.0200	0.5373	1.4000	0.4309	1.7800	0.1658
0.27	0.6610	0.6500	0.6056	1.0300	0.5352	1.4100	0.4271	1.7900	0.1511
0.28	0.6597	0.6600	0.6040	1.0400	0.5330	1.4200	0.4232	1.8000	0.1352
0.29	0.6583	0.6700	0.6024	1.0500	0.5307	1.4300	0.4192	1.8100	0.1183
0.30	0.6570	0.6800	0.6008	1.0600	0.5285	1.4400	0.4152	1.8200	0.1000
0.31	0.6556	0.6900	0.5991	1.0700	0.5262	1.4500	0.4111	1.8300	0.0803
0.32	0.6543	0.7000	0.5975	1.0800	0.5239	1.4600	0.4068	1.8400	0.0588
0.33	0.6529	0.7100	0.5958	1.0900	0.5216	1.4700	0.4025	1.8500	0.0353
0.34	0.6516	0.7200	0.5941	1.1000	0.5193	1.4800	0.3980		
0.35	0.6502	0.7300	0.5924	1.1100	0.5169	1.4900	0.3935		
0.36	0.6488	0.7400	0.5907	1.1200	0.5144	1.5000	0.3888		
0.37	0.6474	0.7500	0.5890	1.1300	0.5121	1.5100	0.3840		
0.38	0.6460	0.7600	0.5873	1.1400	0.5096	1.5200	0.3791		

Tabla 8: Coeficientes del método de la pendiente

3.3.2.7 Método de medición de sistemas de puesta a tierra en servicio

Existe un procedimiento para corregir el valor medido de subestaciones en servicio y eliminar el efecto de los cables de guarda y de neutro, siendo este valor una estimación del valor real.

El procedimiento a realizar es el siguiente:

1. Calcular o medir el valor de S_f . (Consultar IEEE-80 Apéndice C)
2. Calcular el radio de la hemiesfera equivalente para el sistema de tierra bajo medición.
3. Obtener los perfiles resistencia-distancia por el método de caída de potencial.
4. Multiplicar cada uno de los valores del perfil obtenido en el punto 3 con su respectivo factor k .
5. Graficar el nuevo perfil. La parte plana del gráfico muestra el valor verdadero de resistencia.

El proceso de determinación del valor de S_f puede ser por medición experimental si se dispone del equipo necesario o puede obtenerse por modelado de la impedancia del sistema y análisis de circuitos (Ramezani & Shahrtash, 2007). Para la determinación del radio de una hemiesfera equivalente a un sistema de puesta a tierra existe un procedimiento que implica relacionar las ecuaciones para la resistencia de una hemiesfera y la del sistema que se desea convertir (Tagg, 1964), además de un proceso de corrección con un objetivo similar al del método de la pendiente (Corrección por error en la medición de la distancia D y la distancia de la posición del electrodo de potencial).

3.3.2.8 Método alternativo para la medición de grandes sistemas de puesta a tierra

1. Estudiar la malla de tierra mediante los planos, identificando sus longitudes y los puntos de prueba.
2. Desconectar el neutro del sistema o de la malla de tierra.
3. Determinar el lado geométrico de la malla de puesta a tierra en estudio con la siguiente ecuación $L_{geo} = \sqrt{\text{Área de la malla}} [m]$
4. Seleccionar el punto de conexión en la malla
5. Conectar el punto de prueba al telurómetro en la terminal 1 de corriente que debe estar unida mediante un puente hacia la terminal 1 de potencial. El punto de prueba debe ser tomado de los pozos de tierra dedicados para este fin, de no existir se deben tomar un cable que esté conectado a la malla de tierra por ejemplo el cable de puesta a tierra de la carcasa de un equipo en una subestación

6. Colocar el electrodo de corriente en la terminal de corriente 2 del telurómetro a 2 veces el lado geométrico obtenido en el paso 3, esta longitud se identifica como L
7. Conocida la distancia desde el sistema en estudio hasta el electrodo de corriente L , realizar 9 mediciones variando la ubicación del electrodo de potencial de la siguiente manera:
 - a. $L/10[m]$
 - b. $2L/10[m]$
 - c. $3L/10[m]$
 - d. $4L/10[m]$ y así sucesivamente hasta llegar a $9L/10[m]$

El electrodo de potencial debe estar conectado a la terminal de potencial 2 del telurómetro.

8. Tomar la lectura de resistencia para cada una de las mediciones del paso 7 y anotar los resultados en el formato RAreaG
9. Graficar la curva *resistencia vs distancia entre el sistema en estudio y electrodo de potencial*
10. Cambiar el electrodo de corriente a una ubicación del 80% de la ubicación original, es decir a $0.8L$
11. Repetir los pasos 7, 8 y 9
12. Cambiar el electrodo de corriente a una ubicación del 60% de la ubicación original, es decir a $0.6L$
13. Repetir los pasos 7, 8 y 9
14. Desconectar el equipo y los accesorios
15. Apagar el equipo
16. Unir en una sola gráfica las curvas obtenidas de las mediciones a diferentes ubicaciones del electrodo de corriente
17. La resistencia del sistema de puesta a tierra en estudio será el punto de intersección de las tres curvas anteriores.

Precauciones al tomar mediciones de resistencia

- Las distancias entre los electrodos auxiliares y la malla de tierra deben cumplir con las mencionadas anteriormente.
- El puente entre las terminales de corriente y potencial 1 debe ser lo más corto posible, de no cumplir lo anterior se presentará una lectura de resistencia de puesta a tierra muy elevada e incorrecta.
- Si el neutro no se desconecta de la malla de tierra en estudio, el valor obtenido de la resistencia de puesta a tierra será erróneo debido a las corrientes de neutro que circulan por ella.
- Si el equipo no muestra alguna medición o en algunos casos muestra errores de lectura debido a la resequedad del terreno, remojar el contacto entre el electrodo en estudio y los electrodos auxiliares con la tierra utilizando agua salada.
- Cuando existe demasiado ruido en la medición los equipos muestran un error, para corregirlo se debe cambiar la frecuencia a la cual se está realizando dicha medición. Consultar con el manual del fabricante las frecuencias de prueba con las que cuenta el equipo.

3.3.3 POTENCIALES SUPERFICIALES

3.3.3.1 Método con telurómetro convencional

La técnica seleccionada para llevar a cabo esta medición es utilizando un telurómetro convencional debido a la practicidad y poca logística para llevarlo a cabo. Se debe tomar en cuenta que, si la subestación no puede ser desenergizada, algunos fabricantes prohíben el uso del equipo mientras que otros indican que la medición puede realizarse, pero existe la posibilidad de daño del equipo en caso de una falla debido a que el equipo no está diseñado para soportar una tensión de toque o de paso. Por lo que además de la seguridad de cada una de las personas encargadas de llevar a cabo la medición debe procurarse la seguridad del equipo. A continuación, se describen los pasos para llevar a cabo la medición en una subestación energizada o desenergizada y llenar el formato PotSuper del Anexo A. El equipo requerido para llevar a cabo la medición se indica en los apartados 2.7.4.3 (Medición con un telurómetro convencional) y 2.6.1.4 (Método de ClampOn).

1. Preparar previamente el plano de la subestación identificando las estructuras metálicas aterrizadas y los puntos de conexión con el conductor de tierra. Identificar con un número los puntos en los que se tomarán mediciones de potenciales de toque, al menos uno para cada estructura. Para seleccionar los puntos donde se medirá el potencial de paso, los puntos más importantes serán dentro de cada malla de tierra. En caso que no se tenga disponibilidad del plano, se llevará a cabo el paso 3.
2. Preparar y utilizar todo el equipo de protección personal necesario para realizar trabajos dentro de la subestación; tales como casco, guantes y calzado dieléctrico. Además, utilizar radios para comunicación entre el operador del equipo y las personas encargadas de mover y colocar las puntas de medición.
3. Obtener un esquema con la ubicación de todas las estructuras metálicas instaladas en la subestación e identificarlos con una letra y los puntos de medición con un número. Ubicar los puntos de conexión a tierra de cada estructura. Ubicar los puntos de medición utilizando los criterios del paso 1. Tomar nota de todas las conexiones dentro de la subestación, sean circuitos de transmisión, subtransmisión o distribución, calibres de conductores y conductores por fase.
4. Con un medidor de red de tierra tipo clamp. Conectar como se muestra en la figura 28 en cada uno de los conductores de puesta a tierra para todas las estructuras. Tomar nota de los valores medidos. En caso de no disponer de un medidor de este tipo, se puede utilizar un telurómetro considerando las medidas de seguridad del paso 5.

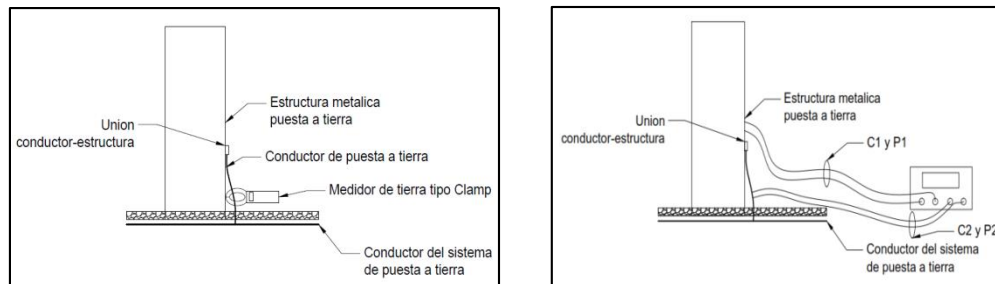


Figura 28: Esquema de conexión para medición de resistencia de la unión de puesta a tierra (Con clamp y telurómetro)

5. Utilice un juego de fusibles para el telurómetro e interruptores para desconectar los cables de medición del medidor. El propósito de los fusibles es proteger el equipo si

llegara a ocurrir una falla y se vea sometido a potenciales de toque. En el caso de los interruptores, estos son para minimizar el tiempo que el equipo esté conectado a la red de puesta a tierra. Los interruptores se cerrarán únicamente para llevar a cabo la medición y se abrirán inmediatamente después.

6. Conectar las puntas de medición del equipo como se muestra en la figura 29, ubicando uno de los terminales de corriente en un electrodo de prueba enterrado a una distancia de 5 veces la dimensión más grande de la cuadrícula de puesta a tierra, el otro terminal de corriente y uno de voltaje en la estructura aterrizada escogida para llevar a cabo las mediciones y el terminal restante de potencial en la superficie de la subestación a una distancia de un metro de la estructura para obtener la impedancia vista entre esos puntos de contacto, la cual multiplicada por la corriente de falla resulta en el potencial de toque.

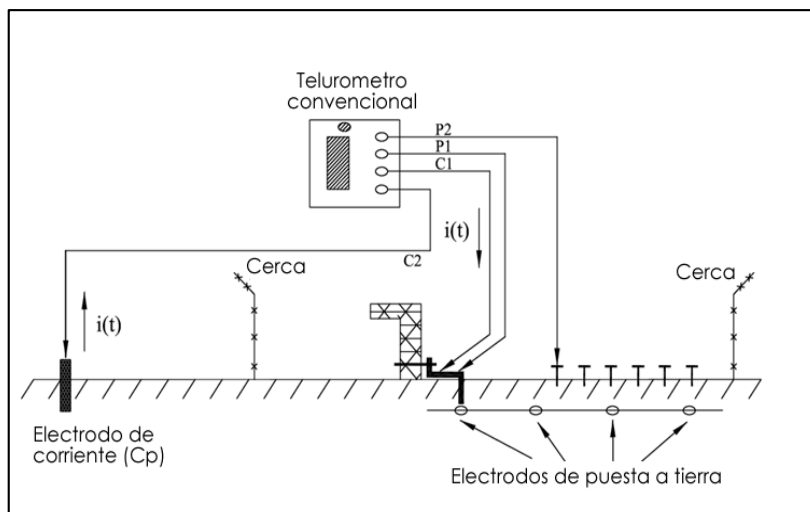


Figura 29: Esquema de conexión para medición de potenciales de toque y paso

7. Tomar diferentes mediciones respecto a una misma estructura para poder obtener potenciales de paso. Para esto no es necesario mantener la distancia de un metro respecto a la estructura, pero si entre puntos en la superficie.
8. Identificar los puntos dentro de la subestación que superen el valor máximo tolerable (IEEE 80) con el propósito de implementar medidas de seguridad como mallas metálicas.
- 9.

3.3.3.2 Cálculo del GPR

A partir de los resultados obtenidos de la medición previa del valor de la resistencia de puesta a tierra. Se obtiene los valores de corriente de cortocircuitos para la subestación bajo estudio. En el caso que ésta tenga buses a diferentes niveles de voltaje, se considera la corriente del bus que tenga la mayor corriente de cortocircuito independientemente el tipo de falla; una fase a tierra o tres fases a tierra.

Ejemplo. Si se tiene una resistencia de puesta a tierra de 0.5Ω , y los datos de cortocircuito de la tabla 9.

Nivel de Tensión	Icckt 1 fase a tierra	Icckt 3 fases a tierra
115kV	5kA	8kA
46kV	15kA	20kA

Tabla 9: Ejemplo de valores de corriente de cortocircuito en una subestación

Entonces el GPR máximo será:

$$GPR = (0.5\Omega)(20000A) = 10000V$$

Es importante tomar en cuenta que la corriente de cortocircuito debe considerar el factor de separación de la corriente de falla S_f (IEEE80,2013).

3.4 SOLUCIONES PRÁCTICAS A ERRORES COMUNES

- **La lectura no se estabiliza:** podría ser causado por un ruido excesivo, probablemente por la interferencia de otras redes, problemas en el sistema, etc. La primera recomendación es cambiar la frecuencia de prueba para filtrar estas señales. También cambiar la orientación de los electrodos, hacer la medición en otro lugar o intentar hacer la medición en otro día donde se estime hay menos cargas en las líneas.
- **Valor fuera del rango esperado o fuera del intervalo del equipo (Desbordamiento de datos):** puede ser por una excesiva resistencia de los electrodos auxiliares o un falso contacto entre el caimán de conexión y electrodo auxiliar. Se puede humedecer solamente el área del electrodo para que penetre la corriente; también se puede subir el valor de la corriente o voltaje de prueba según el equipo lo permita. Asegurarse que los

contactos entre caimanes y electrodos sean firmes. Asegurarse que la batería tenga un porcentaje de carga suficiente según recomendaciones de cada fabricante.

- **Se obtiene un valor demasiado alto de resistencia:** puede ser ocasionado por un cable roto, demasiado largo, falso contacto entre el electrodo de prueba y los cables de prueba. Limpiar todas estas superficies y verificar la continuidad de los cables. Evitar hacer empalmes o hacerlos lo mejor posible. Evitando no excederse con un número indefinido de estos.

CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE CASOS

4.1 EQUIPO DE MEDICIÓN

Las mediciones deben ser realizadas con equipos que cumplan ciertos requisitos los cuales fueron mencionados en el apartado 3.2.

En la tabla 10 se presenta un listado con los equipos y accesorios a utilizar

Equipo	Marca	Modelo	Fecha de calibración	Lugar de calibración	Descripción de medición
Telurómetro	AEMC Instruments	6471	-	AEMC Lab	Resistividad de suelo, resistencia de puesta a tierra y potenciales superficiales
Telurómetro	MEGGER	DET2/2	Nov. 2014	Laboratorio de Metrología en DC y Baja Frecuencia de ETESAL	Resistencia de puesta a tierra
Telurómetro	FLUKE	GEO 1625	20-02-2014	FLUKE Calibration	Resistencia de puesta a tierra en subestaciones y en torres de transmisión
Transformador de núcleo partido	FLUKE	EI162BN	-	-	Accesorio de FLUKE GEO 1625 para medición de resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión
Clamp	MEGGER	DET24C	22-08-2013	Calibration Laboratory Megger	Resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión

Tabla 10: Equipos y accesorios a utilizar

4.2 SITIOS DE MEDICIONES

Sitio	Fecha	Mediciones a realizar	Condiciones de terreno
Candelaria de la Frontera, Chalchuapa, Santa Ana	21-05-2015	Resistividad de suelo	Húmedo
Predio baldío, Facultad de Ingeniería y Arquitectura- Universidad de El Salvador	28-05-2015	Resistividad de suelo	Seco
Centro Comercial Santa Rosa (en construcción), Santa Tecla, La Libertad	14-07-2015	Resistividad de suelo	Seco
Ciudad Corinto, Mejicanos, S.S	17-08-2015	Resistividad de suelo	Seco
Subestación 1	04-09-2015 18-09-2015	Resistividad de suelo, resistencia de puesta a tierra en subestación de transmisión y torres de transmisión y potenciales superficiales	04-09-2015 Húmedo 18-09-2015 Húmedo
Subestación 2(en construcción)	07-09-2015	Resistividad de suelo, resistencia de puesta a tierra y potenciales superficiales	Seco
Subestación 3	16-09-2015 09-10-2015	Resistividad de suelo, resistencia de puesta a tierra en subestación de transmisión y torres de transmisión	16-09-2015 Húmedo 09-10-2015 Seco
Cerro La Cuchilla, Metapán, Santa Ana	08-10-2015	Resistividad de suelo	Seco
Cantón Malpaso, Metapán, Santa Ana	14-10-2015	Resistividad de suelo	Seco

Tabla 11: Descripción y mediciones llevadas a cabo por sitio

4.3 MEDICIONES DE RESISTIVIDAD DE SUELO

4.3.1 METODOLOGÍA

Para la medición de resistividad de suelo se aplica el método de cuatro puntos arreglo *Wenner* disponiendo los electrodos como se muestra en la figura 10. En casos específicos se aplica la *tomografía eléctrica resistiva* descrita en el apartado 2.5.3.3

4.3.2 PASOS PARA REALIZAR MEDICIONES

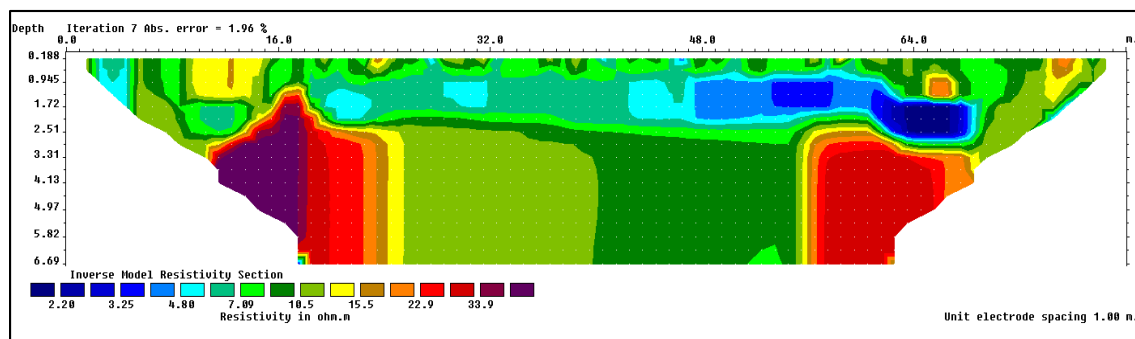
Los pasos a seguir para la toma de mediciones de resistividad de suelo se describen en el apartado 3.3.1

4.3.3 RESULTADOS DE MEDICIONES

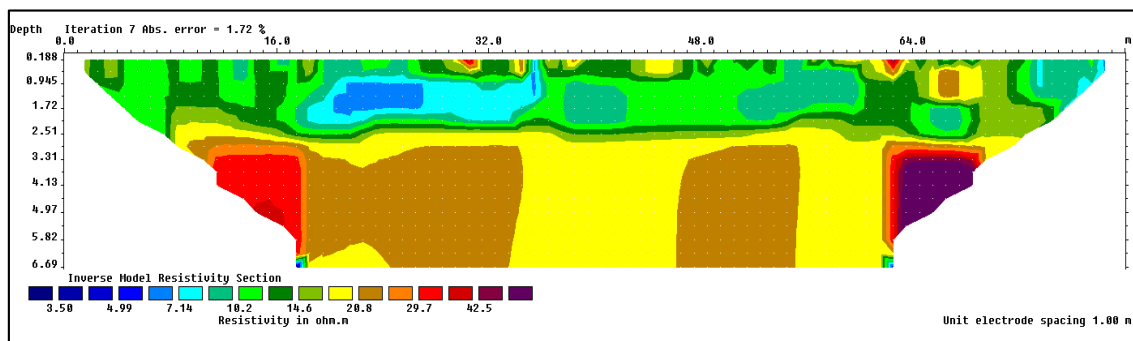
Los datos obtenidos de las mediciones se presentan según fecha con el respectivo método de medición utilizado y a continuación el modelado de terreno de cada sitio.

- Candelaria de la frontera, Santa Ana. 21 de mayo de 2015

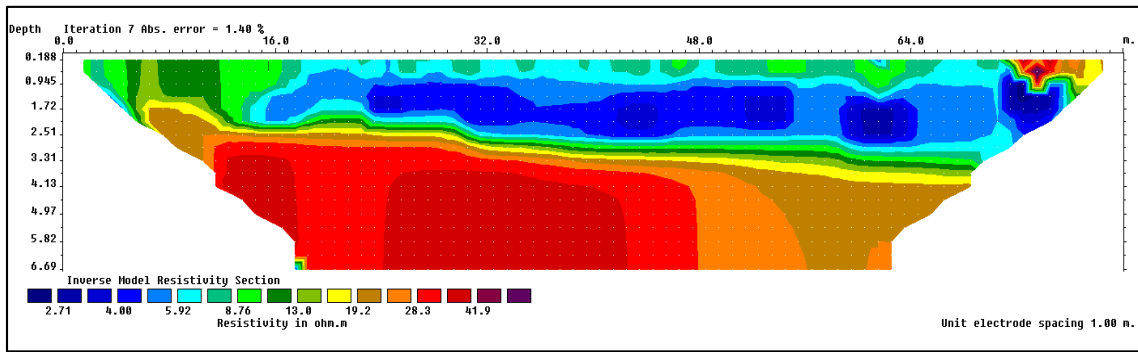
Método utilizado: Tomografía Eléctrica Resistiva



a) Línea hacia el norte



b) Línea 120°



c) Línea 240°

Figura 30: Tomografías resultantes Candelaria de la Frontera

- Predio baldío, FIA-UES. 28 de mayo de 2015

Método utilizado: Cuatro puntos

Arreglo: Wenner y Schlumberger

WENNER		SCHLUMBERGER	
Espaciamiento [m]	ρ_a [Ω/m]	a=0.5m	a=1m
		ρ_a [Ω/m]	ρ_a [Ω/m]
1	102.8	-	-
2	95.49	95.22	99.97
3	93.05	87.98	91.88
4	95.24	91.42	95.35
5	97.91	101.17	100.86
6	98.98	104.45	108.61
7	100.48	109.12	113.07
8	99.42	112.75	117.93
9	98.07	116.27	121.62
10	-	119.6	124.84

Tabla 12: Puntos de resistividad aparente obtenidos en predio baldío UES

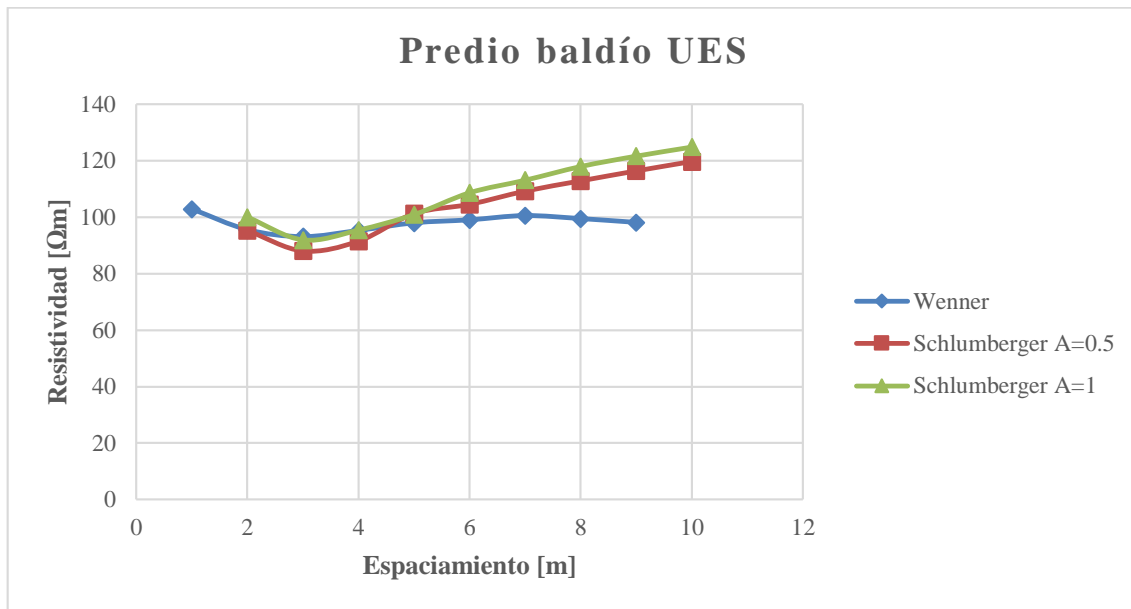


Figura 31: Comparación de perfiles de resistividad del predio baldío UES con diferentes arreglos de electrodos

- Centro Comercial Santa Rosa (en construcción), Santa Tecla. 14 de julio de 2015

Método utilizado: Cuatro puntos

Arreglo: Wenner y Schlumberger

Espaciamiento [m]	WENNER		SCHLUMBERGER
	PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 1 (A=0.5m)
	ρ_a [Ω/m]	ρ_a [Ω/m]	ρ_a [Ω/m]
1.0	66.23	116.01	56.96
1.5	76.06	131.2	64.31
2.0	89.61	142.93	72.89
2.5	101.55	153.28	89.1
3.0	113.93	163.18	92.13
3.5	126.57	174.14	100.18
4.0	137.82	181.93	109.73
4.5	149.16	193.59	118.49
5.0	159.63	204.28	127.49
5.5	169.52	-	136.7
6.0	179.23	-	145.26

Tabla 13: Puntos de resistividad aparente obtenidos terreno de construcción Cenro Comercial Santa Rosa

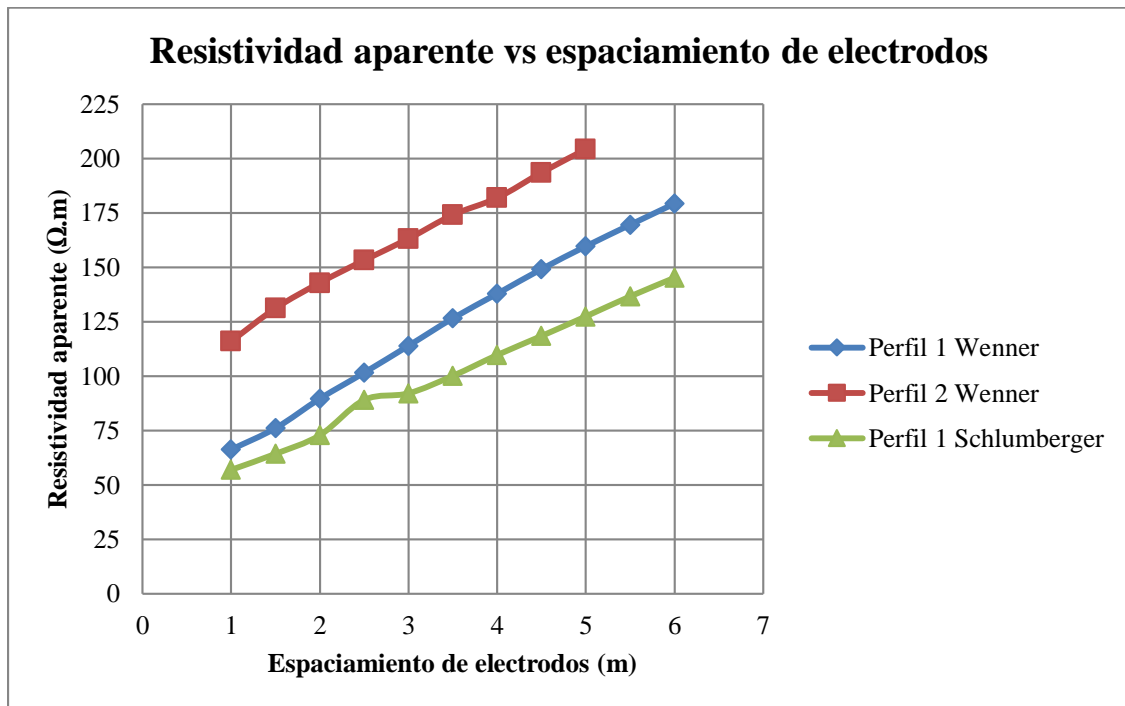


Figura 32: Comparación de perfiles de resistividad del terreno de construcción Centro Comercial Santa Rosa con diferentes arreglos de electrodos

- Ciudad Corinto Mejicanos. 17 de agosto de 2015

Método utilizado: Cuatro puntos

Arreglo: Wenner

Espaciamento [m]	Cancha de Basketball	Predio
	ρ_a [Ω/m]	ρ_a [Ω/m]
1	57.54	46.29
2	55.95	57.95
3	56.61	64.73
4	57.97	51.77
5	64.63	43.45
6	66.03	42.1
7	-	43.42
8	-	43.23
9	-	43.76
10	-	47.1

Tabla 14: Puntos de resistividad aparente obtenidos en Ciudad Corinto, Mejicanos por el arreglo Wenner

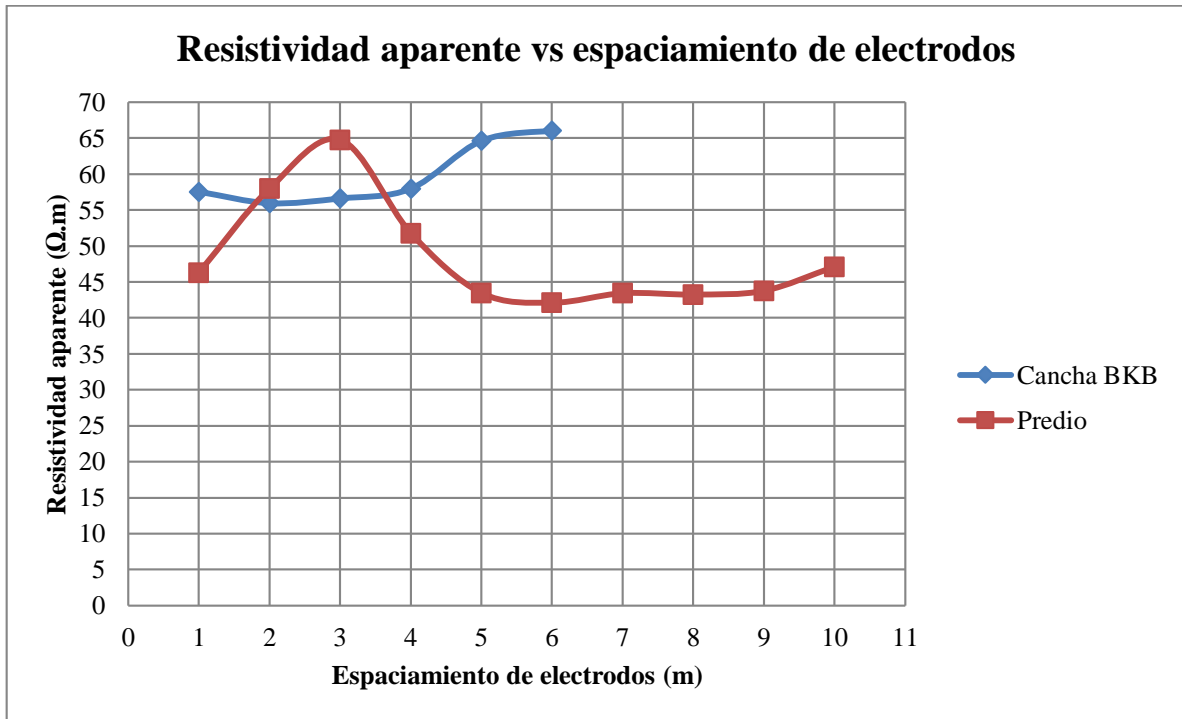


Figura 33: Perfiles de resistividad aparente en dos sitios diferentes en Ciudad Corinto, Mejicanos

- Subestación 1. 4 de Septiembre de 2015

Método utilizado: Cuatro puntos

Arreglo: Wenner

Espaciamiento [m]	PERFIL 1	PERFIL 2
	ρ_a [$\Omega.m$]	ρ_a [$\Omega.m$]
1	44.6	35.3
2	53.6	37.3
3	60.8	38.9
4	66.5	42.4
5	71.8	46.1
6	76.0	50.8
7	76.8	56.3
8	76.7	61.5
9	75.3	65.5
10	75.1	68.4

Tabla 15: Puntos de resistividad aparente obtenidos en terreno cercano a subestación 1 por el arreglo Wenner

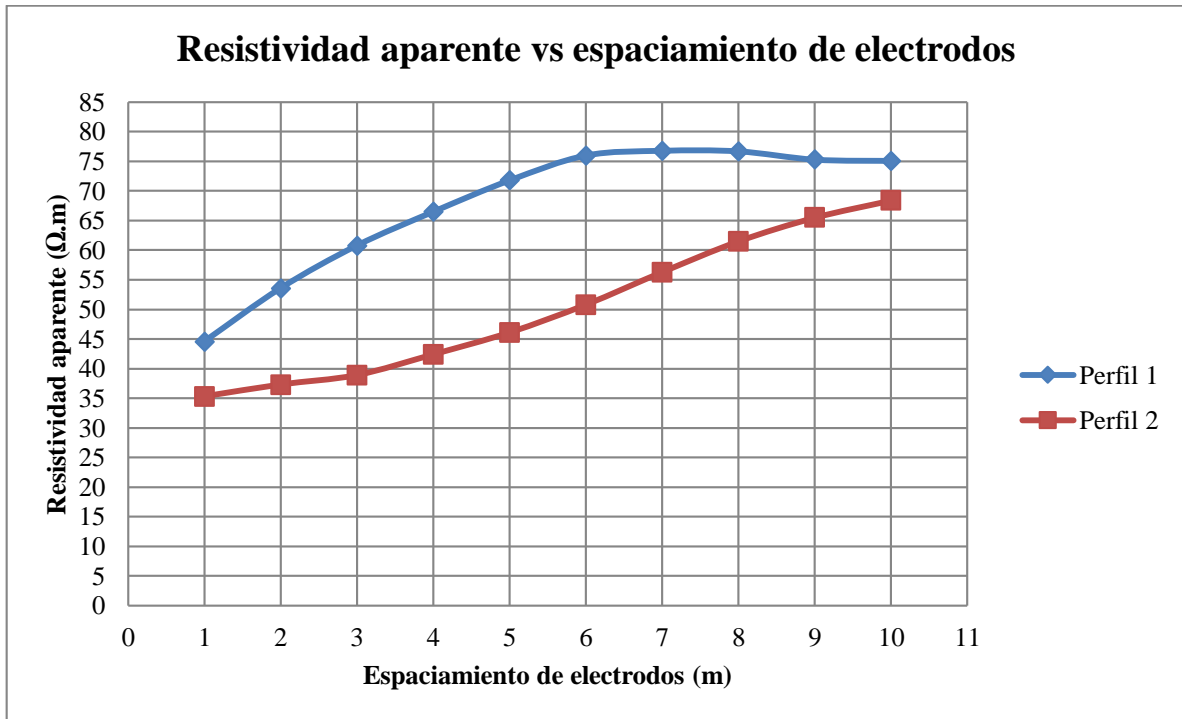


Figura 34: Perfiles de resistividad aparente en terreno de Subestación 1

- Subestación 2 (en construcción). 7 de septiembre 2015

Método utilizado: Cuatro puntos

Arreglo: Wenner

Espaciamento [m]	ρ_a [Ω/m]
1	22.0
3	23.2
5	24.9
7	25.7
9	23.4

Tabla 16: Puntos de resistividad aparente obtenidos en terreno cercano a subestación 2

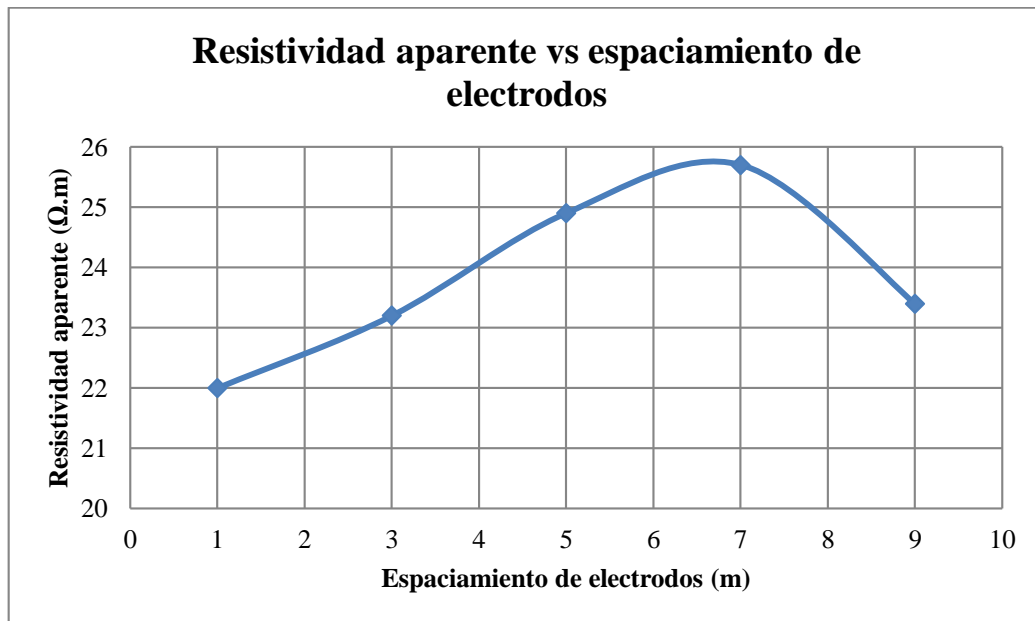


Figura 35: Perfil de resistividad aparente en terreno cercano a subestación 2

- Subestación 3. 16 de septiembre 2015

Método utilizado: Cuatro puntos

Arreglo: Wenner

Espaciamiento [m]	ρ_a [Ω/m]
1	34.3
2	20.8
3	23.6
4	21.5
5	15.5
6	10.6
7	7.37
8	5.08
9	4.27
10	3.33

Tabla 17: Puntos de resistividad aparente obtenidos en terreno cercano a subestación 3

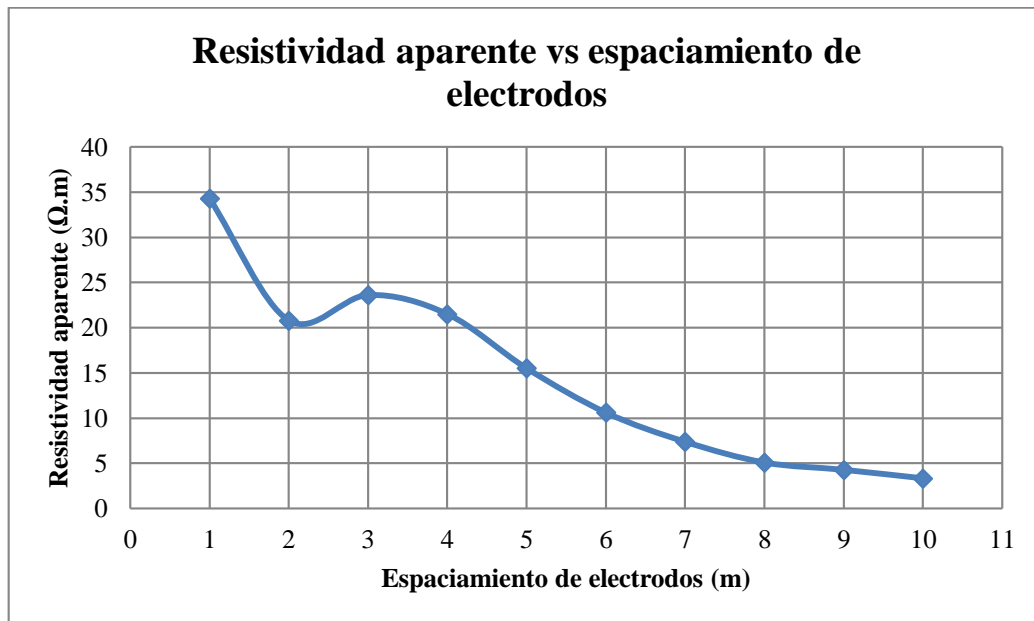


Figura 36: Perfil de resistividad en terreno cercano a subestación 3

- Cerro La Cuchilla, Metapán. 8 de octubre de 2015

Método utilizado: Tomografía Eléctrica Resistiva

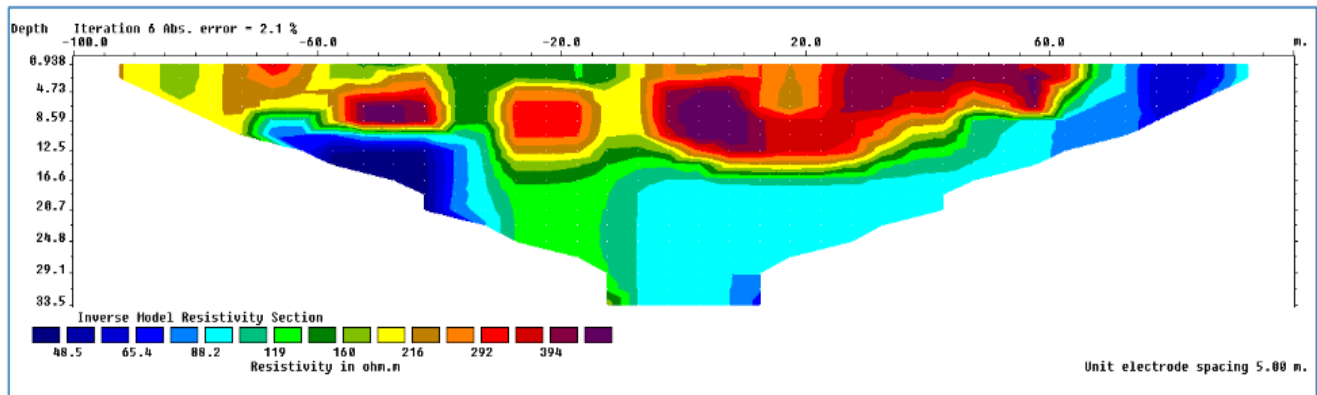


Figura 37: Tomografía eléctrica resultante en Cerro La Cuchilla, Metapán

- Cantón Malpaso, Metapán. 14 de octubre de 2015

Método utilizado: Tomografía Eléctrica Resistiva

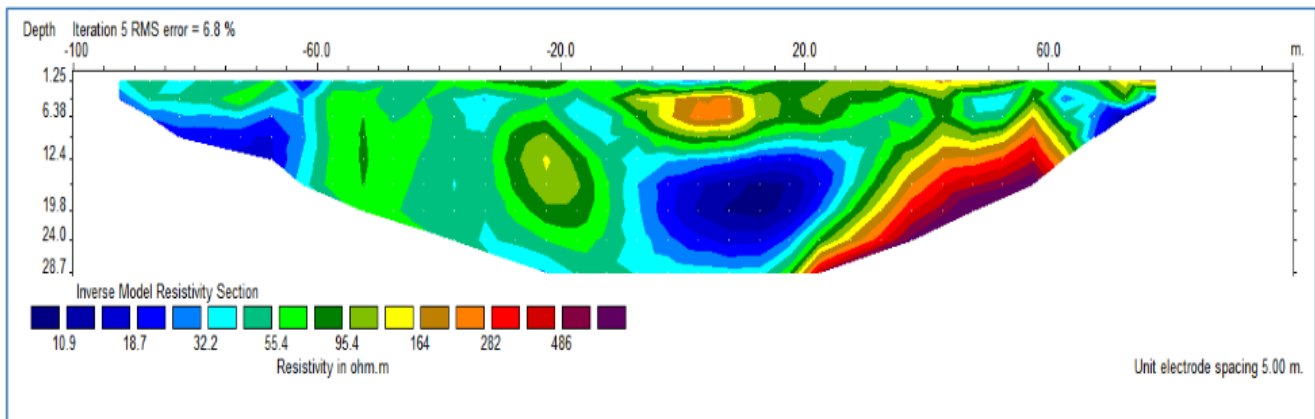


Figura 38: Tomografía eléctrica resultante en Cantón Malpaso, Metapán

4.3.4 MODELADO DE TERRENO

Las mediciones de resistividad de suelo deben ser procesadas a manera de obtener un valor preciso para diseñar una red de tierra o para comprobar en caso de que ya se cuente con él. Para modelar los terrenos de los sitios mencionados anteriormente se han utilizado los métodos del apartado 2.5.6. Cabe aclarar que se modela el terreno siempre y cuando los datos hayan sido obtenidos mediante el método de cuatro puntos arreglo Wenner.

- Predio baldío, FIA-UES

No se requiere llevar a cabo ningún tipo de modelado por inversión o directo debido a que no existen variaciones significativas; mayores al 30%; dentro de cada uno de los perfiles tomados, por lo que se aplica el procedimiento descrito en el apartado 2.5.6 para suelos homogéneos, teniendo los siguientes resultados.

➤ *Resistividad Promedio*

Arreglo Wenner	Arreglo Schlumberger (a=0.5m)	Arreglo Schlumberger (a=1m)
97.9 $\Omega \cdot m$	104.2 $\Omega \cdot m$	108.2 $\Omega \cdot m$

➤ *Promedio Resistividad Máximo y Resistividad Mínima*

Arreglo Wenner	Arreglo Schlumberger (a=0.5m)	Arreglo Schlumberger (a=1m)
97.9 $\Omega \cdot m$	103.8 $\Omega \cdot m$	108.4 $\Omega \cdot m$

➤ Método de Box Cox

WENNER			
Espaciamiento (m)	ρ_a (Ω .m)	$\text{Ln}(\rho_a)$	$(\text{Ln}(\rho_a) - \text{Ln}(\rho_a)_{\text{PROM}})^2$
1	102.8	4.63278535	0.002380777
2	95.5	4.55912625	0.000618313
3	93.1	4.53367418	0.002531897
4	95.2	4.55597994	0.000784684
5	97.9	4.58394655	2.07924E-09
6	99	4.59511985	0.000123826
7	100.5	4.61015773	0.000684638
8	99.4	4.59915211	0.000229825
9	98.1	4.58598737	3.9809E-06
Promedio de $\text{Ln}(\rho_a)$		4.583992148	
Desviación estándar S		0.009530938	
Resistividad ρ		98.40 Ω .m	

Tabla 18a: Resultados del método BOX COX con arreglo Wenner para predio baldío UES

SCHLUMBERGER a=0.5m			
Espaciamiento (m)	ρ_a (Ω .m)	$\text{Ln}(\rho_a)$	$(\text{Ln}(\rho_a) - \text{Ln}(\rho_a)_{\text{PROM}})^2$
2	95.2	4.55597994	0.00730523
3	88	4.47733681	0.026933327
4	91.4	4.51524548	0.015927727
5	101.2	4.61709876	0.000593011
6	104.5	4.64918707	5.98533E-05
7	109.1	4.69226489	0.002582095
8	112.8	4.72561634	0.007083875
9	116.3	4.75617306	0.013161248
10	119.6	4.78415284	0.020363936
Promedio de $\text{Ln}(\rho_a)$		4.641450577	
Desviación estándar S		0.034067888	
Resistividad ρ		105.56 Ω .m	

Tabla 18b: Resultados del método BOX COX con arreglo Schlumberger con a=0.5m para predio baldío UES

SCHLUMBERGER a=1m			
Espaciamiento (m)	ρ_a ($\Omega.m$)	$\text{Ln}(\rho_a)$	$(\text{Ln}(\rho_a) - \text{Ln}(\rho_a)_{\text{PROM}})^2$
2	100	4.60517019	0.005455924
3	91.9	4.52070103	0.025069461
4	95.4	4.55807858	0.014630315
5	100.9	4.61412993	0.004212593
6	108.6	4.68767141	7.45976E-05
7	113.1	4.72827238	0.002424377
8	117.9	4.76983681	0.008245074
9	121.6	4.80073697	0.014811512
10	124.8	4.82671246	0.021808803
Promedio de $\text{Ln}(\rho_a)$		4.679034416	
Desviación estándar S		0.034557638	
Resistividad ρ		109.64 $\Omega.m$	

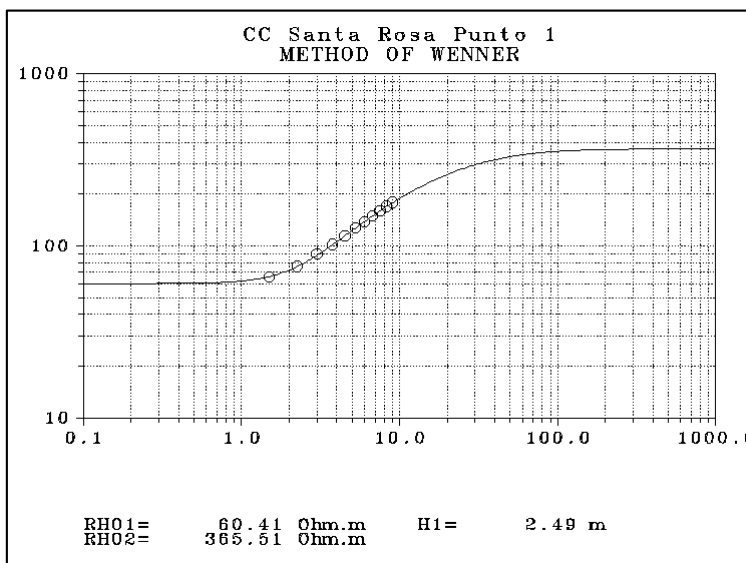
Tabla 18c: Resultados del método BOX COX con arreglo Schlumberger con a=1m para predio baldío UES

Tabla 18: Resultados de modelado de suelo por método BOX COX para predio baldío UES

- Centro Comercial Santa Rosa (en construcción), Santa Tecla

Se aplica el modelado de dos capas por diferentes métodos ya que el porcentaje de variación de la medición mínima con la máxima es de 40.1% para el arreglo Schlumberger con a=0.5m

➤ *Método computarizado utilizando software Rho32*



Resultados:

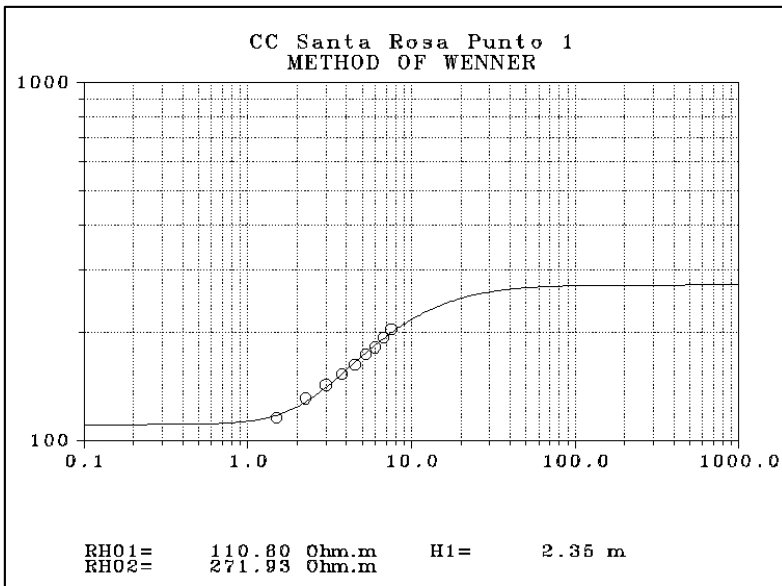
$$\rho_1 = 60.41 \Omega.m$$

$$\rho_2 = 365.51 \Omega.m$$

$$h = 2.49 m$$

$$Error = 0.64\%$$

a) Perfil 1 Centro Comercial Santa Rosa Rho32



Resultados:

$$\rho_1 = 110.80 \Omega \cdot m$$

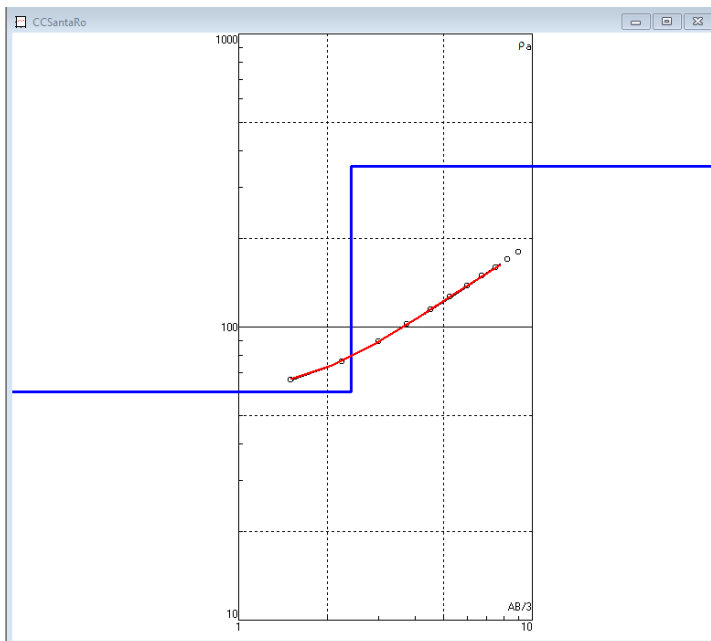
$$\rho_2 = 271.93 \Omega \cdot m$$

$$h = 2.35 \text{ m}$$

$$\text{Error} = 2.12\%$$

b) Perfil 2 Centro Comercial Santa Rosa Rho32

➤ Método computarizado utilizando software IP2Win



Resultados:

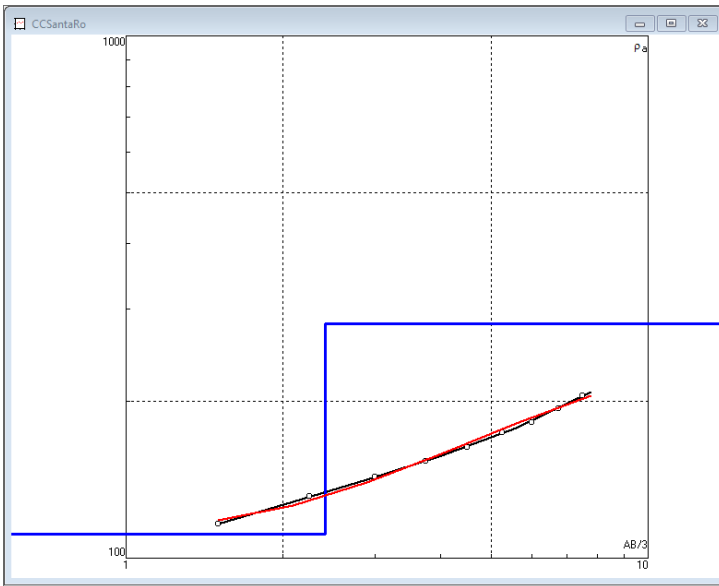
$$\rho_1 = 59.93 \Omega \cdot m$$

$$\rho_2 = 352.3 \Omega \cdot m$$

$$h = 2.42 \text{ m}$$

$$\text{Error} = 0.408\%$$

c) Perfil 1 Centro Comercial Santa Rosa IP2Win



d) Perfil 1 Centro Comercial Santa Rosa IP2Win

Resultados:

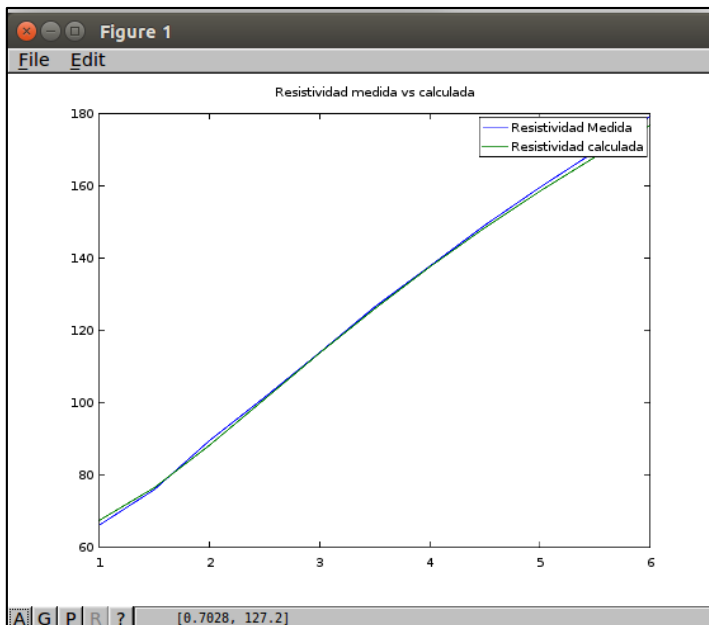
$$\rho_1 = 111.2 \Omega \cdot m$$

$$\rho_2 = 281.3 \Omega \cdot m$$

$$h = 2.41 m$$

$$Error = 1.66\%$$

➤ Método computarizado utilizando método analítico IEEE Std. 81



e) Perfil 1 Centro Comercial Santa Rosa IEEE Std 81

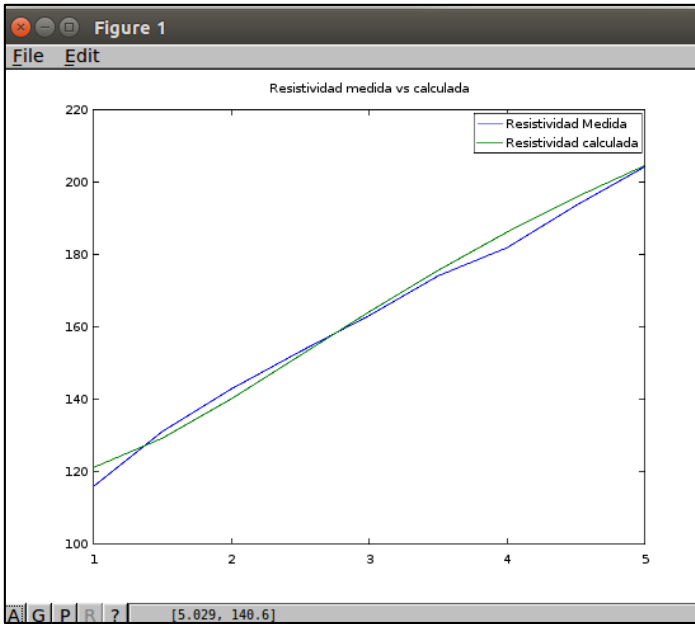
Resultados:

$$\rho_1 = 61.98 \Omega \cdot m$$

$$\rho_2 = 365.92 \Omega \cdot m$$

$$h = 1.72 m$$

$$Error = 0.96\%$$



Resultados:

$$\rho_1 = 116.46 \Omega \cdot m$$

$$\rho_2 = 315.26 \Omega \cdot m$$

$$h = 1.94 m$$

$$Error = 1.91\%$$

f) Perfil 1 Centro Comercial Santa Rosa IEEE Std 81

Figura 39: Resultados de modelado por software para terreno de construcción de Centro Comercial Santa Rosa, Santa Tecla

- Ciudad Corinto Mejicanos.

En este caso se aplica el modelo de suelo homogéneo para las mediciones tomadas en la cancha de BKB ya que el porcentaje de variación de mediciones es de 15.3%, en cambio en el predio baldío el porcentaje de variación de mediciones es de 35%

Cancha de BKB

- *Resistividad Promedio*

$$\rho_{PROM} = \frac{57.54 + 55.95 + 56.61 + 57.97 + 64.63 + 66.03}{6}$$

$$\rho_{PROM} = 59.79 \Omega \cdot m$$

- *Promedio Resistividad Máximo y Resistividad Mínima*

$$\rho_{MAXyMIN} = \frac{66.03 + 55.95}{2}$$

$$\rho_{MAXyMIN} = 60.99 \Omega \cdot m$$

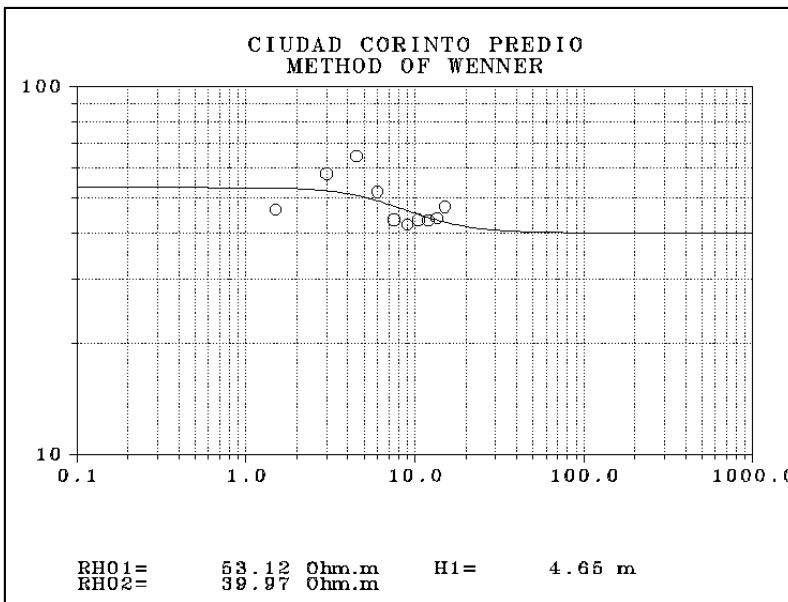
➤ *Método de Box Cox*

Espaciamiento (m)	ρ_a ($\Omega.m$)	$\text{Ln}(\rho_a)$	$(\text{Ln}(\rho_a) - \text{Ln}(\rho_a)_{\text{PROM}})^2$
1	57.54	4.052480358	0.001307495
2	55.95	4.024458435	0.00411923
3	56.61	4.036185648	0.002751423
4	57.97	4.059925635	0.000824495
5	64.63	4.168678699	0.006406248
6	66.03	4.190109184	0.010296064
Promedio de $\text{Ln}(\rho_a)$		4.08863966	
Desviación estándar S		0.020688759	
Resistividad ρ		60.31 $\Omega.m$	

Tabla 19: Resultados del método BOX COX en cancha de BKB, Ciudad Corinto

Predio Baldío

➤ *Método computarizado utilizando software Rho32*



Resultados:

$$\rho_1 = 53.12 \Omega.m$$

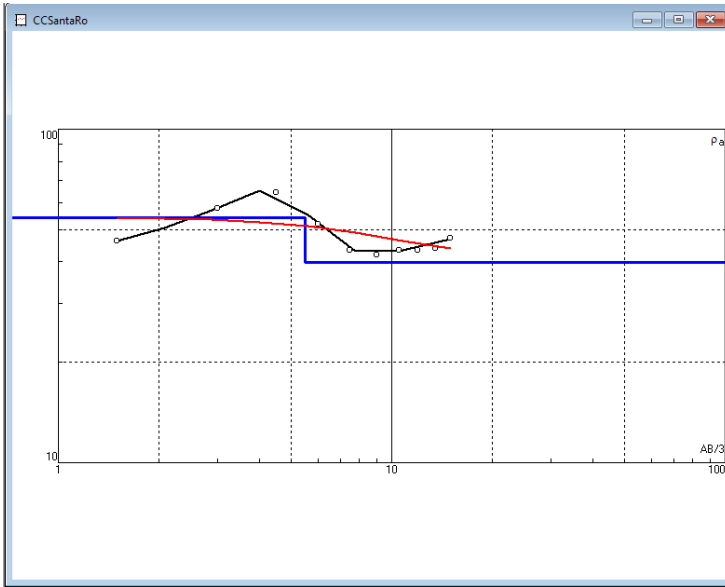
$$\rho_2 = 39.97 \Omega.m$$

$$h = 4.65 m$$

$$Error = 10.4\%$$

a) Predio baldío, Ciudad Corinto Rho32

➤ Método computarizado utilizando software IP2Win



Resultados:

$$\rho_1 = 54.2 \Omega \cdot m$$

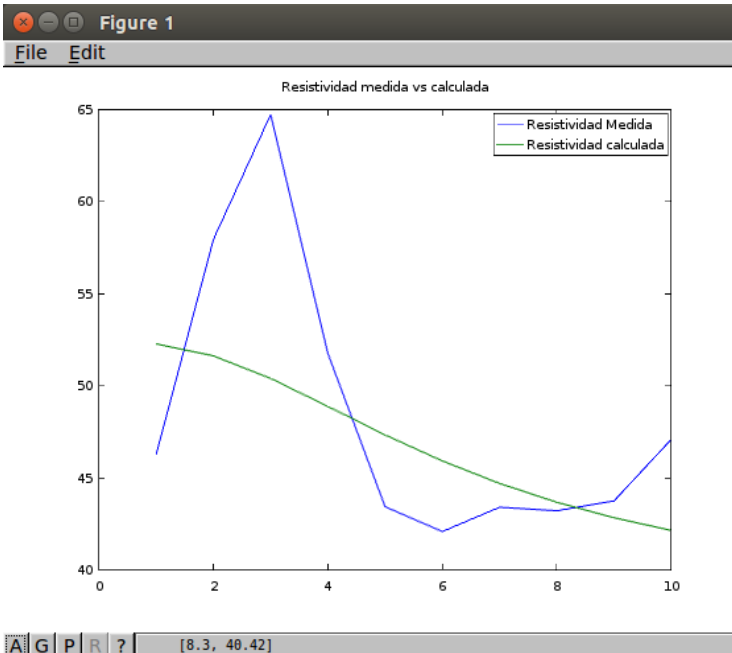
$$\rho_2 = 40 \Omega \cdot m$$

$$h = 5.51 m$$

$$Error = 11.8\%$$

b) Predio baldío, Ciudad Corinto IP2Win

➤ Método computarizado utilizando método analítico IEEE Std. 81



Resultados:

$$\rho_1 = 52.39 \Omega \cdot m$$

$$\rho_2 = 38.33 \Omega \cdot m$$

$$h = 3.64 m$$

$$Error = 11.8\%$$

c) Predio baldío, Ciudad Corinto IEEE Std 81

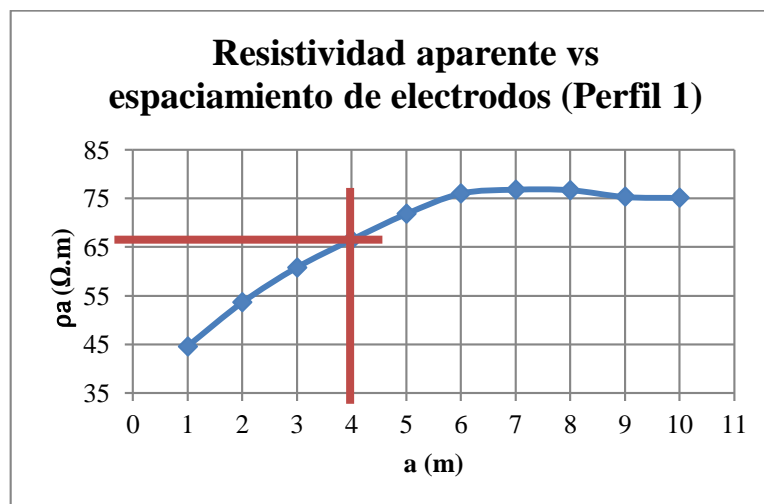
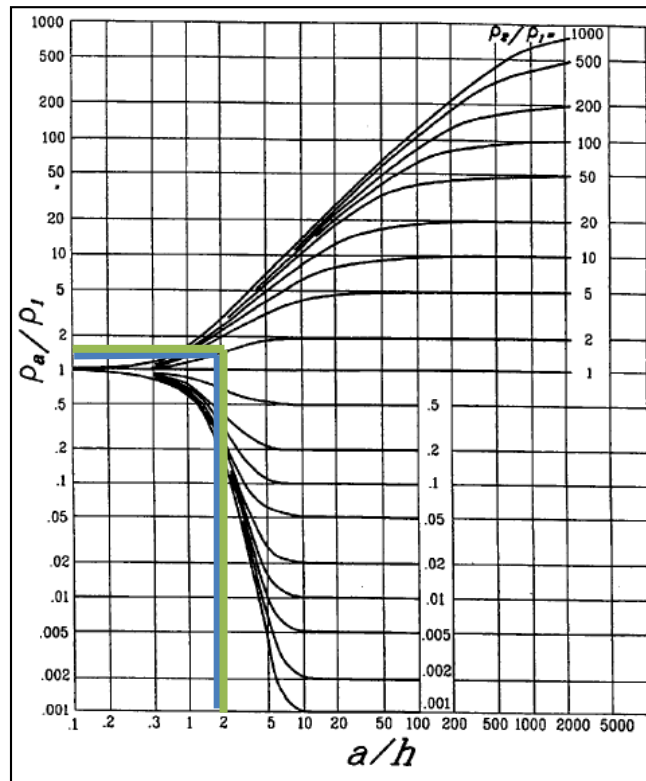
Figura 40: Resultados de modelado por software para terreno en Ciudad Corinto, Mejicanos

- Subestación 1

En este caso se aplican los métodos de dos capas ya que la variación en porcentaje de las mediciones mínima y máxima es de 41.9% y 48.4% en el perfil 1 y perfil 2 respectivamente.

➤ Método gráfico de Sunde

PERFIL 1	
Parámetro	Valor
ρ_1	44 Ω .m
ρ_2	80 Ω .m
ρ_2 / ρ_1	1.82 \approx 2
ρ_a / ρ_1	1.5
a/h	2
ρ_a	66 Ω .m
a	4 m
h	2 m
PERFIL 2	
Parámetro	Valor
ρ_1	35 Ω .m
ρ_2	70 Ω .m
ρ_2 / ρ_1	2
ρ_a / ρ_1	1.5
a/h	2
ρ_a	52.5 Ω .m
a	6.3 m
h	3.1 m



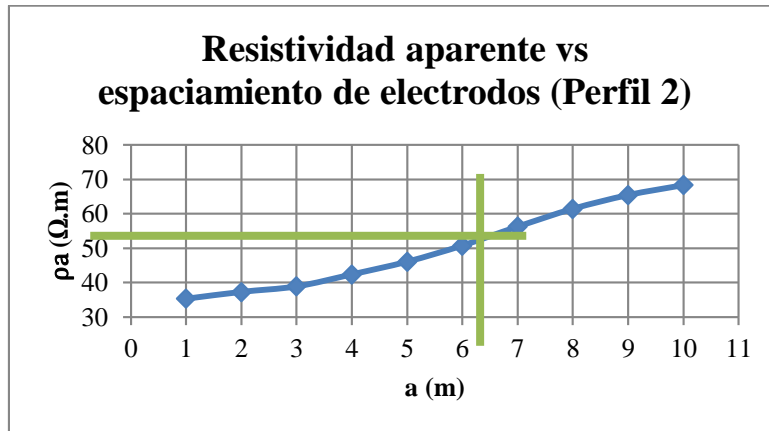
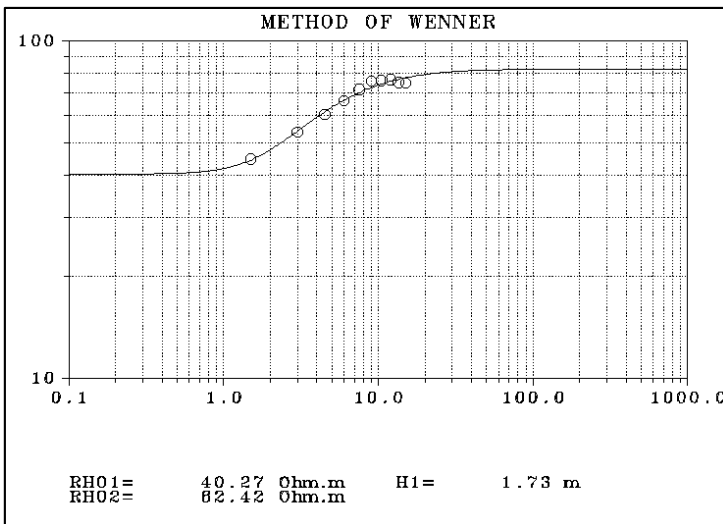


Figura 41: Resultados de modelado utilizando el método gráfico de Sunde para el terreno cercano a subestación 1

➤ *Método computarizado utilizando software Rho32*



Resultados:

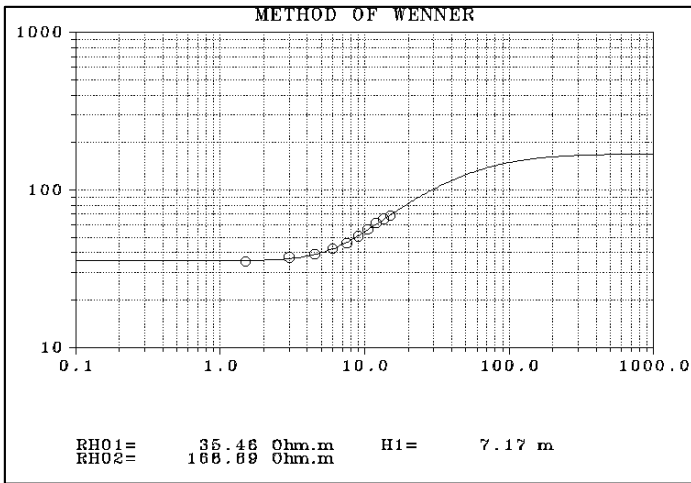
$$\rho_1 = 40.27 \Omega.m$$

$$\rho_2 = 82.42 \Omega.m$$

$$h = 1.73 m$$

$$Error = 2.26\%$$

a) Perfil 1 Cancha de fútbol, Subestación 1 Rho32



b) Perfil 2 Cancha de fútbol, subestación 1 Rho32

Resultados:

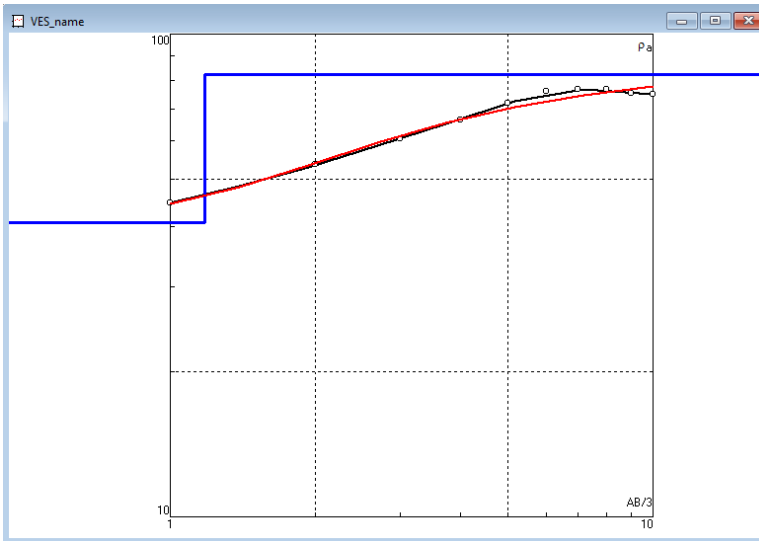
$$\rho_1 = 35.46 \Omega.m$$

$$\rho_2 = 168.69 \Omega.m$$

$$h = 7.17 m$$

$$Error = 1.04\%$$

➤ Método computarizado utilizando software IP2Win



c) Perfil 1 Cancha de fútbol, subestación 1 IP2Win

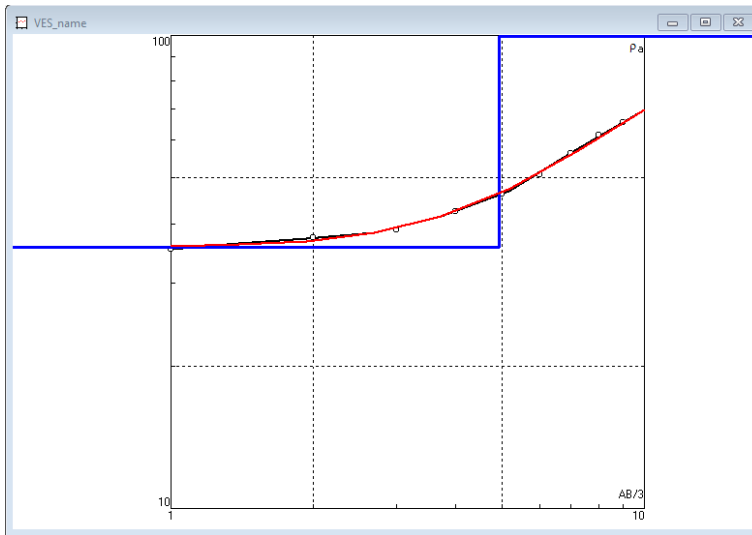
Resultados:

$$\rho_1 = 40.65 \Omega.m$$

$$\rho_2 = 82.4 \Omega.m$$

$$h = 1.18 m$$

$$Error RMS = 1.97\%$$



Resultados:

$$\rho_1 = 35.68 \Omega.m$$

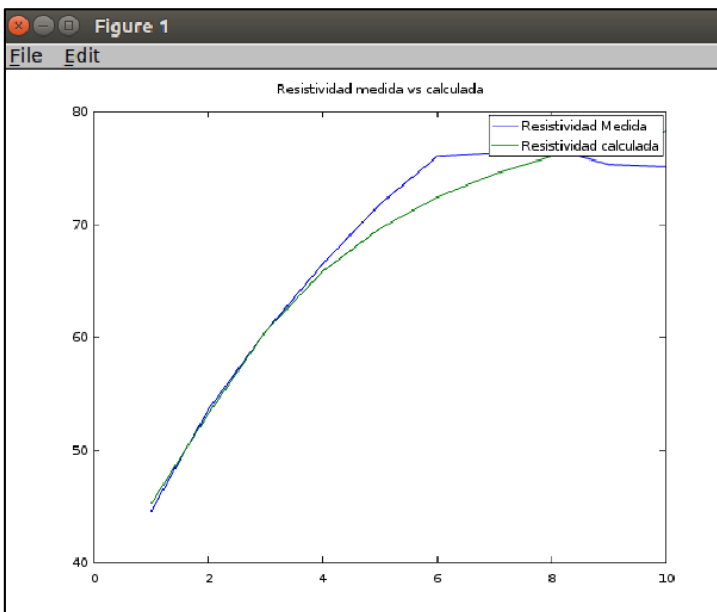
$$\rho_2 = 180.8 \Omega.m$$

$$h = 4.93 m$$

$$Error\ RMS = 0.892\%$$

d) Perfil 2 Cancha de fútbol, subestación 1 IP2Win

➤ Método computarizado utilizando método analítico IEEE Std. 81



Resultados:

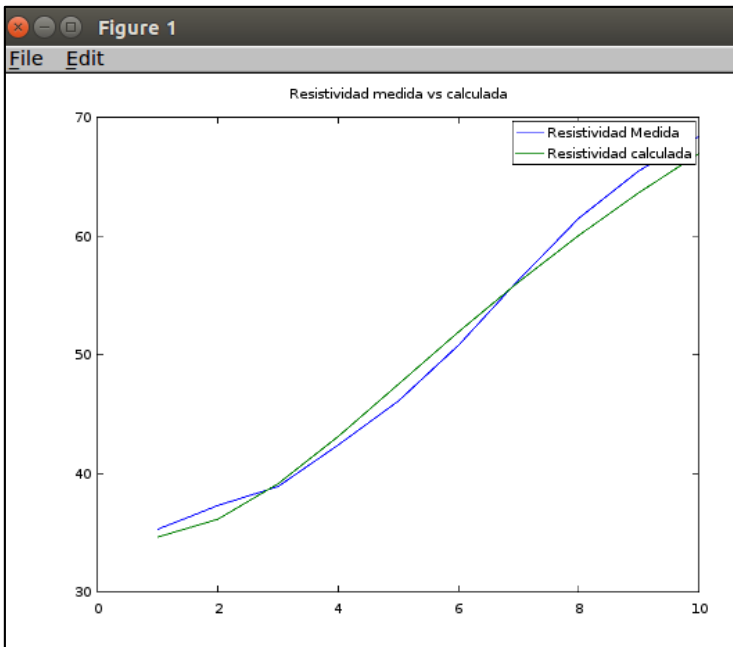
$$\rho_1 = 42.447 \Omega.m$$

$$\rho_2 = 84.719 \Omega.m$$

$$h = 1.37m$$

$$Error\ RMS = 2.5877\%$$

e) Perfil 1 Cancha de fútbol, subestación 1 IEEE Std 81



Resultados:

$$\rho_1 = 34.38 \Omega \cdot m$$

$$\rho_2 = 114.3 \Omega \cdot m$$

$$h = 3.79 m$$

$$Error RMS = 2.222\%$$

f) Perfil 2 Cancha de fútbol, subestación 1 IEEE Std 81

Figura 42: Resultados de modelado por software para terreno cercano a subestación 1

- Subestación 2 (en construcción)

Las mediciones tomadas en el presenta caso no tienen una variación pronunciada es por esto que se aplica el modelo de suelo homogéneo por diferentes métodos.

➤ *Resistividad Promedio*

$$\rho_{PROM} = \frac{22.0 + 23.2 + 24.9 + 25.7 + 23.4}{5}$$

$$\rho_{PROM} = 23.84 \Omega \cdot m$$

➤ *Promedio Resistividad Máximo y Resistividad Mínima*

$$\rho_{PROM} = \frac{25.7 + 22.0}{2}$$

$$\rho_{PROM} = 23.85 \Omega \cdot m$$

➤ Método de Box Cox

Espaciamiento (m)	ρ_a ($\Omega.m$)	$\text{Ln}(\rho_a)$	$(\text{Ln}(\rho_a) - \text{Ln}(\rho_a)_{\text{PROM}})^2$
1	22	3.09104245	0.006211876
3	23.2	3.14415228	0.000660779
5	24.9	3.2148678	0.002025891
7	25.7	3.24649099	0.005872629
9	23.4	3.15273602	0.000293159
Promedio de $\text{Ln}(\rho_a)$		3.16985791	
Desviación estándar S		0.02454737	
Resistividad ρ		24.11 $\Omega.m$	

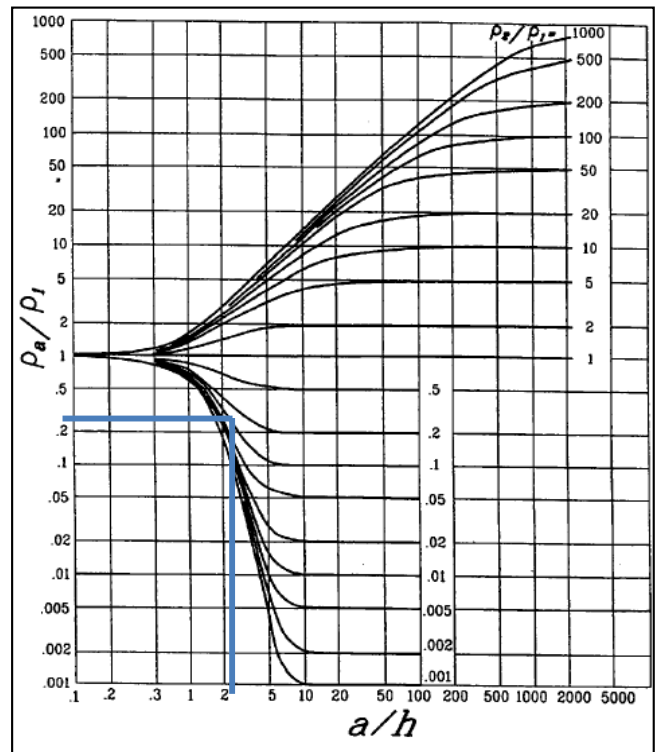
Tabla 20: Resultados del método BOX COX terreno cercano a Subestación 2

- Subestación 3

En las mediciones de resistividad de la subestación 3, la variación en porcentaje de máximo y mínimo es muy notable, de 90.3%, debido a esta variación se aplica el modelo de suelo no homogéneo para dos capas por diferentes métodos.

➤ Método gráfico de Sunde

PERFIL 1	
Parámetro	Valor
ρ_1	35 $\Omega.m$
ρ_2	3 $\Omega.m$
ρ_2 / ρ_1	0.08~0.1
ρ_a / ρ_1	0.23
a/h	2.2
ρ_a	8.05 $\Omega.m$
a	6.7 m
h	2.9 m



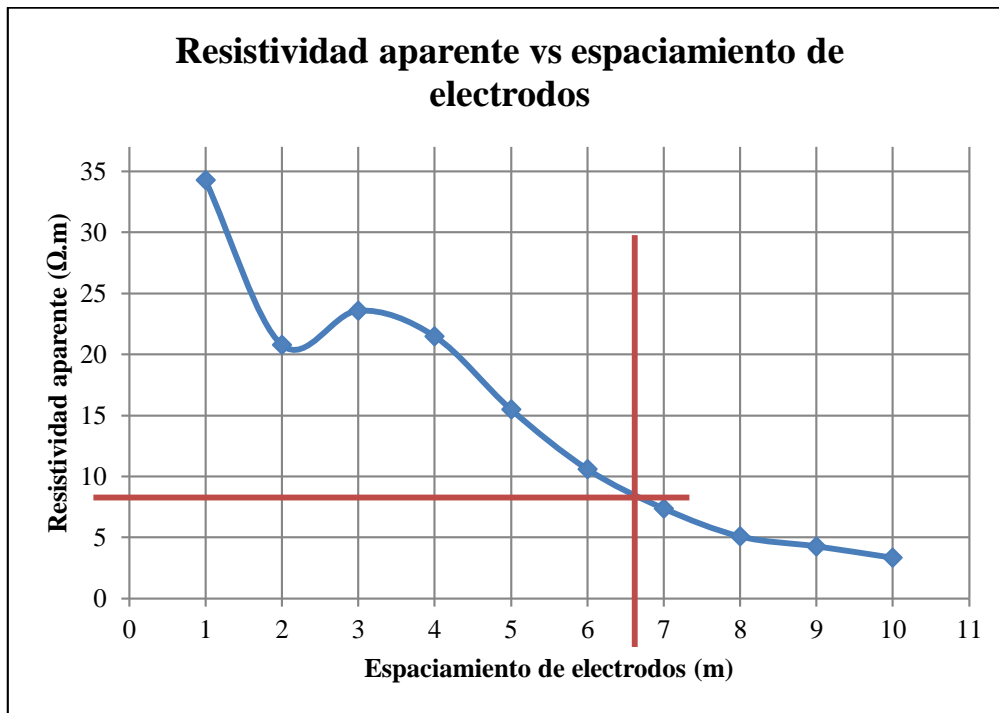
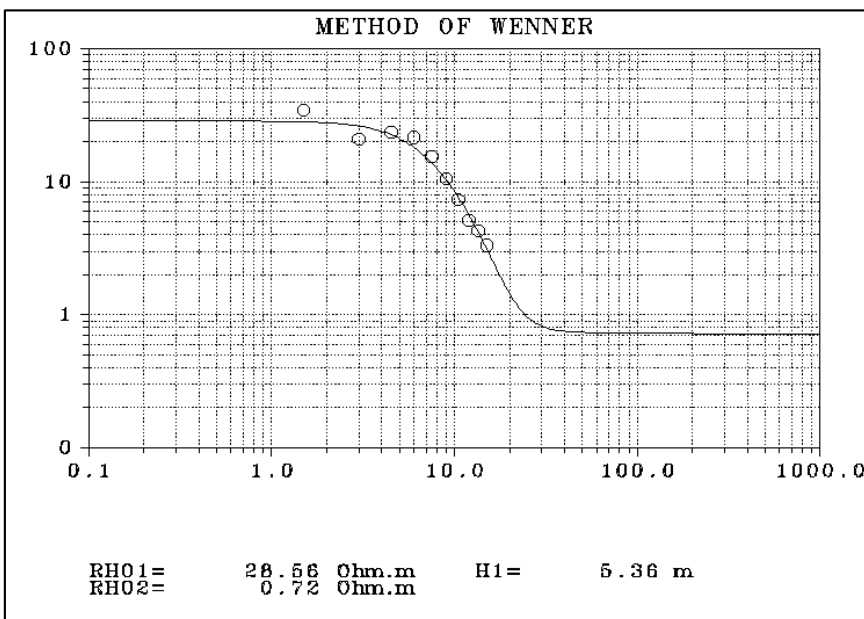


Figura 43: Resultados de modelado utilizando el método gráfico de Sunde para cancha cercana a la Subestación 3.

➤ *Método computarizado utilizando software Rho32*



Resultados:

$$\rho_1 = 28.56 \Omega.m$$

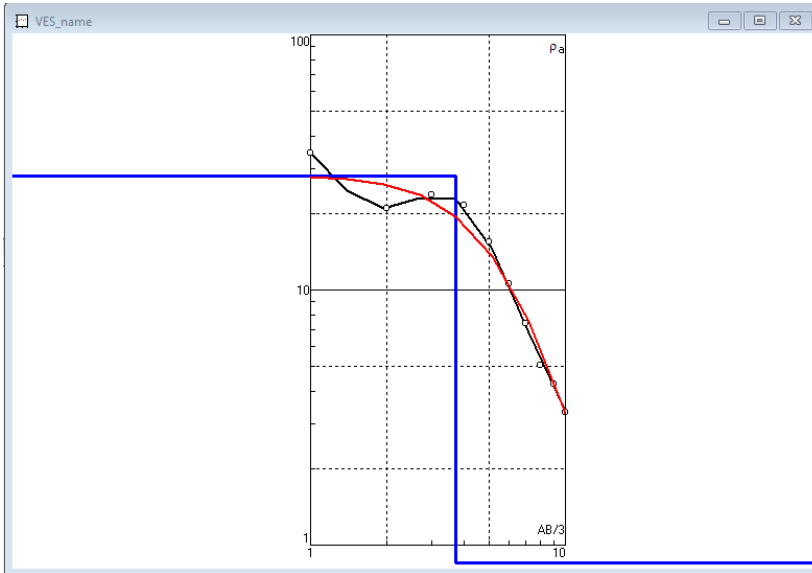
$$\rho_2 = 0.72 \Omega.m$$

$$h = 5.36 m$$

$$Error = 12.5\%$$

a) Cancha de fútbol cercana a subestación 3 Rho32

➤ Método computarizado utilizando software IP2Win



Resultados:

$$\rho_1 = 28.00 \Omega.m$$

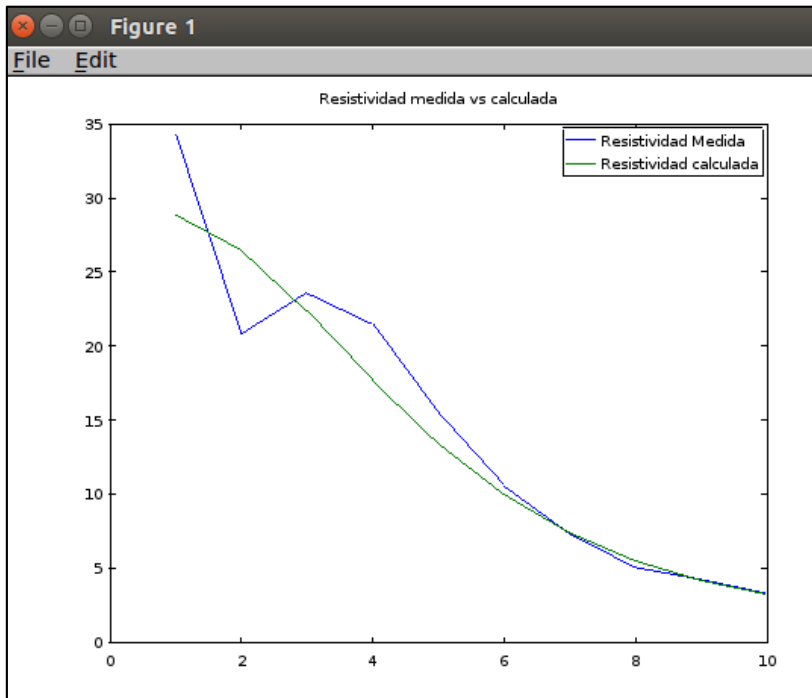
$$\rho_2 = 0.59 \Omega.m$$

$$h = 3.7 m$$

$$Error\ RMS = 13.6 \%$$

b) Cancha de fútbol cercana a subestación 3 IP2Win

➤ Método computarizado utilizando método analítico IEEE Std. 81



Resultados:

$$\rho_1 = 29.34 \Omega.m$$

$$\rho_2 = 1.18 \Omega.m$$

$$h = 3.36 m$$

$$Error\ RMS = 12.8 \%$$

c) Cancha de fútbol cercana a subestación 3 Rho32

Figura 44: Resultados de modelado por software para terreno cercano a subestación 2

4.3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Predio baldío, FIA-UES

El valor más preciso de la resistividad de puesta a tierra es de 98.04 $\Omega.m$ obtenido por el método de BOX COX para el arreglo Wenner, se puede considerar así ya que por este método se obtiene el resultado que tiene una probabilidad de ser 70% el valor real en cambio con los otros métodos no se tiene ese porcentaje de probabilidad.

- Centro Comercial Santa Rosa (en construcción), Santa Tecla

En el caso de un modelado de dos capas se toma el método con menor error por lo cual para el perfil 1 los valores más precisos son $\rho_1 = 59.93 \Omega.m$, $\rho_2 = 352.3 \Omega.m$ y $h = 2.42 m$ y para el perfil 2 $\rho_1 = 111.2 \Omega.m$, $\rho_2 = 281.3 \Omega.m$ y $h = 2.41 m$ ambos obtenidos con el software IP2Win.

- Ciudad Corinto, Mejicanos

En esta caso la cancha de BKB fue modelada como suelo homogéneo obteniendo como resultado la resistividad de 60.31 $\Omega.m$ por el método de BOX COX y el predio baldío fue modelado como suelo de dos capas en el cual el software que arrojo menor error fue Rho32 con los siguientes valores $\rho_1 = 53.12 \Omega.m$, $\rho_2 = 39.97 \Omega.m$ y $h = 4.65 m$

- Subestación 1

Los resultados más precisos fueron obtenidos mediante el software IP2Win. Para el perfil 1 $\rho_1 = 40.65 \Omega.m$, $\rho_2 = 82.40 \Omega.m$ y $h = 1.18 m$, para el perfil 2 $\rho_1 = 42.44 \Omega.m$, $\rho_2 = 84.72 \Omega.m$ y $h = 1.37 m$

- Subestación 2

Como en los casos anteriores de suelo homogéneo, el método de BOX COX es el más preciso 24.4 $\Omega.m$.

- Subestación 3

El software más preciso es Rho32 para este caso mostrando resultados de $\rho_1 = 28.56 \Omega.m$, $\rho_2 = 0.72 \Omega.m$ y $h = 5.36 m$

4.4 MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

4.4.1 METODOLOGÍA

Para la medición de resistencia de puesta a tierra se aplicaron los métodos descritos en el apartado 2.6.1.

4.4.2 PASOS PARA REALIZAR MEDICIONES

Los pasos seguidos se encuentran descritos en el apartado 3.3.2. Principalmente se aplicó el método de la pendiente junto con la corrección para medición en subestaciones en servicio.

4.4.3 RESULTADOS DE MEDICIONES

Los datos obtenidos de las mediciones se presentan según fecha con el respectivo método de medición utilizado y el resultado obtenido, así como también los perfiles de caída de potencial para cada sitio.

- Subestación 1. 4 de Septiembre de 2015

Método utilizado: Caída de Potencial completo, caída de potencial 62% y caída de potencial/Clamp para torres de transmisión

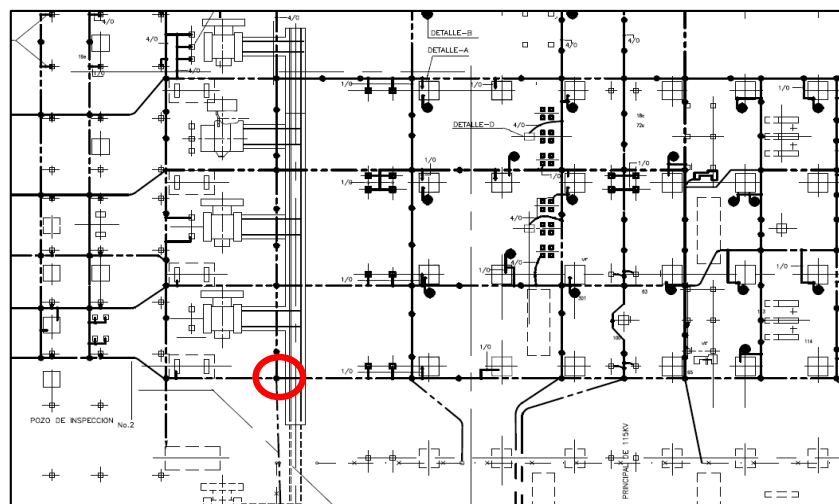


Figura 45: Punto de prueba para medición de resistencia de puesta a tierra en subestación 1.

Distancia hacia el electrodo de corriente: 110m

- Caída de potencial completo

% de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	Valor medido de R (Ω)	
		AEMC 6471	Megger DET2/2
10	11	0.031	0.014
20	22	0.046	0.024
30	33	0.057	0.032
40	44	0.145	0.097
50	55	0.164	0.144
60	66	0.345	0.325
70	77	0.356	0.339
80	88	0.53	0.52
90	99	1.144	1.137

Tabla 21: Mediciones de resistencia PAT, método de caída de potencial completo en subestación 1

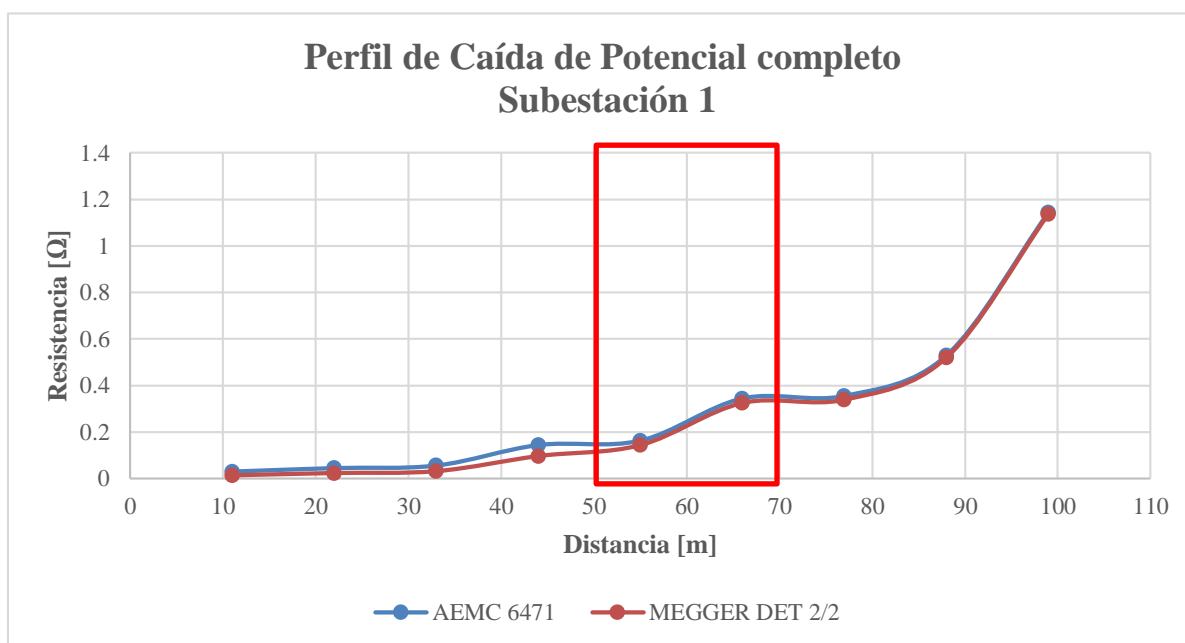


Figura 46: Perfil de caída de potencial completo subestación 1

Valor medido de R (Ω)	
AEMC 6471	Megger DET2/2
0.29	0.27

Tabla 22: Comparación de resultados obtenidos con diferentes

- Caída de potencial 62%

% de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	Valor medido de R (Ω)	
		AEMC 6471	Megger DET2/2
62	68.2	0.35	0.32

Tabla 23: Aplicación del método de caída de potencial en subestación 1

- Corrección por medición en subestación en servicio:

Se debe corregir el valor de la resistencia de puesta a tierra medida ya que la subestación estaba en servicio y el resultado es afectado por la separación de la corriente de prueba entre el neutro del sistema y cables de guarda, para corregir este valor se aplican las ecuaciones 10 y 13 para lo cual se necesitan el factor S_f y el radio de un electrodo hemisférico equivalente. Ver anexo C

Datos utilizados para llevar a cabo la corrección:

$$S_f = 0.46$$

$$a = 15.1\text{m}$$

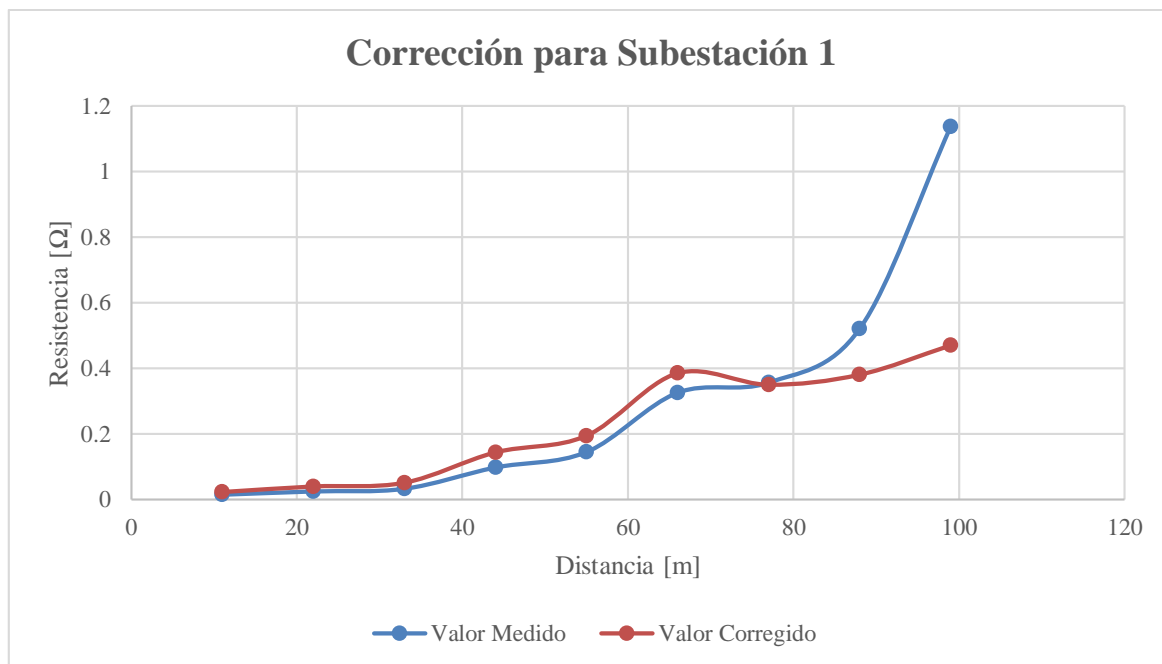


Figura 47: Corrección por medición en subestación 1 en servicio.

Nuevo valor de Resistencia de puesta a tierra = 0.4 Ω

➤ Resistencia de puesta a tierra de torres de transmisión

Utilizando Teluometro FLUKE GEO1625 y transformador de núcleo partido FLUKE EI-162BN:

Distancia a electrodo de corriente: 46 metros

Distancia a electrodo de potencial: 28 metros

Utilizando Clamp MEGGER DET24C:

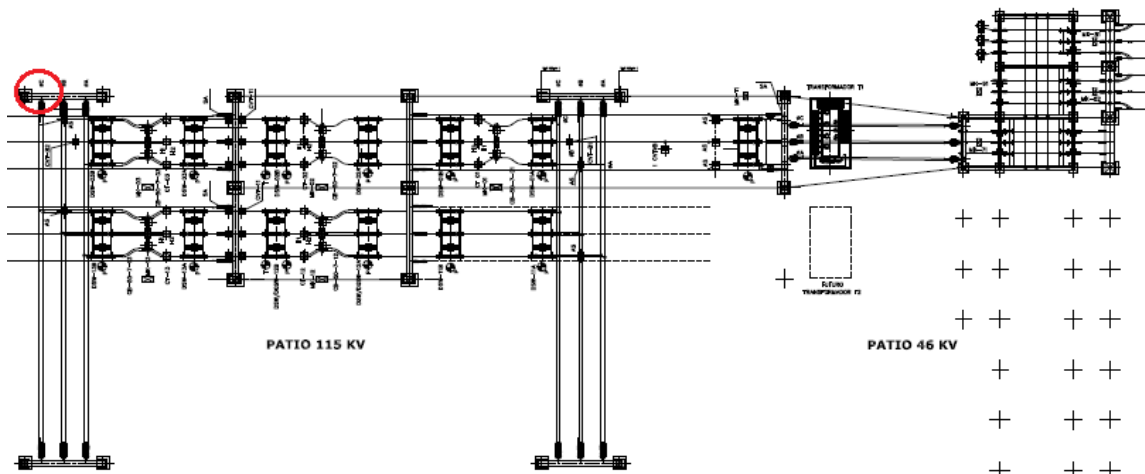
Sin electrodos

Pata	FLUKE GEO1625 y EI-162BN		Clamp MEGGER DET24C	
	Resistencia PAT (Ω)		Resistencia PAT (Ω)	
1	R1	12.92	R1	23.7
2	R2	11.99	R2	17.3
3	R3	12.30	R3	30.3
4	R4	18.00	R4	26.7
	Rtotal	3.36	Rtotal	5.87

Tabla 24: Comparación de mediciones de resistencia de puesta a tierra en torre de transmisión en subestación 1

- Subestación 2. 4 de septiembre de 2015

Figura 48: Punto de prueba para medición de resistencia de puesta a tierra en subestación 2.



Método utilizado: Caída de Potencial completo y 62% y método de la Pendiente

- Caída de potencial completo

Distancia hacia el electrodo de corriente: 100m

% de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	Valor medido de R (Ω)	
		AEMC 6471	MEGGER DET2/2
10	10*	-*	-*
20	20	0.035	0.020
30	30	0.077	0.051
40	40	0.098	0.064
50	50	0.125	0.085
60	60	0.152	0.106
70	70	0.189	0.141
80	80	0.233	0.191
90	90	0.363	0.339

*La medición a 10 metros no fue realizada debido a que el electrodo no pudo ser clavado dentro de la subestación.

Tabla 25: Aplicación del método de caída de potencial completo en subestación 2

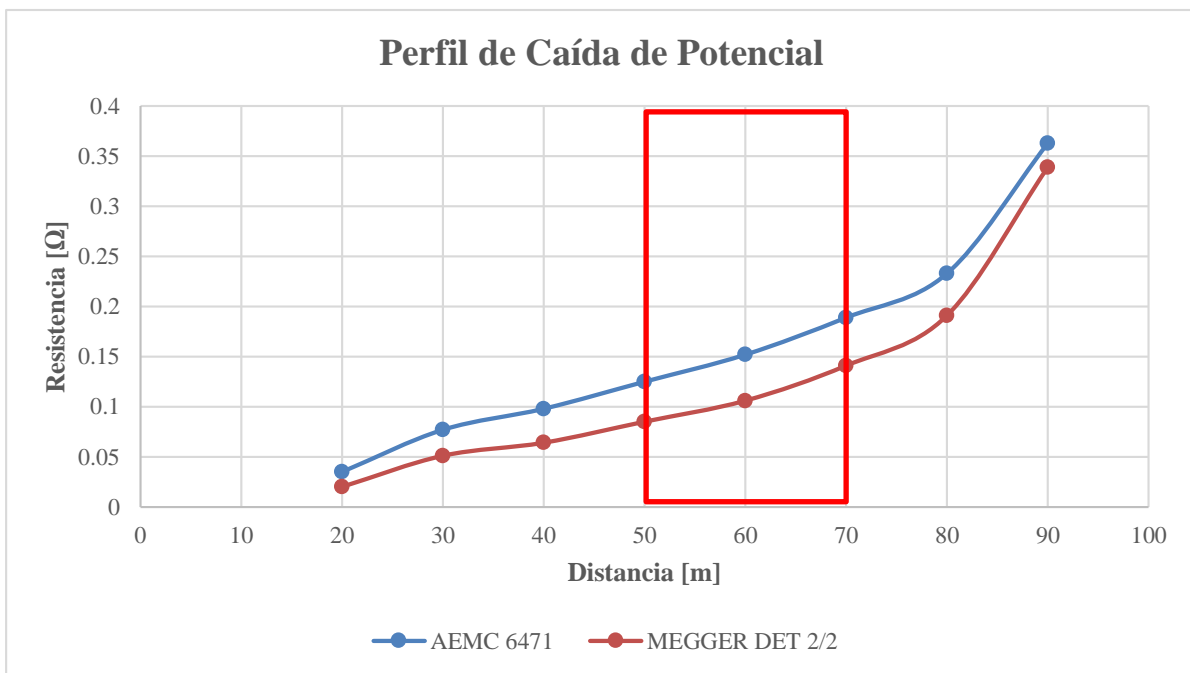


Figura 49: Perfil de caída de potencial completo subestación 2

Valor medido de R (Ω)	
AEMC 6471	Megger DET2/2
0.16	0.11

- Caída de potencial 62%

Valor medido de R (Ω)	

% de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	AEMC 6471	Megger DET2/2
62	62	0.156	0.114

Tabla 26: Aplicación del método de caída de potencial en subestación 2

- Método de la pendiente

AEMC 6471					
Medición #	Porcentaje de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial PPt (m)	Valor medido de R (Ω)	Coefficiente de la pendiente μ	Parámetros de tablas y cálculos
1	20%	20	$R1=0.035$	$\mu = 0.86$	$PPt/CP = 0.569$
2	40%	40	$R2=0.098$		$PPt = \frac{PPt/CP}{CP} = 56.9$
3	60%	60	$R3=0.152$		m
Valor de R colocando el electrodo de potencial a una distancia $PPt =$					0.14 (Ω)
MEGGER DET 2/2					
Medición #	Porcentaje de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial PPt (m)	Valor medido de R (Ω)	Coefficiente de la pendiente μ	Parámetros de tablas y cálculos
1	20%	20	$R1=0.020$	$\mu = 0.95$	$PPt/CP = 0.552$
2	40%	40	$R2=0.064$		$PPt = \frac{PPt/CP}{CP} = 55.2$
3	60%	60	$R3=0.106$		m
Valor de R colocando el electrodo de potencial a una distancia $PPt =$					0.095 (Ω)

Tabla 27: Aplicación del método de la pendiente en subestación 2

- Corrección por medición en subestación en servicio.

Al igual que en la subestación 1, se tienen que corregir las mediciones obtenidas por el método de caída de potencial debido a la cercanía de una subestación aledaña ya que las mediciones se realizaron en la zona de influencia de la red de tierra de dicha subestación.

Datos utilizados para llevar a cabo la corrección:

$S_f=0.56$ y $a=28.8m$

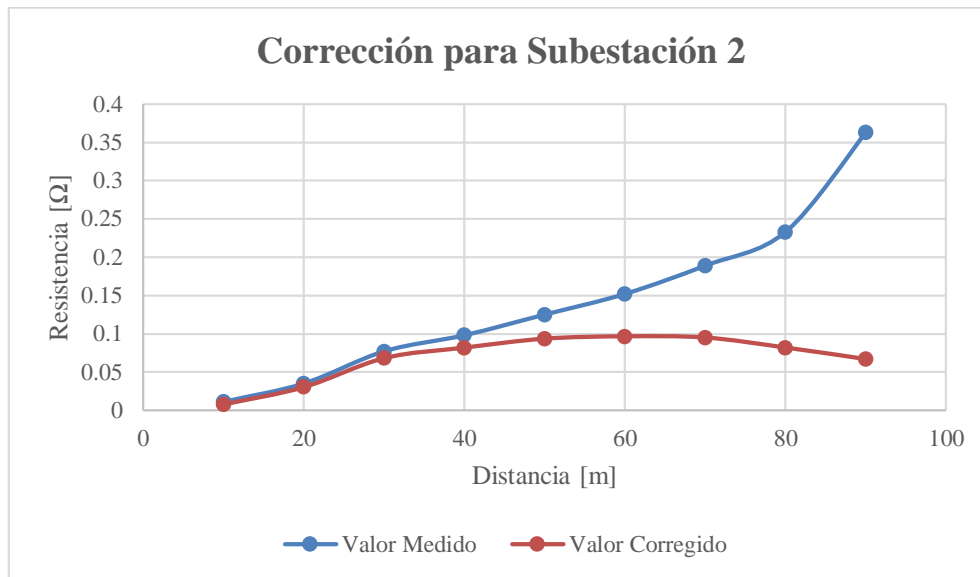


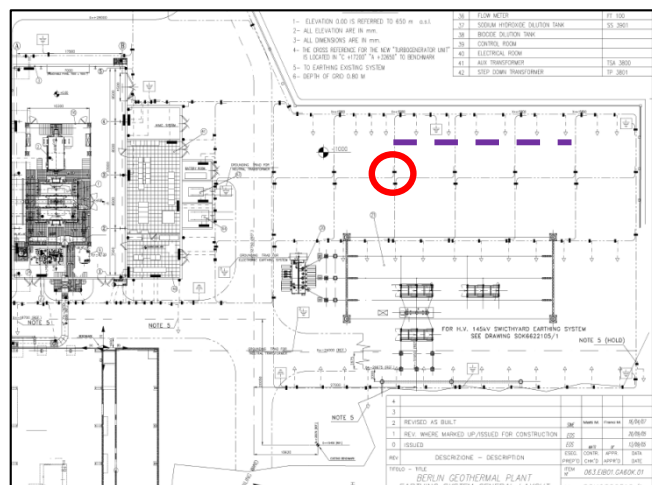
Figura 50: Corrección por medición en subestación 2 en servicio.

Nuevo valor de Resistencia de puesta a tierra = 0.1Ω

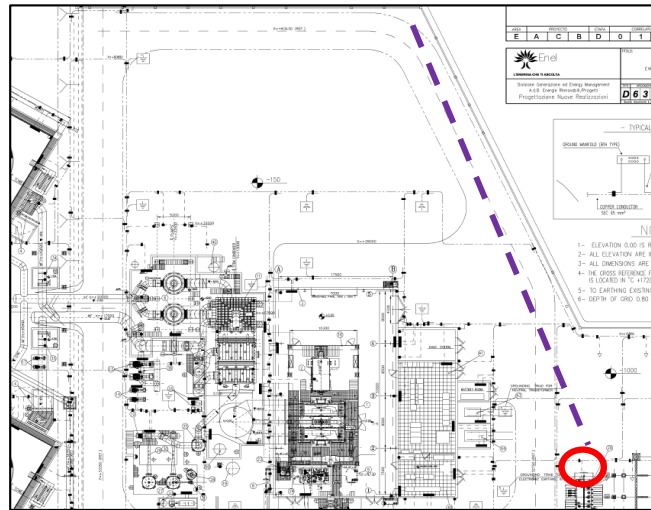
- Subestación 3

Método utilizado: Caída de Potencial completo y 62% y método de la Pendiente.

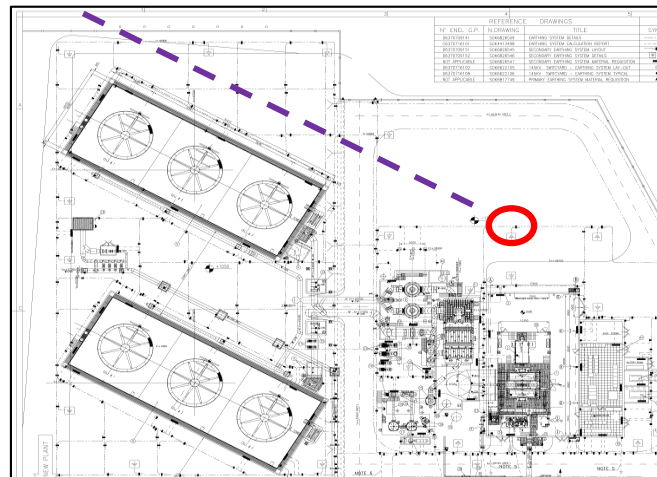
Se llevaron a cabo tres mediciones a diferentes distancias de la subestación con el fin de obtener resultados comparativos para demostrar el efecto de las distancias del electrodo de corriente y de la longitud del conductor de la punta del electrodo de tierra bajo medición al aplicar el método de 3 puntos.



- a) Punto de prueba para medición 1 de resistencia de puesta a tierra en subestación 3.



b) Punto de prueba para medición 2 de resistencia de puesta a tierra en subestación 3.



c) Punto de prueba para medición 3 de resistencia de puesta a tierra en subestación 3.

Figura 51: Puntos de medición de resistencia de puesta a tierra y trayectoria de electrodos auxiliares en Subestación

3

- Caída de potencial completo

➤ *Punto de prueba para medición 1*

Resistencia del conductor del cable utilizado para la punta del electrodo de tierra: 0.66Ω

Distancia hacia el electrodo de corriente: 25m

% de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	R (Ω) 3 polos		R (Ω) 4 polos	
		AEMC	Fluke	AEMC	Fluke
52	13.0	0.707	0.740	0.051	0.052
62	15.5	0.727	0.760	0.073	0.077
72	18.0	0.763	0.800	0.112	0.115

Tabla 28: Resultados punto de medición 1 en Subestación 3

➤ *Punto de prueba para medición 2*

Resistencia del conductor del cable utilizado para la punta del electrodo de tierra: 0.66Ω

Distancia hacia el electrodo de corriente: 100m

% de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	R (Ω) 3 polos		R (Ω) 4 polos	
		AEMC	Fluke	AEMC	Fluke
10	10	0.77	0.665	0.004	-*
20	20	0.75	0.656	0.005	-*
30	30	0.76	0.663	0.024	-*
40	40	0.77	0.673	0.021	0.029
50	50	0.78	0.677	0.03	0.037
60	60	0.82	0.715	0.062	0.07
70	70	0.87	0.744	0.097	0.105
80	80	0.92	0.806	0.153	0.162
90	90	1.12	1.039	0.384	0.392

*Las mediciones no se pudieron realizar debido a un error presentado por el equipo, el cual no se pudo solucionar en el momento

Tabla 29: Resultados punto de medición 2 en Subestación 3

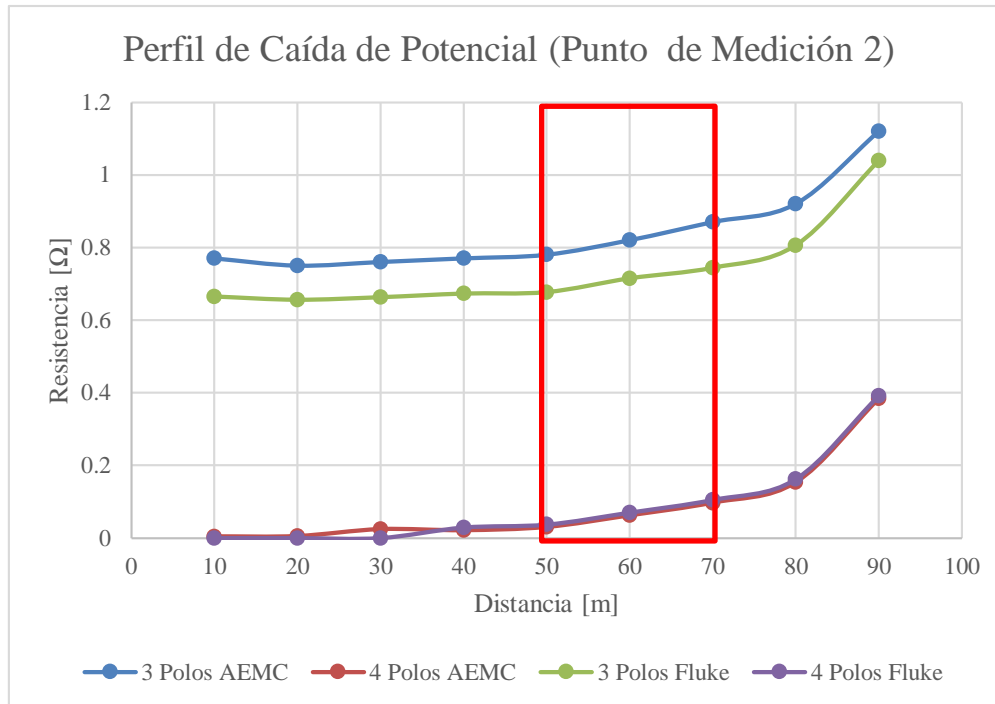


Figura 52: Perfil de caída de potencial completo subestación 3 punto de medición 2

➤ *Punto de prueba para medición 3*

Distancia hacia el electrodo de corriente: 435m

% de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	Valor medido de R (Ω)
10	45	0.737
20	90	0.745
30	135	0.872
40	180	0.897
50	225	0.928
60	270	0.921
70	315	0.826
80	360	1.023
90	405	1.143

Tabla 30: Resultados punto de medición 3 en Subestación de 3

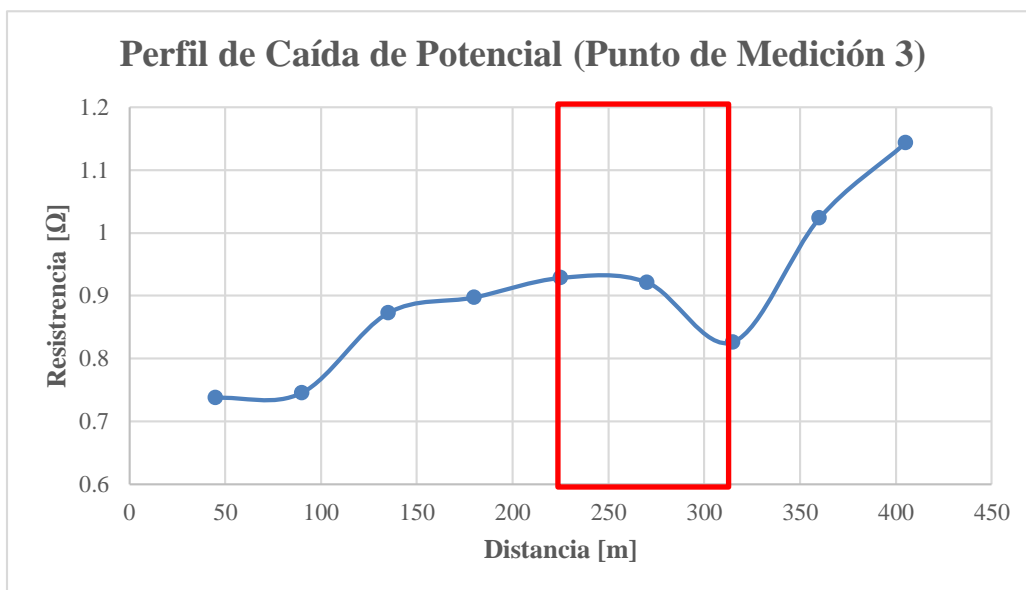


Figura 53: Perfil de caída de potencial completo subestación 3 punto de medición 3

Valor medido de R (4 polos)		
Punto 1	Punto 2	Punto 3
0.078Ω	0.063Ω	0.89Ω

Tabla 31: Comparación del método de caída de potencial a diferentes distancias de electrodos auxiliares en Subestación 3

Caída de potencial 62% (Punto de Medición 3)

% de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	Valor medido de R (Ω)
62	269.7	0.92

Tabla 32: Resultado del método de caída de potencial para el punto de medición 3 en subestación 3

- Método de la pendiente (Punto de Medición 3)

Medición #	Porcentaje de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial PPt (m)	Valor medido de R (Ω)	Coefficiente de la pendiente μ	Parámetros de tablas y cálculos
1	20%	90	R1=0.745	$\mu = 0.16$	$PPt/CP = 0.6752$
2	40%	180	R2=0.897		$PPt = \frac{PPt/CP}{CP} = 293.7 \text{ m}$
3	60%	270	R3=0.921		
Valor de R colocando el electrodo de potencial a una distancia $PPt =$					0.85 (Ω)

Tabla 33: Resultado del método de la pendiente para el punto de medición 3 en subestación 3

- Corrección por medición en subestación en servicio.

Datos utilizados para llevar a cabo la corrección:

$S_f = 0.35$ y $a = 94\text{m}$

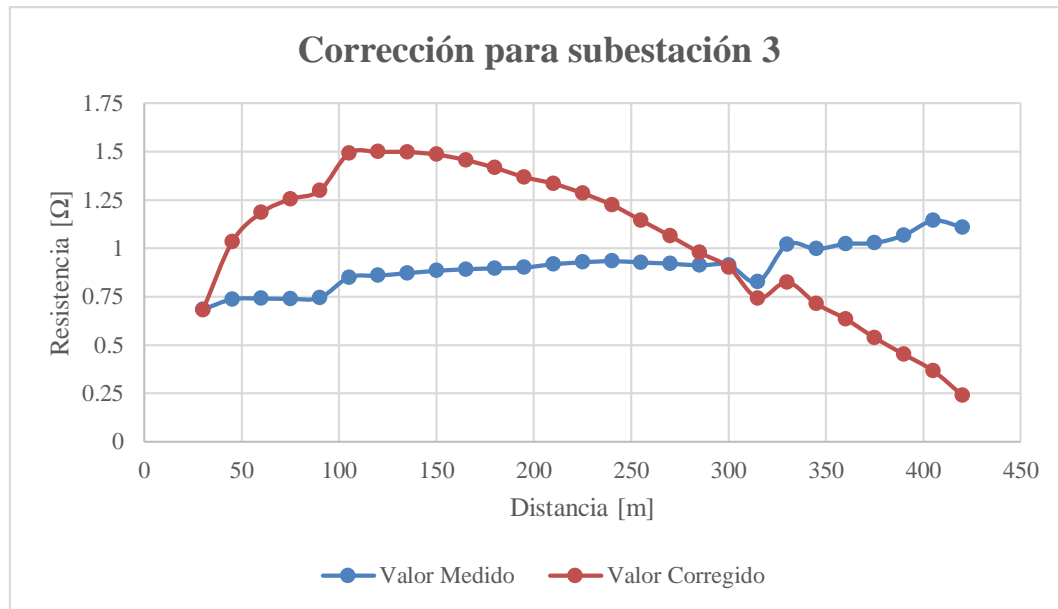


Figura 54:

Corrección por medición en la subestación 3 en servicio

Nuevo valor de Resistencia de puesta a tierra=1.1Ω

- Resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión

Utilizando Teluometro FLUKE GEO1625 y transformador de núcleo partido FLUKE EI-162BN

Distancia a electrodo de corriente: 36 metros

Distancia a electrodo de potencial: 22 metros

Pata	Resistencia (ohm)	
1	R1	22.3
2	R2	19.37
3	R3	28.0
4	R4	17.84
	Rtotal	5.31

Tabla 34: Resultado de medición de resistencia de puesta a tierra en torre de transmisión L7-21-34 cercana a subestación 3

4.4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Subestación 1

Resistencia de puesta a tierra de subestación:

El método de caída de potencial completo es el método más preciso, en este caso, ya que el resultado que se obtiene es el promedio de la zona en donde, en teoría, se considera que se encuentra la resistencia de puesta a tierra efectiva pero el valor que debe tomarse como el correcto es de 0.4Ω obtenido por la corrección de las mediciones por estar la subestación en servicio.

Resistencia de puesta a tierra de torres de transmisión:

El resultado de 3.36 Ω es el que se toma como el correcto, obtenido del paralelo de las mediciones de las cuatro patas utilizando el teluometro FLUKE con el transformador de núcleo partido, ya que dicho accesorio abarca completamente la pata de la torre de transmisión y el cable de tierra, además de despreciar la resistencia en paralelo de las otras torres de transmisión interconectadas por el cable de guarda, esto se debe a que separa la corriente que se induce por la torre hacia el cable de guarda y la corriente que se induce a la red de tierra.

- Subestación 2

En este caso el valor obtenido por el método de la pendiente podría haber sido el más preciso ya que este método busca el centro eléctrico de la malla al obtener la distancia a la cual debe ser colocado el electrodo de potencial para la medición que se considera correcta pero como se mencionó anteriormente una subestación se encuentra cercana a la subestación que está en estudio y el efecto de la red de tierra que presenta no puede ser despreciada es por esto que el valor que puede considerarse correcto es de 0.1 Ω obtenido de la corrección por el factor Sf, este valor de resistencia es menor a la medida debido a que la distancia a la cual se extendieron los electrodos auxiliares fue muy poca en comparación a la longitud de la malla además de la dirección en la cual se extendieron los mismos.

- Subestación 3

En la subestación 3 se hicieron 3 mediciones diferentes, en diferentes puntos de prueba y diferentes trayectorias y distancias a los electrodos auxiliares:

- *Punto de medición 1 (figura 51a):* El punto de prueba fue el cable de tierra de una estructura metálica y los electrodos auxiliares se extendieron dentro de la subestación dejando a 25 metros el electrodo de corriente, en este caso se puede decir que la medición es errónea ya que la distancia de los electrodos auxiliares es demasiado corta y estos están colocados dentro de la malla de tierra
- *Punto de medición 2 (figura 51b):* El punto de prueba fue el cable de tierra de un transformador, los electrodos auxiliares dentro del área de efecto de la red de tierra pero fuera de la subestación, el electrodo de corriente se colocó a 100 metros pero también esta medición es errónea ya que la distancia fue muy corta en comparación con la longitud máxima de la malla de tierra y aún se encontraba en el área de efecto de la red.
- *Punto de medición 3 (figura 51c):* El punto que se tomó fue uno de los pozos de prueba de la subestación 3 y el electrodo de corriente fue extendido a 435 metros hacia la cancha de fútbol, esta medición se considera correcta ya que no están dentro del área de efecto de la red de tierra y los electrodos están lo suficientemente distanciados de la misma es por esto que la corrección por funcionamiento de la subestación se hizo a las mediciones obtenidas en este punto y así se obtuvo el valor correcto de 1.1Ω

4.5 MEDICIONES DE POTENCIALES SUPERFICIALES

4.4.1 METODOLOGÍA

Para la medición de resistencia de puesta a tierra se aplicaron los métodos descritos en el apartado 2.7.

4.4.2 PASOS PARA REALIZAR MEDICIONES

Los pasos seguidos se encuentran descritos en el apartado 3.3.3.

4.4.3 RESULTADOS DE MEDICIONES

- Subestación 1.

Las mediciones de potenciales superficiales se tomaron únicamente en los puntos en que un operario estaría parado al momento de realizar una maniobra en un interruptor de potencia, un seccionador o en el tablero de control de un transformador.

Voltaje de la barra [kV]	Icckt 3LG [A]	Icckt 1LG [A]
23	23966	18995
46	5105	0
115	13978	15146

Tabla 35: Corrientes de Cortocircuito para la subestación 1

El valor de la resistencia de puesta a tierra es 0.4Ω .

El valor de GPR estimado en la subestación es:

$$GPR = (23966A)(0.4)(0.46) = 4409V$$

Estructura	Punto	Potencial de Toque	Potencial de Paso
A	1	99.2	22.0
	2	77.2	
	3	121.3	
	4	121.3	
B	5	176.4	11.0
	6	165.4	
C	7	132.3	11.0
	8	143.3	
D	9	143.3	0.0
	10	143.3	

Tabla 36: Resultados de potenciales de paso en la subestación

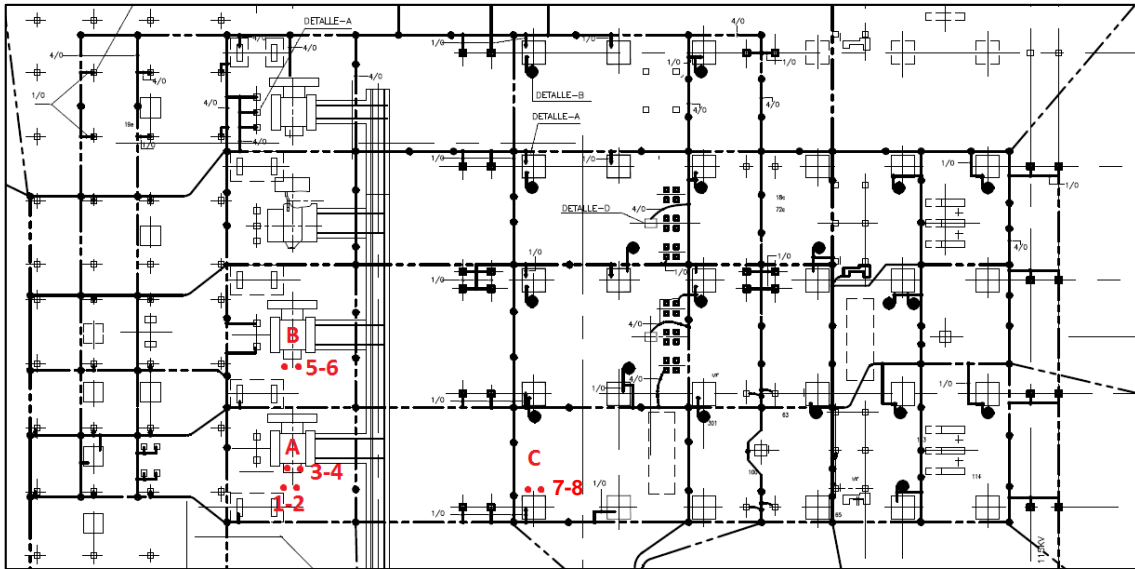


Figura 55: Identificación de estructuras y puntos de medición de potencial de toque en subestación 1.

- Subestación 2.

Voltaje de la barra [kV]	I _{cckt} 3LG [A]	I _{cckt} 1LG [A]
46	5105	0
115	15000	15000

Tabla 37: Corrientes de Cortocircuito para la subestación 2 (Valores de Prueba)

El valor de GPR resultante es:

$$GPR = (15000)(0.56)(0.11) = 924V$$

Estructura	Punto	Potencial de Toque	Potencial de Paso
A	1	93.9	93.9
	2	204.8	
B	1	102.4	0.0
	2	102.4	
C	1	128.0	17.1
	2	145.1	

Tabla 38: Resultados de potenciales de paso en la subestación

Los gradientes resultantes de la medición en la subestación presentan los valores medidos (azul) y una línea de tendencia teórica para ambos casos (rojo), la diferencia entre ellas se debe a los cimientos de las estructuras de montaje de los equipos de la subestación; tubería del sistema de alumbrado y cimientos de la caseta de control para el caso del perfil hacia el exterior e interior de la cuadrícula respectivamente

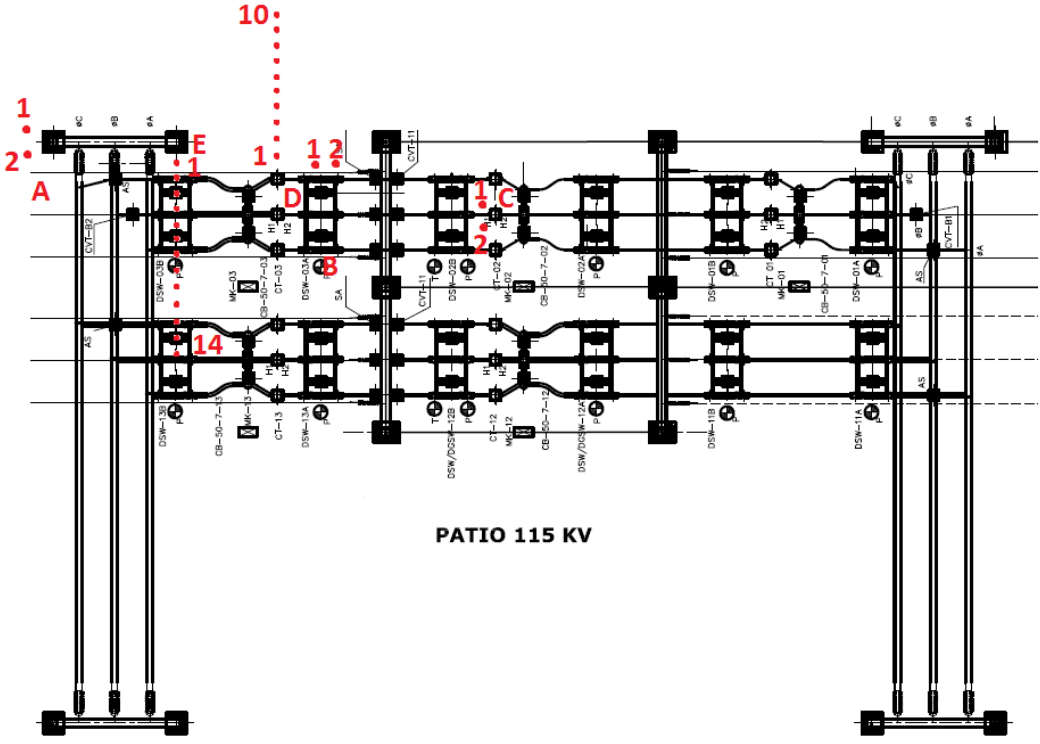


Figura 56: Puntos de medición de potenciales de toque en subestación 2

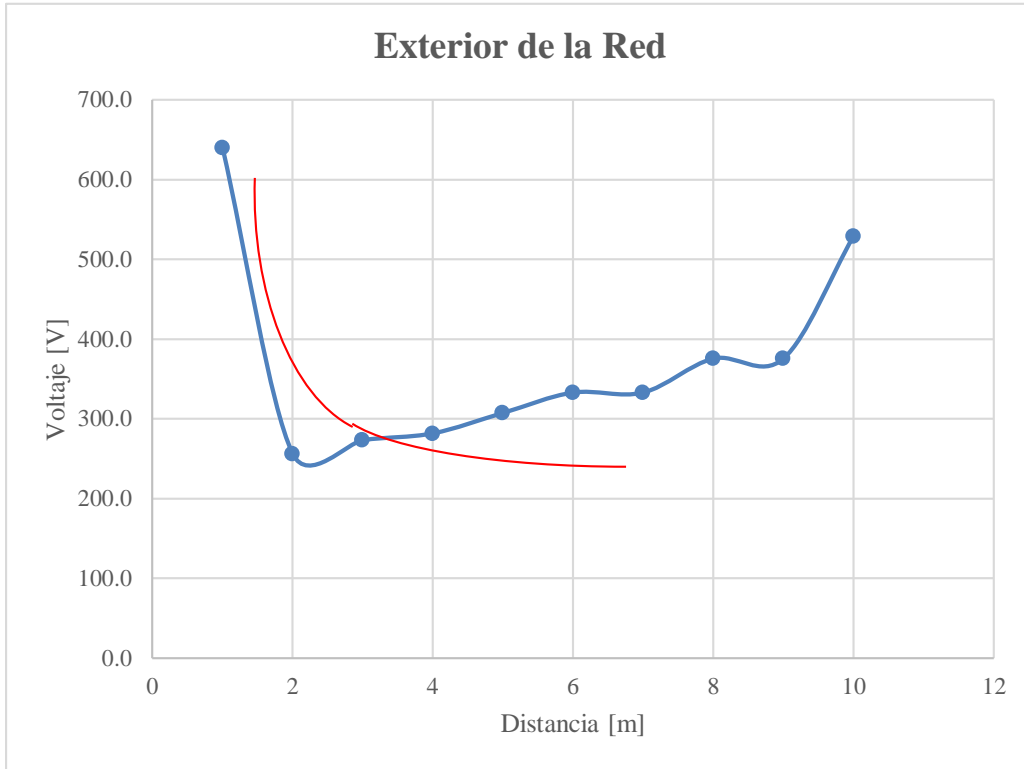


Figura 57: Gradiente de potencial hacia el exterior de la red de tierra desde la estructura D

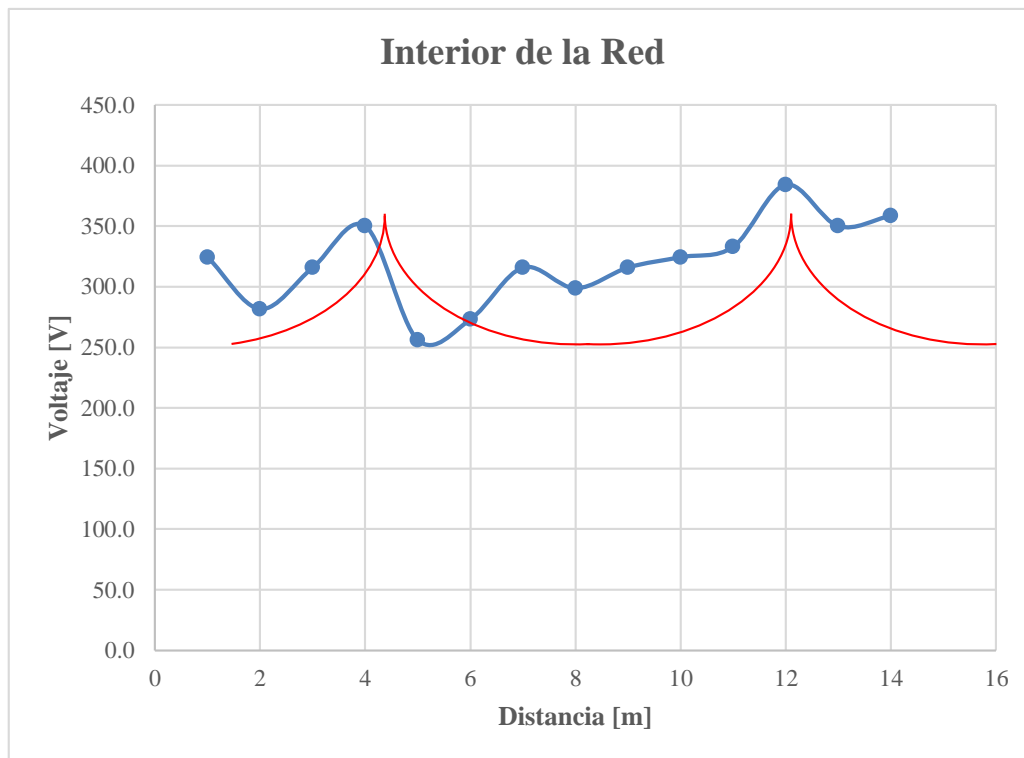


Figura 58: Gradiente de potencial hacia el interior de la red de tierra desde la estructura E.

4.4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Subestación 1

La estructura A corresponde a la carcasa de un transformador de 115/46kV, los puntos 1 y 2 corresponden a una ubicación fuera de una rejilla de desagüe alrededor del transformador mientras que los puntos 3 y 4 corresponden a la medición con respecto a dicha rejilla. La estructura B corresponde a un transformador de 115/23kV, los puntos 6 y 7 son ubicaciones fuera de la rejilla de desagüe. La estructura C corresponde a un interruptor de potencia de 115kV, los puntos 7 y 8 se encuentran a 1 metro de la distancia del interruptor. El valor del potencial de paso en la rejilla es cero debido a que no existe una impedancia sensible a lo largo de la rejilla; en cambio, la medición de potencial de paso puede interpretarse de una manera diferente al procedimiento normal debido a que la rejilla se encuentra sólidamente aterrizada por lo que la impedancia medida corresponde a la existente entre el punto de contacto en el transformador y el punto de aterrizamiento de la rejilla a través de los conductores de puesta a tierra y del conductor de la cuadrícula resultando incorrecta la interpretación que existe una diferencia de potencial entre dos puntos del gradiente de potencial de la red de tierra (Ver figura 1).

- Subestación 2

Las mediciones únicamente se llevaron a cabo en el patio de 115kV, la estructura A corresponde al pórtico de entrada, la estructura B corresponde a la base de montaje de un seccionador trifásico, la estructura C corresponde a la base de transformadores de corriente, la estructura D corresponde a otro juego de transformadores de corriente, la estructura E es otro punto de la misma estructura A.

RESUMEN DE RESULTADOS		
Sitio	Mediciones a realizar	Resultados
Candelaria de la Frontera, Chalchuapa, Santa Ana	Resistividad de suelo	$\rho = 23 \Omega \cdot m$
Predio baldío, Facultad de Ingeniería y Arquitectura- Universidad de El Salvador	Resistividad de suelo	$\rho = 98.40 \Omega \cdot m$
Centro Comercial Santa Rosa (en construcción), Santa Tecla, La Libertad	Resistividad de suelo	Perfil 1: $\rho_1 = 59.93 \Omega \cdot m, \rho_2 = 352.3 \Omega \cdot m$ y $h = 2.42 m$ Perfil 2: $\rho_1 = 111.2 \Omega \cdot m, \rho_2 = 281.3 \Omega \cdot m$ y $h = 2.41 m$
Ciudad Corinto, Mejicanos, S.S	Resistividad de suelo	Cancha de BKB: $\rho_1 = 60.31 \Omega \cdot m$ Predio baldío: $\rho_1 = 53.12 \Omega \cdot m, \rho_2 = 39.97 \Omega \cdot m$ y $h = 4.65 m$
Subestación 1	Resistividad de suelo, resistencia de puesta a tierra en subestación de transmisión y torres de transmisión y potenciales superficiales	Perfil 1: $\rho_1 = 40.65 \Omega \cdot m, \rho_2 = 82.40 \Omega \cdot m$ y $h = 1.18 m$ Perfil 2: $\rho_1 = 42.44 \Omega \cdot m, \rho_2 = 84.72 \Omega \cdot m$ y $h = 1.37 m$ $R_{SUBESTACION} = 0.4 \Omega$ $R_{TORRE DE TRANSMISION} = 3.36 \Omega$
Subestación 2 (en construcción)	Resistividad de suelo, resistencia de puesta a tierra y potenciales superficiales	$\rho = 24.44 \Omega \cdot m$ $R_{SUBESTACION} = 0.1 \Omega$
Subestación 3	Resistividad de suelo, resistencia de puesta a tierra en subestación de transmisión y torres de transmisión	Perfil 2: $\rho_1 = 28.56 \Omega \cdot m, \rho_2 = 0.72 \Omega \cdot m$ y $h = 5.36 m$ $R_{SUBESTACION} = 1.1 \Omega$ $R_{TORRE DE TRANSMISION} = 5.31 \Omega$
Cerro La Cuchilla, Metapán, Santa Ana	Resistividad de suelo	$\rho = 245 \Omega \cdot m$
Cantón Malpaso, Metapán, Santa Ana	Resistividad de suelo	$\rho = 55 \Omega \cdot m$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El manual creado para las mediciones de los parámetros de tierras basado en normas internacionales se ha contrastado con la práctica y se han obtenido los resultados que se esperaban o muy similares con un error aceptable. Este trabajo puede ser utilizado como una guía por los técnicos o ingenieros de mantenimiento en la medición de resistencia de puesta a tierra y potenciales superficiales; o por el ingeniero diseñador de redes de tierra para obtener el valor de resistividad de suelo adecuado.
- Los estudios de resistividad de suelo para diseño de redes de puesta a tierra comúnmente se realizan a una profundidad mayor a la longitud de las barras previstas a colocar en la malla esto se debe a que no se puede suponer que el suelo es homogéneo con solo obtener mediciones superficiales, como se vio en el apartado de estudios de casos los terrenos pueden mostrar cambios abruptos en cuestión de uno o dos metros de diferencia significando presencia de diferentes tipos de material.
- La tomografía eléctrica resistiva puede ser utilizada para sacar el perfil en 2D de una gran porción de suelo de una manera rápida en comparación a los métodos de prospección tradicionales. Por no presentar un valor fijo de resistividad del terreno, ni un modelado de dos capas, utilizado tradicionalmente para el diseño de redes de tierra, queda a criterio del diseñador elegir cuál valor utilizará para su diseño, tomando criterios como el porcentaje de variación y la posición de unos valores con respecto a otros, y en algunos casos utilizar los criterios de modelado para suelos homogéneos.
- Las mediciones de resistencia de puesta a tierra son las más propensas a ser erróneas esto se debe a varios factores como el incumplimiento de las distancias de los electrodos auxiliares, la trayectoria en las cuales los electrodos son colocados o el desinterés del estudio previo de los planos de la red de tierra siendo el más común la medición con la subestación puesta en servicio o no hacer la corrección de las mediciones por esta condición.
- En el caso del método de caída de potencial para la medición de la resistencia de puesta a tierra con tres polos debe utilizarse un cable lo más corto posible desde la terminal de corriente del telurómetro al electrodo de prueba para no insertar un error a la medición

debido a la resistencia que presenta dicho cable. Utilizando cuatro polos no es necesario que los cables sean cortos.

- El método de la pendiente es el más efectivo para la medición de la resistencia de puesta a tierra en subestaciones grandes ya que este método busca el centro eléctrico de la malla el cual no necesariamente es el centro geométrico de la misma.
- Puede despreciarse el efecto de la dispersión de la corriente de prueba en todo el sistema eléctrico únicamente cuando no exista conexión eléctrica entre la red de tierra de la subestación y el resto del sistema a través de cables de guarda o neutro.
- El valor real de la resistencia de puesta a tierra se ve afectado proporcionalmente al valor de S_f y las dimensiones de la red de tierra de la subestación. El método de corrección requiere una buena precisión en el cálculo del factor S_f y de las dimensiones del electrodo hemisférico equivalente.
- Las mediciones de potenciales superficiales deberían llevarse a cabo antes de instalar la capa de grava, ya que puede no ser necesaria.
- Un perfil de potenciales superficiales se ve afectado directamente por la separación entre los conductores y la resistividad del suelo en el que la subestación se encuentra construida. Un mapa de potenciales de toque y paso puede ser elaborado para identificar zonas donde se requieran mallas de protección para el personal que se encuentre operando alguno de los equipos dentro de la subestación. Aunque puede no ser justificable en el caso que la resistividad del suelo tenga variaciones significativas en el área de construcción de la subestación.

RECOMENDACIONES

- Las metodologías de medición, formatos de campo y análisis de resultados, podrían ser parte de los estándares nacionales en temas de redes de tierras, y aunque estén basados en normas internacionales, nos pone un paso adelante al tener normas que estén acorde a los requerimientos del sistema eléctrico del país y evitar prácticas erróneas a la hora de las mediciones con el fin de garantizar que estos sistemas cumplan con las condiciones de seguridad y buen funcionamiento. Por lo que se recomienda darle seguimiento a este documento como un precedente de un estándar o norma en el tema.
- Investigar la forma en que los datos obtenidos de la Tomografía Eléctrica Resistiva, puedan ser simplificados para modelar un terreno en dos capas, obteniendo un valor de diseño exacto con el que el formulador del proyecto de redes de tierra pueda trabajar. Lo que ahorraría mucho tiempo en la toma de mediciones y mejoraría en confiabilidad el valor final obtenido para fines de sistemas eléctricos.
- Realizar las mediciones de resistencia de puesta a tierra con las subestaciones fuera de servicio y comparar estos resultados con los resultados obtenidos por la corrección de las mediciones de las subestaciones en servicio del capítulo 4. Estos resultados serían más precisos que los mostrados en el presente trabajo.
- Al momento de realizar mediciones en una subestación en servicio, debe considerarse mantener el equipo de medición conectado a la red el menor tiempo posible debido a que en caso de una falla, el equipo puede verse sometido al GPR resultando en daño tanto para el equipo como para la persona que pueda estar manipulando el mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- IEEE Std 81-2012 (2012). *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York.
- IEEE Std 81-1983 (1983). *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York.
- IEEE Std 81.2-1991(1991). *Guide for measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems*. New York
- IEEE Std 80-2000 (2000). *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York.
- IEEE Std 142-2007(2007). *Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. New York
- Especificación CFE 00J00-52 (2011). *Red de Puesta a Tierra Para Estructuras de Líneas de Transmisión Aéreas de 69kV a 400kV En Construcción*. México.
- MOTOROLA Inc. (2005). *Standards and Guidelines For Communication Sites R56*.
- ASTM G57-95a (2001). *Standard test method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*. Pensilvania
- ASTM D3633-98 (1998). *Standard test method for Electrical Resistivity of Membrane-Pavement Systems*. Pensilvania
- IRAM 2281-4 (1989) *Código de práctica: Puesta a tierra de sistemas eléctricos, centrales, subestaciones y redes*. Santa Fé
- OSHA 1910.269 (2011). *Occupational Safety and Health Standard: Electric power generation, transmission, and distribution*.
- NEC 2007 (2007). *National Electric Code*. Massachusetts
- EPM RA6-014 (2008). *Medida de resistividad eléctrica del suelo*. Medellín
- Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. (2013, Septiembre 24). *Junta de Andalucía*. Retrieved Mayo 29, 2015, from http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/estaticas/sites/consejeria/areas/carreteras/documentos/Calidad/20130924_Prospeccion_electrica.pdf
- PROCOBRE (s.f). *Sistemas de puesta a tierra*. Lima
- Aguillero, I., & Martinez Lozano, M. (n.d.). *Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas (Extracto)*.

- Arias, D. (2011). *Exploración Geotérmica y Relaciones Geoeléctricas*. Trabajo de graduación para obtener el título de Maestría en Ingeniería Geotécnica. Universidad Nacional de Colombia.
- Choi, J. K., Ahn, Y. H., Woo, J. W., Jung, G. J., Han, B. S., & Kim, K. C. (2005). *Evaluation of Grounding Performance of Energized Substation by Ground Current Measurement*. Montreal.
- Day, C., & Patel, S. (2010). *Touch and Step Voltage Measurements on Field Installed Ground Grid Overlaid with Gravel and Asphalt Beds*. Georgia.
- INGELMEC S.A. (n.d.). *Método y detalles para la medición de la resistencia de puesta a tierra y medición de las tensiones de toque y de paso de la malla de puesta a tierra*. Lima.
- Loke, M. H. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*.
- MEGGER. (2010). *Getting down to earth . A practical guide to earth resistance testing*. Norristown , Pensilvania.
- Moreno Ospina, G., Valencia Velásquez, J., Cárdenas Agudelo , C., & Villa Acevedo , W. (2007). *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Ramezani, N., & Shahrtash, S. M. (2007). A complete procedure to determine earth fault current distribution and split factor for grounding grid desing of HV substation. *Iranian Journal of Science & Technology* .
- Soto Ortiz, J. D., & García González, B. (2005). *Método alternativo para la medición de grandes sistemas de puesta a tierra - Modelo en prueba*. Barranquilla.
- Tagg, G. F. (1964). *Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering a large area*.
- Yang, J., Wang, J., Zhao, Y., Zhang, Q., Yuan, T., Zhou, Y., et al. (2010). *Observation of Ground Potential Rise Caused by Artificially-triggered Lightning*. Beijing.
- Wolinski, K., & Wiater, J. (2007). *Ground potential rise measurements during lightning on the high voltage substation*. Bialystok.

ANEXOS

ANEXO A: FORMATOS DE CAMPO

INFORME DE CAMPO DE RESISTIVIDAD DEL SUELO

RhoW

DATOS DEL SITIO

Fecha: _____

Nombre del proyecto: _____

Dirección: _____

DATOS COMPLEMENTARIOS

Responsable: _____

Método de prueba: WENNER

Equipo para prueba: _____

Fecha de calibración: _____

Condiciones del suelo: Seco Húmedo

Frecuencia de prueba: _____ Hz

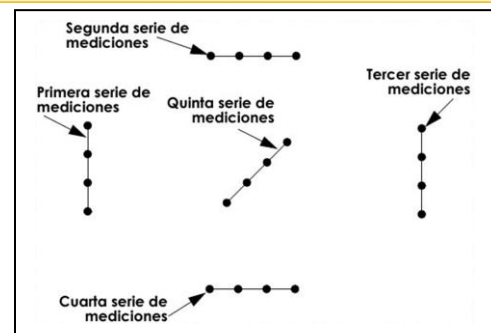
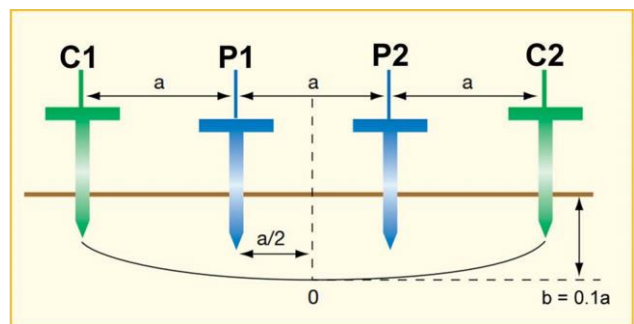
Cálculo de resistencia: $R = \frac{V}{I} [\Omega]$ Cálculo de resistividad: $\rho = 2 * \pi * a * R [\Omega \cdot m]$

OBJETIVO DE LA MEDICIÓN: Este método se utiliza para calcular la resistividad aparente de un terreno amplio. La profundidad depende del espaciamiento entre los electrodos.

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

ESPACIAMIENTO <i>a</i> (m)	PERFIL 1		PERFIL 2		PERFIL 3		PERFIL 4	
	R_1 (Ω)	ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	R_2 (Ω)	ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	R_3 (Ω)	ρ_3 ($\Omega \cdot m$)	R_4 (Ω)	ρ_4 ($\Omega \cdot m$)

RESISTIVIDAD PROMEDIO	
ESPACIAMIENTO <i>a</i> (m)	$\rho_{PROM} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4}{4}$ ($\Omega \cdot m$)
	ρ_{PROM}



Notas:

- La profundidad de la medición es igual a la distancia de espaciamiento entre electrodos.
- Los electrodos o placas deben estar limpios y exentos de óxido para posibilitar un buen contacto con el suelo. Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.
- Se puede obtener un estimado de la resistividad aparente del terreno utilizando el valor promedio de las mediciones. Es recomendable utilizar un software de modelado de suelo para obtener un valor más preciso.

INFORME DE CAMPO DE RESISTIVIDAD DEL SUELO

RhoS

DATOS DEL SITIO

Fecha: _____

Nombre del proyecto: _____

Dirección: _____

DATOS COMPLEMENTARIOS

Responsable: _____

Método de prueba: SCHLUMBERGER

Equipo para prueba: _____

Fecha de calibración: _____

Condiciones del suelo: Seco Húmedo Frecuencia de prueba: _____

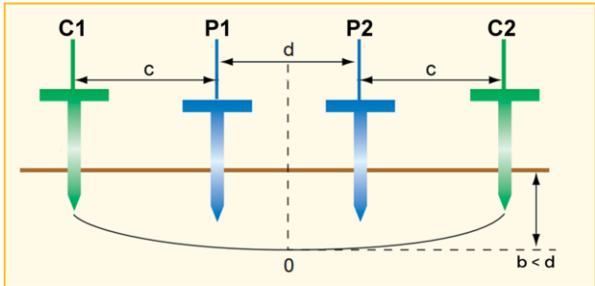
Valor de d: _____ [m]. Cálculo de resistividad: $\rho = \frac{\pi * c * (c+d) * R}{d}$ [$\Omega \cdot m$] Profundidad de medición: $c + \frac{d}{2}$

OBJETIVO DE LA MEDICIÓN: Este método se utiliza para calcular la resistividad aparente de un terreno amplio. La profundidad depende del espaciamiento de los electrodos de corriente.

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

ESPACIAMIENTO c (m)	PERFIL 1		PERFIL 2		PERFIL 3		PERFIL 4	
	R ₁ = V/I (Ω)	ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	R ₂ = V/I (Ω)	ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	R ₃ = V/I (Ω)	ρ_3 ($\Omega \cdot m$)	R ₄ = V/I (Ω)	ρ_4 ($\Omega \cdot m$)

ESPACIAMIENTO c (m)	RESISTIVIDAD PROMEDIO
	$\rho_{PROM} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4}{4}$ ($\Omega \cdot m$)
ρ_{PROM}	



Notas:

- La distancia de c debe ser mayor que 2d
- Los electrodos o placas deben estar limpios y exentos de óxido para posibilitar un buen contacto con el suelo. Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.
- Se puede obtener un estimado de la resistividad aparente del terreno utilizando el valor promedio de las mediciones. Es recomendable utilizar un software de modelado de suelo para obtener un valor más preciso.

INFORME DE CAMPO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

RClamp

DATOS DEL SITIO

Fecha: _____
 Subestación: _____ Planta: _____ Otro: _____
 Dirección: _____

DATOS DE DISEÑO (Si se cuenta con ellos)

Tipo de electrodo de prueba: _____ Número de electrodos PAT: _____
 Longitud del electrodo: _____ (m) Diámetro del electrodo: _____ (in)

DATOS COMPLEMENTARIOS

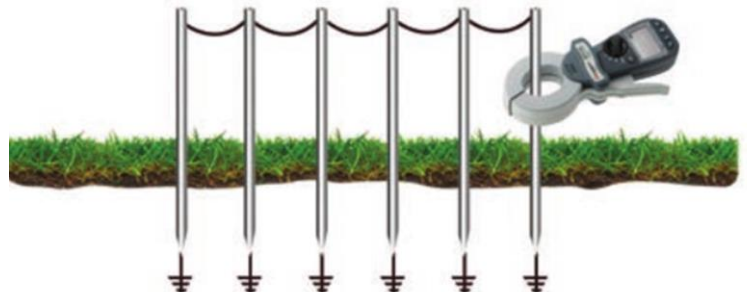
Responsable: _____ Método de medición: CLAMP-ON
 Equipo para prueba: _____ Fecha de calibración: _____
 Condiciones del suelo: Seco Húmedo
 Observaciones: _____

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

Descripción de los puntos de prueba	Valor medido de corriente (A)	Valor medido de R (Ω)
Punto 1		
Punto 2		
Punto 3		
Punto 4		
Punto 5		
Punto 6		
Punto 7		
Punto 8		
Punto 9		
Punto 10		

Notas:

- En su mayoría, este método se utiliza para medición de resistencia de PAT de electrodos en paralelo.
- El sistema de tierra puede estar conectado.
- De necesitar realizar más mediciones, añadir a la tabla las filas que considere necesarias.
- Dependiendo del equipo de medición, el valor de la corriente puede ser leída directamente con la resistencia o deberá cambiarse de función (Consultar con manual del fabricante)
- Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.



INFORME DE CAMPO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

RFOP62

DATOS DEL SITIO

Fecha: _____
 Subestación: _____ Planta: _____ Otro: _____
 Dirección: _____

DATOS DE DISEÑO (Si se cuenta con ellos)

Tipo de electrodo de prueba: _____ Número de electrodos PAT: _____
 Medida de la malla: _____ x _____ (m²) Longitud más grande de la malla: _____ (m)
 Longitud del electrodo: _____ (m) Diámetro del electrodo: _____ (in)

DATOS COMPLEMENTARIOS

Responsable: _____ Método de medición: CAIDA DE POTENCIAL 62%
 Equipo para prueba: _____ Fecha de calibración: _____
 Condiciones del suelo: Seco Húmedo Frecuencia de prueba: _____
 Observaciones: _____

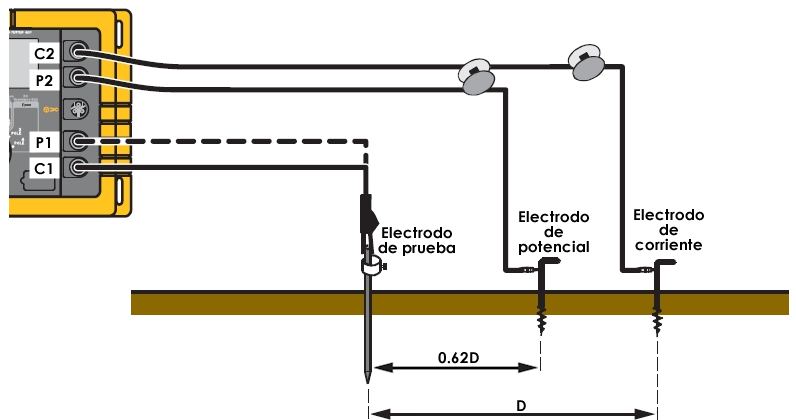
OBJETIVO DE LA MEDICIÓN: Medir la resistencia PAT de una malla de tierra. Se debe de disponer de un área grande para utilizar este método.

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

Distancia a electrodo de corriente (m)	Porcentaje de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	Valor medido de R (Ω)
_____	52%		
	62%		
	72%		
Valor promedio			(Ω)

Notas:

- El sistema de puesta a tierra debe estar desconectado.
- La distancia entre el electrodo de prueba y el de corriente D deberá ser de 5 veces la mayor longitud de la malla.
- Dependiendo del equipo de medición, la terminal de corriente 1 deberá estar conectada de manera externa a la terminal de potencial 1 con un cable corto. (Consultar en el manual del fabricante)
- De tener una variación notable en las mediciones, deberá realizar más mediciones y añadirlas a la tabla anterior.
- Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.



DATOS DEL SITIO

Fecha: _____
 Subestación: _____ Planta: _____ Otro: _____
 Dirección: _____

DATOS DE DISEÑO (Si se cuenta con ellos)

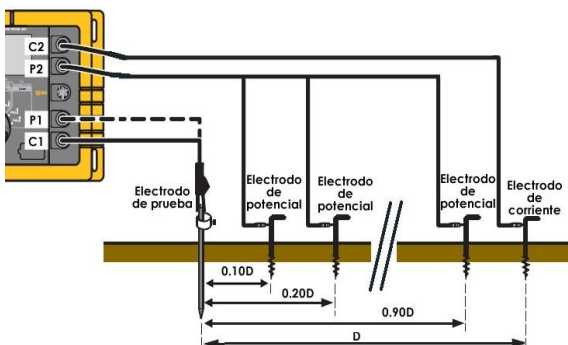
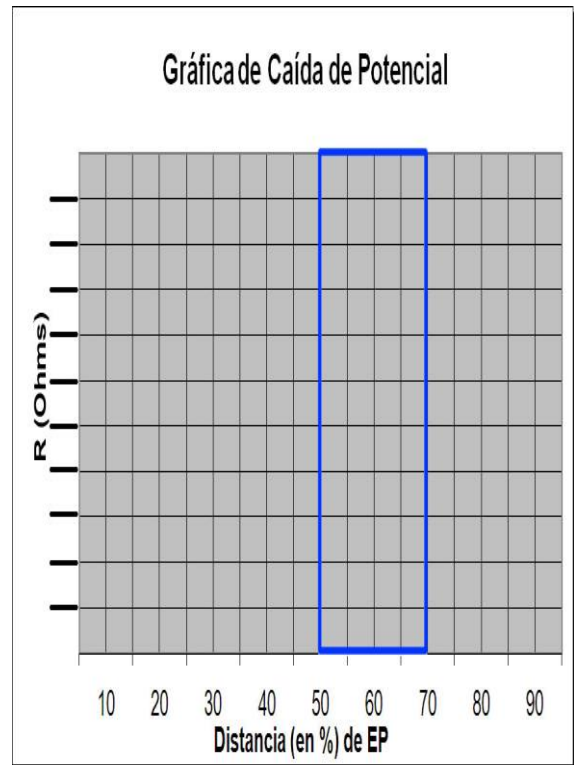
Tipo de electrodo de prueba: _____ Número de electrodos PAT: _____
 Medida de la malla: _____ x _____ (m²) Longitud más grande de la malla: _____ (m)
 Longitud del electrodo: _____ (m) Diámetro del electrodo: _____ (in)

DATOS COMPLEMENTARIOS

Responsable: _____ Método de medición: FOP COMPLETO
 Equipo para prueba: _____ Fecha de calibración: _____
 Condiciones del suelo: Seco Húmedo Frecuencia de prueba: _____
 Distancia del electrodo de corriente al electrodo de prueba: _____ (m)
 Observaciones: _____
 Calculo de Resistencia Efectiva de tierra: $R = (R_{50\%} + R_{60\%} + R_{70\%})/3 (\Omega)$

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

Porcentaje de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	Valor medido de R (Ω)
10%		
20%		
30%		
40%		
50%		
60%		
70%		
80%		
90%		
Resistencia efectiva		(Ω)



Notas:

- El sistema de puesta a tierra debe estar desconectado.
- La distancia entre electrodos deberá ser 5 veces la mayor longitud de la malla.
- Dependiendo del equipo de medición, la terminal de corriente 1 deberá estar conectada de manera externa a la terminal de potencial 1 con un cable corto. (Consultar en el manual del fabricante)
- La resistencia efectiva será la contemplada entre el 50% y 70% de la distancia del electrodo de potencial, ya que es la zona más constante de la gráfica.

INFORME DE CAMPO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

RPDT

DATOS DEL SITIO

Fecha: _____
 Subestación: _____ Planta: _____ Otro: _____
 Dirección: _____

DATOS DE DISEÑO (Si se cuenta con ellos)

Tipo de electrodo de prueba: _____ Número de electrodos PAT: _____
 Medida de la malla: _____ x _____ (m²) Longitud más grande de la malla: _____ (m)
 Longitud del electrodo: _____ (m) Diámetro del electrodo: _____ (in)

DATOS COMPLEMENTARIOS

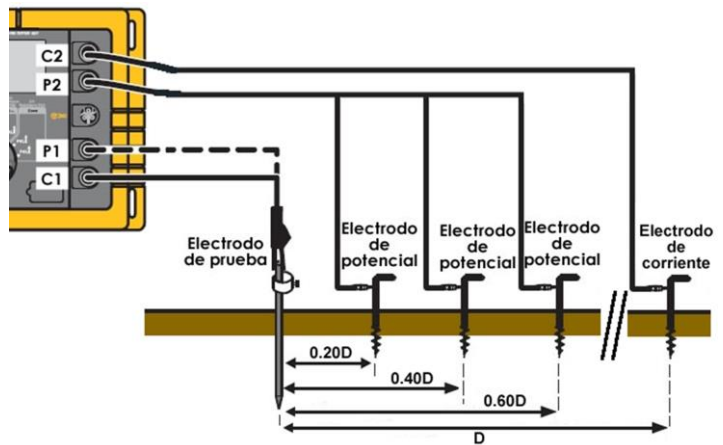
Responsable: _____ Método de medición: PENDIENTE
 Equipo para prueba: _____ Fecha de calibración: _____
 Condiciones del suelo: Seco Húmedo Frecuencia de prueba: _____
 Distancia del electrodo de prueba a electrodo de corriente CP: _____ (m)
 Cálculo de coeficiente de la pendiente $\mu = (R3 - R2)/(R2 - R1)$
 Observaciones: _____

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

Medición #	Porcentaje de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial PPt (m)	Valor medido de R (Ω)	Coeficiente de la pendiente μ	Parámetros de tablas y cálculos
1	20%		R1=	μ=	PPt/CP=
2	40%		R2=		$PPt = \frac{PPt/CP}{CP} =$
3	60%		R3=		
Valor de R colocando el electrodo de potencial a una distancia PPt =					(Ω)

Notas:

- El sistema de puesta a tierra debe estar desconectado.
- Deberá disponerse el equipo como en el método de caída de potencial.
- La distancia entre el electrodo de prueba y el de corriente *D* deberá ser de 5 veces la mayor longitud de la malla.
- Dependiendo del equipo de medición, la terminal de corriente 1 deberá estar conectada de manera externa a la terminal de potencial 1 con un cable corto. (Consultar en el manual del fabricante)
- Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.



INFORME DE CAMPO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

RTT

DATOS DEL SITIO

Fecha: _____
 Torre de transmisión: _____
 Dirección: _____

DATOS DE DISEÑO (Si se cuenta con ellos)

Tipo de electrodo de prueba: _____ Número de electrodos PAT: _____
 Longitud del contrapeso: _____ (m) Longitud del electrodo: _____ (m)
 Diámetro del electrodo: _____ (in)

DATOS COMPLEMENTARIOS

Responsable: _____ Método de medición: TORRES DE TRANSMISIÓN
 Equipo para prueba: _____ Fecha de calibración: _____
 Condiciones del suelo: Seco Húmedo Frecuencia de prueba: _____
 Distancia del electrodo de prueba a electrodo de corriente CP: _____ (m)

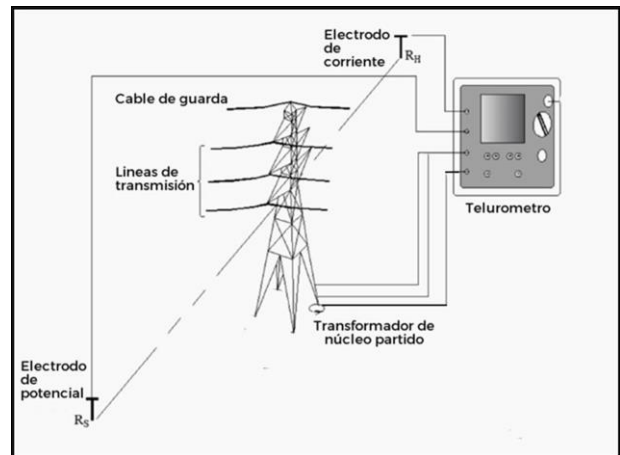
Observaciones: _____

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

Distancia a electrodo de potencial (62%)	Pata #	Valor medido de R (Ω)	Resistencia en paralelo
_____m	1	R1=	$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \text{_____} \Omega$
	2	R2=	
	3	R3=	
	4	R4=	

Notas:

- Deberá disponerse el equipo como en el método de caída de potencial.
- La distancia entre el electrodo de prueba y el de corriente debe ser entre 38 a 46 metros a partir de la cara de la torre
- El transformador de núcleo partido debe estar completamente cerrado alrededor de la pata de la torre de transmisión
- Dependiendo del equipo de medición, la terminal de corriente 1 deberá estar conectada de manera externa a la terminal de potencial 1 con un cable corto. (Consultar en el manual del fabricante)
- Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.



INFORME DE CAMPO DE POTENCIALES DE TOQUE Y PASO

POTTP

DATOS DEL SITIO

Fecha: _____

Subestación: _____ Planta: _____ Otro: _____

Dirección: _____

DATOS DE DISEÑO (Si se cuenta con ellos)

Medida de la cuadrícula: _____ x _____ (m) Corriente de falla en la subestación: _____ (kA)

Espesor de capa de grava: _____ (cm)

DATOS COMPLEMENTARIOS

Responsable: _____

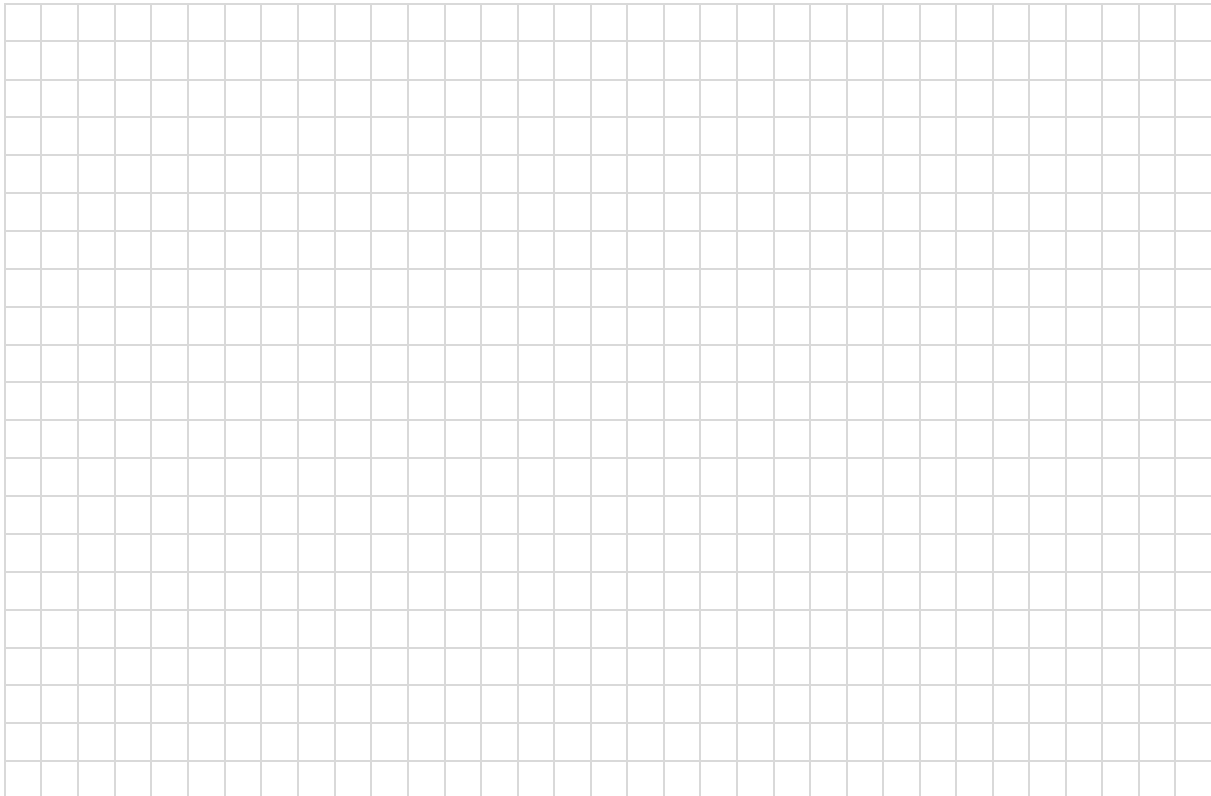
Equipo para prueba: _____ Fecha de calibración: _____

Condiciones de la superficie de la subestación: Seco Húmedo

Valor de resistencia de puesta a tierra $R =$ _____ Ω

Observaciones: _____

Dibujar un esquema de la subestación. (Si el plano está disponible anexar una copia)

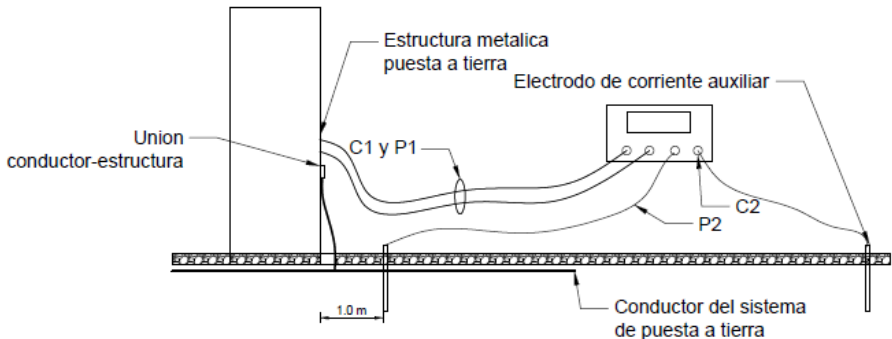


Puntos de medición		Impedancia medida [Ω]	Potencial de Toque [V]	Potencial de Paso [V]
Estructura	Punto			

POTENCIALES DE TOQUE Y PASO ESTIMADOS

Potencial de toque máximo:

Potencial de paso máximo:



Medición de potenciales de toque

ANEXO B: PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA LAS MEDICIONES DE CAMPO EN TERRENOS, SUBESTACIONES Y TORRES DE TRANSMISIÓN.

PROTOCOLO DE MEDICIONES

Resistividad, Resistencia de Puesta a Tierra y Potenciales Superficiales: Estudio de casos en subestaciones eléctricas y terrenos diversos. Prácticas del trabajo de graduación:

MANUAL DE APLICACIÓN DE LA NORMA IEEE Std 81 PARA LÍNEAS Y SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE TRANSMISIÓN

OBJETIVO DE LAS MEDICIONES:

Estimar los valores de resistencia de puesta a tierra, potenciales superficiales de subestaciones eléctricas y un modelado del suelo a partir de mediciones por diversos métodos como parte del trabajo de campo del trabajo de graduación.

EQUIPO Y MATERIALES A UTILIZAR

1. Telurómetro AEMC 6471. Propiedad de Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador
2. Pinzas de medición de corriente. Accesorios complementarios del AEMC 6471
3. Medidores tipo Clamp para obtener una comparación con los métodos aplicados.
4. Equipos que ponga a disposición LaGeo, ETESAL u otras entidades.
5. Cámara para documentar procedimientos.
6. Radios para comunicación entre los operadores de los equipos.

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL POR LOS ESTUDIANTES

1. Botas dieléctricas
2. Guantes aislantes clase 0
3. Lentes de seguridad
4. Casco
5. Manta aislante
6. Ropa 100% de algodón o retardante al fuego.

DOCUMENTOS A UTILIZAR

1. Identificación personal para el ingreso a las instalaciones de asesores y estudiantes, y para trabajos en la vía pública.
2. En cuanto sea posible, los planos eléctricos de las subestaciones a medir, con el fin de obtener datos necesarios para la ejecución correcta de las mediciones.
3. Guías anexadas a este protocolo que describen los pasos para la medición de los parámetros, previamente estudiadas.
4. Formatos anexados a este protocolo, a llenar con los datos obtenidos en campo.
5. Otro documento necesario para ingresar a las instalaciones de las subestaciones, como permisos de la empresa.

MÉTODOS A APLICAR

PARÁMETRO	MÉTODO	DESCRIPCIÓN
Resistividad	Wenner, Schlumberger	Utilización de cuatro electrodos a separación simétrica (Wenner) o asimétrica (Schlumberger), incrementando la separación entre los mismos para obtener valores de resistividad aparente a mayores profundidades
Resistencia de Puesta a Tierra	Caída de Potencial	Para subestación: Conexión de dos electrodos auxiliares (electrodo de corriente y electrodos de potencial) y la red de tierra bajo medición al telurómetro.
Resistencia de Puesta a Tierra	Caída de Potencial	Obtención de un perfil de resistencia vs distancia (entre red de tierra y electrodo de potencial) ubicando el electrodo de corriente en dos direcciones diferentes. Para torres de transmisión: Similar al utilizado en la subestación, con la diferencia de conectar la red de tierra de la torre utilizando un transformador de corriente accesorio del equipo Fluke Geo 1625 o conectar directamente al telurómetro desconectando la red de tierra de la torre completamente.
Potenciales Superficiales	Medición con Telurómetro Convencional	Medición de impedancia entre dos puntos (estructura aterrizada y punto en la superficie de la subestación) con el telurómetro y obtención de valor de potencial de toque utilizando el valor de corriente de corto circuito dentro de la subestación.

TRABAJO EN ALTURA

No, no es necesario tramitar un permiso para trabajos en altura mayores a 1.8 metros.

INFORMACIÓN A COMPLETAR EN FORMATO ANEXO A ESTE PROTOCOLO

1. Nombre de la Empresa
2. Subestación o terreno a medir
3. Ubicación o domicilio de subestación o terreno
4. Hora y fecha de la medición.
5. Asesor o técnico asistente.
6. Uso y tipo de subestación
7. Nivel de voltaje
8. Descripción de las condiciones climáticas actuales y de días anteriores del lugar.
9. Instrumento que se utiliza
10. Fecha de calibración
11. Método a utilizar
12. Frecuencia de prueba
13. Datos necesarios de la subestación para las mediciones
14. Datos obtenidos en las mediciones

ACCIONES A REALIZAR DESPUÉS DE LAS MEDICIONES

1. Reporte con los resultados obtenidos y su análisis. Modelado del suelo.
2. Hacer las recomendaciones técnicas que se crean convenientes según resultados

RECOMENDACIONES

1. El equipo investigador tiene que tener un claro conocimiento de las normas de seguridad a fin de salvaguardar la vida y la integridad física, evitando accidentes eléctricos o de otra naturaleza.
2. Hacer caso a recomendaciones que se hagan por parte de los técnicos o ingenieros a cargo o trabajadores de la empresa en cuestión.
3. Seguir al pie de la letra los procedimientos con el fin de evitar mediciones erróneas, daños al equipo y sobre todo, al personal.

ANEXO C: DETERMINACIÓN DE SF Y CÁLCULO DE RADIO DE HEMIESFERA EQUIVALENTE PARA CORRECCIÓN DE MEDICIÓN TOMADA EN UNA SUBESTACIÓN EN SERVICIO.

Existen diferentes métodos para la determinación del factor Sf utilizado no solamente para esta corrección, sino que también en el diseño de una red de tierra. Para ello, es posible modelar todo el sistema que se encuentra interconectado tomando en cuenta las impedancias de los conductores, auto inductancias entre los conductores por cada fase, resistencias promedio de las torres de transmisión y resistencias de puesta a tierra de subestaciones cercanas a modo de llegar al modelo mostrado en la figura C1.

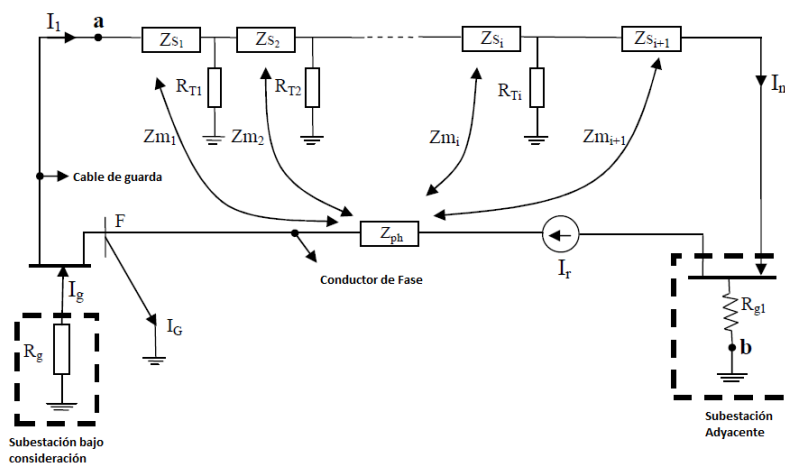


Figura C1: Modelo del sistema mostrando la falla dentro de la subestación.

Existen métodos más prácticos para la determinación de este valor, el estándar IEEE 80-2013 en su anexo C, presenta una tabla de impedancias equivalentes de líneas de transmisión y de distribución que permiten utilizar la regla del divisor de corriente para estimar este factor. Tal como lo explica la norma, ésta tabla es aplicable únicamente cuando la fuente de la corriente de falla es remota a la subestación a la cual se le desea calcular el factor. Para el resto de casos, se presentan curvas en las que se relaciona el número de líneas de transmisión y de distribución con la resistencia de puesta a tierra de la subestación bajo medición. A continuación, se desarrolla el procedimiento utilizado para determinar Sf para la subestación 2.

En la figura C2 se muestra el circuito equivalente del sistema, se desprecia la impedancia del conductor que interconecta la subestación 2 con la subestación aledaña

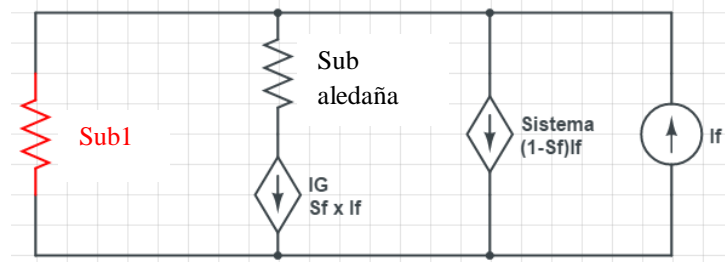


Figura C2: Modelo equivalente

Se obtiene el valor de Sf para la Subestación aledaña desconectando la Subestación 2 a modo de obtener la impedancia equivalente que vería la Subestación 2. Es importante recalcar que esto aplica únicamente debido a la conexión existente al momento que se tomaron las mediciones.

Para el caso de la subestación aledaña, el valor de Sf se obtiene por interpolación a partir de la figura C13 IEEE80 – 2013 (figura C3).

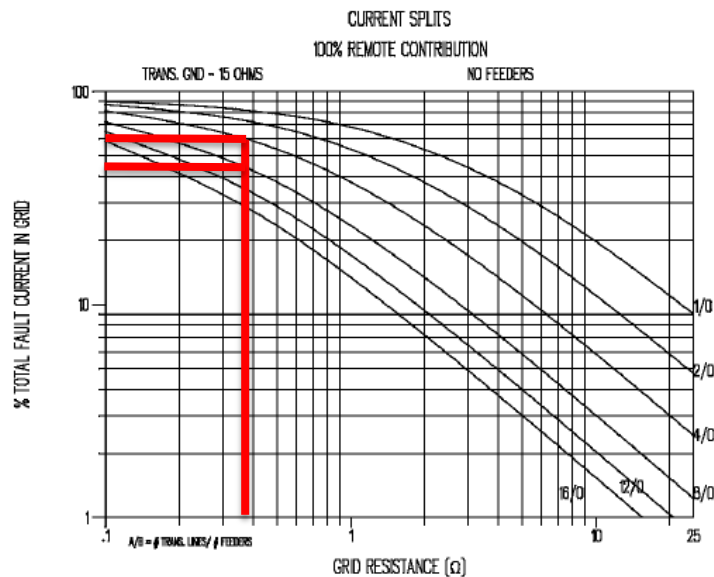


Figura C3: Estimación de Sf para una contribución de la corriente de falla 100% remota

$$S_{f\ opico} = \frac{0.42 + 0.6}{2} = 0.51$$

A partir de este dato es posible estimar el valor de la impedancia equivalente vista por la resistencia de puesta a tierra de la subestación 2.

$$R_T = 0.185\Omega$$

Por lo que el nuevo valor de Sf para un valor de resistencia de puesta a tierra de 0.14Ω tomado de la aplicación del método de la pendiente es:

$$S_{f\ San\ Matías} = \frac{0.185}{0.14 + 0.185} = 0.57$$

El otro dato requerido para llevar a cabo la corrección por este método es el radio de un electrodo hemisférico que tendría la misma resistencia de puesta a tierra que la red bajo medición. Para lo cual se utilizaron las ecuaciones de Sverak recopiladas en IEEE 80-2013, e igualándolas con la ecuación de resistencia de puesta a tierra de un electrodo hemisférico:

$$R_{Hemiesfera} = \frac{\rho}{2\pi r}$$

Para el caso de la subestación 2, se utilizaron los siguientes datos:

- Área=7840m²
- Número de varillas=198
- Longitud de varillas=3m
- Calibre del conductor de la cuadrícula: 4/0
- Longitud de conductor enterrado=1484m

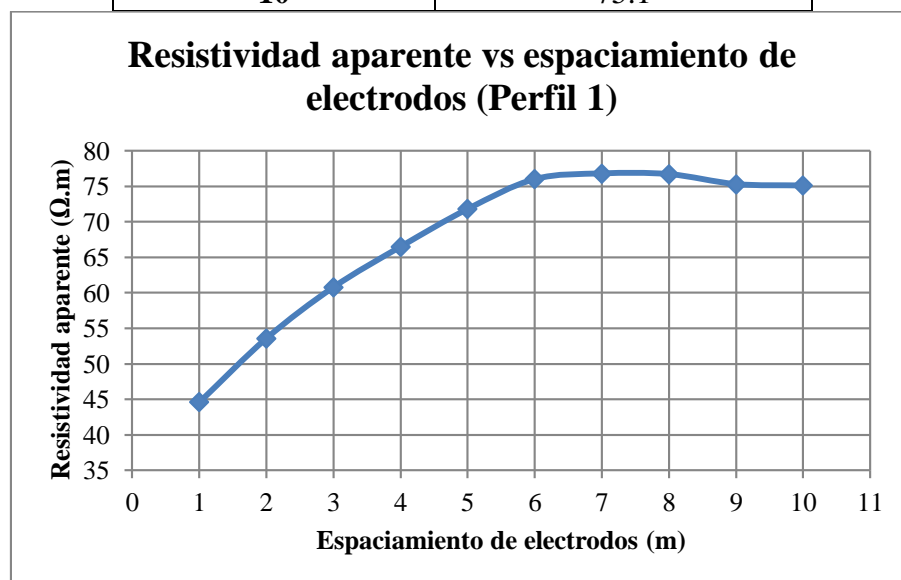
Al igualar ambas ecuaciones se elimina la resistividad, debido a que el electrodo hemisférico equivalente es independiente de la resistividad en la que se encuentre el electrodo. Finalmente se obtiene un radio de 28.8m.

ANEXO D: EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO GRÁFICO DE SUNDE PARA MODELADO DE SUELO DE DOS CAPAS

Se tomará como ejemplo el caso del perfil 1 de la subestación 1. Los pasos a seguir fueron explicados en el apartado 3.3.1.4.

1. Dibujar la gráfica de resistividad aparente vs espaciamento de electrodos de prueba con los datos obtenidos de las mediciones.

PERFIL 1	
Espaciamento [m]	ρ [Ω .m]
1	44.6
2	53.6
3	60.8
4	66.5
5	71.8
6	76.0
7	76.8
8	76.7
9	75.3
10	75.1



- Estimar, de la gráfica del paso 1, la resistividad de la capa superficial y la resistividad de la capa más profunda, ρ_1 y ρ_2 respectivamente.

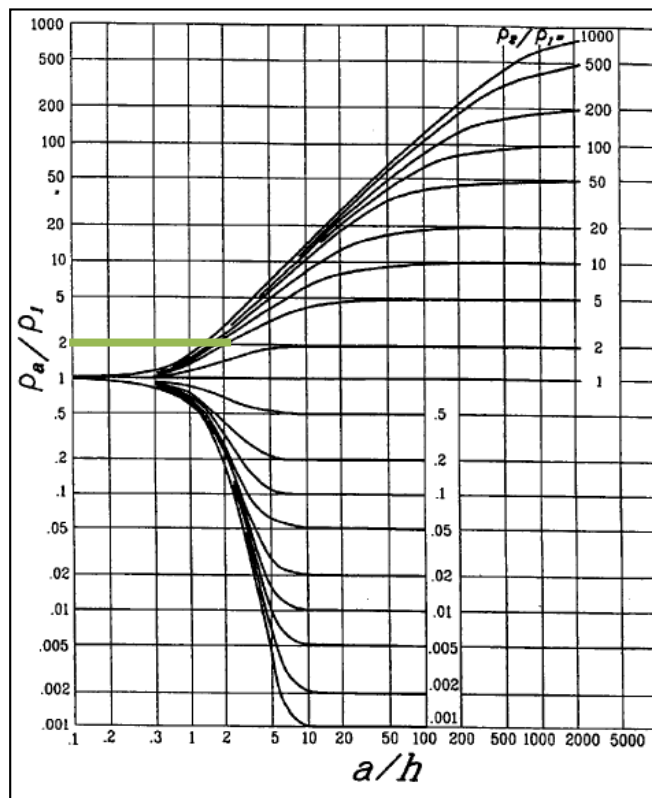
Visualmente se puede estimar que: $\rho_1 = 44\Omega.m$ y $\rho_2 = 80\Omega.m$

- Determinar $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ y seleccionar la curva de la gráfica de Sunde (figura 26), si no existe una curva exacta, se debe interpolar y dibujar una nueva curva o tomar la curva más cercana.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{80}{44} = 1.82$$

Ya que no hay una curva de 1.82 se aproxima a la curva de $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 2$

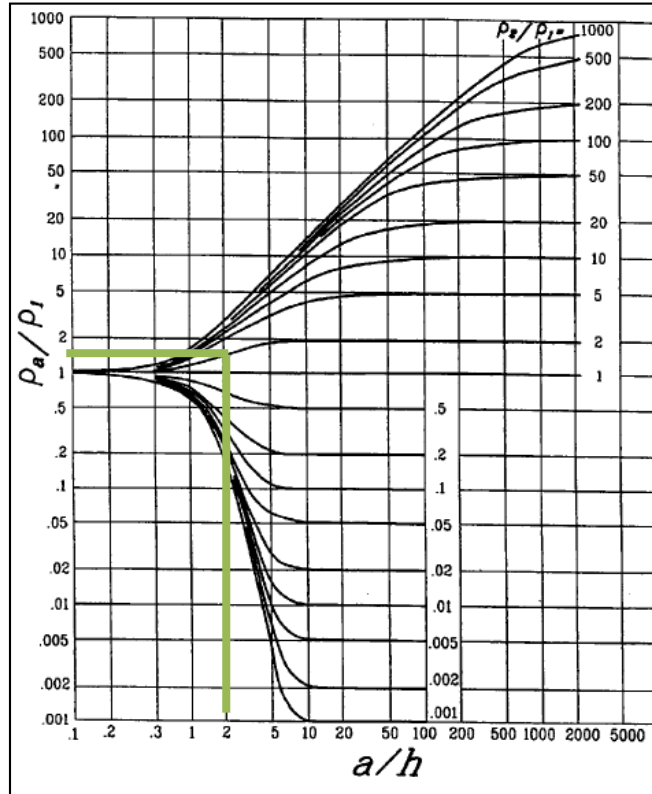
- Seleccionar el valor en el eje Y de $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ dentro de la región de la pendiente de la curva $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ encontrada en el paso 3.



$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1.5$$

- Leer el correspondiente valor de $\frac{a}{h}$ en el eje X

Utilizando $\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1.5$



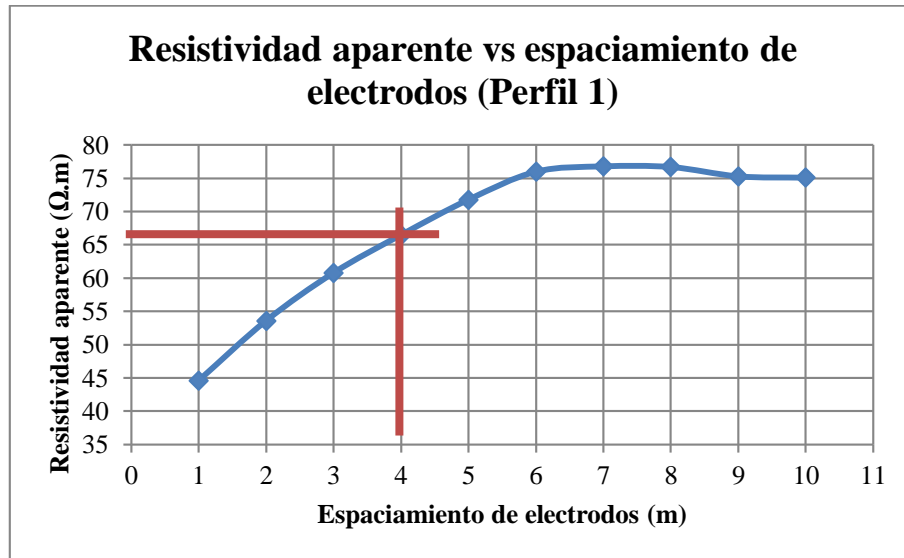
$$\frac{a}{h} = 2$$

6. Calcular ρ_a , despejando de $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ del paso 4.

$$\rho_a = 1.5\rho_1 = 1.5(44) = 66 \Omega.m$$

7. Leer el espaciamiento de electrodos de prueba a de la gráfica del paso 1, con la resistividad aparente ρ_a encontrada en el paso 6.

Utilizando $\rho_a = 66 \Omega.m$



$$a = 4 \text{ m}$$

8. Calcular la profundidad de la capa superficial h con resistividad ρ_1 despejando de la ecuación $\frac{a}{h}$ del paso 5, conociendo a obtenido en el paso 7.

$$h = \frac{a}{2} = \frac{4}{2} = 2 \text{ m}$$

Los datos obtenidos para este caso son los siguientes:

Resistividad de la capa superficial $\rho_1 = 44 \Omega \cdot m$

Resistividad de la capa más profunda $\rho_2 = 80 \Omega \cdot m$

Profundidad de la capa superficial $h = 2 \text{ m}$

ANEXO E: EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE BOX COX PARA MODELADO DE SUELO HOMOGÉNEO

Se tomará como ejemplo el caso del predio baldío de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador con las mediciones obtenidas por el método de cuatro puntos arreglo Wenner. Los pasos a seguir fueron explicados en el apartado 3.3.1.4

8. Elaborar una tabla, en una columna se tabulan los datos de resistividad aparente medida ρ_a
9. En otra columna se colocan los logaritmos naturales de las resistividades aparentes $\text{Ln}(\rho_a)$, ejemplo $\text{Ln}(102.8) = 4.63278535$ y así sucesivamente
10. Se encuentra el promedio de los valores obtenidos en el paso 2 que será $\text{Ln}(\rho)_{\text{PROM}}$.

Espaciamiento (m)	ρ_a (Ω .m)	$\text{Ln}(\rho_a)$
1	102.8	4.63278535
2	95.5	4.55912625
3	93.1	4.53367418
4	95.2	4.55597994
5	97.9	4.58394655
6	99	4.59511985
7	100.5	4.61015773
8	99.4	4.59915211
9	98.1	4.58598737
$\text{Ln}(\rho)_{\text{PROM}}$		4.583992148

11. En otra columna se coloca el resultado de la siguiente operación $(\text{Ln}(\rho_i) - \text{Ln}(\rho)_{\text{prom}})^2$ para cada medición, ejemplo $(4.63278535 - 4.583992148)^2 = 0.002380777$

Espaciamiento (m)	ρ_a ($\Omega \cdot m$)	$\text{Ln}(\rho_a)$	$\frac{(\text{Ln}(\rho_a) - \text{Ln}(\rho_a)_{\text{PROM}})^2}{\text{Ln}(\rho_a)_{\text{PROM}}^2}$
1	102.8	4.63278535	0.002380777
2	95.5	4.55912625	0.000618313
3	93.1	4.53367418	0.002531897
4	95.2	4.55597994	0.000784684
5	97.9	4.58394655	2.07924E-09
6	99	4.59511985	0.000123826
7	100.5	4.61015773	0.000684638
8	99.4	4.59915211	0.000229825
9	98.1	4.58598737	3.9809E-06
$\text{Ln}(\rho)_{\text{PROM}}$		4.583992148	

12. Se calcula la desviación estándar como:

$$S = \sqrt{\frac{(\text{Ln}(\rho_1) - \text{Ln}(\rho)_{\text{prom}})^2 + (\text{Ln}(\rho_2) - \text{Ln}(\rho)_{\text{prom}})^2 + \dots + (\text{Ln}(\rho_i) - \text{Ln}(\rho)_{\text{prom}})^2}{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0.002380777 + 0.000618313 + \dots + 3.9809 \times 10^{-6}}{9}} = 0.009530938$$

13. De la distribución normal se toma Z para 70%, del cual se obtiene como resultado 0.524411

14. Se utiliza la siguiente ecuación para encontrar la resistividad con 70% de probabilidad de ser la real:

$$\rho = e^{(S \cdot Z) + \text{Ln}(\rho)_{\text{prom}}} [\Omega \cdot m]$$

$$\rho = e^{(0.009530938 \cdot 0.524411) + 4.583992148} = 98.40 [\Omega \cdot m]$$

Se utilizan varios decimales ya que las cantidades que involucran logaritmos naturales son pequeñas en comparación de los demás datos y podría perderse precisión si se acortan los decimales

ANEXO F. MODELADO DE SUELO DE DOS CAPAS POR EL MÉTODO ANALÍTICO DE LA PENDIENTE MÁS INCLINADA.

Se escribió un código para el programa octave que desarrolla el flujograma de la figura 27. A continuación se presenta dicho código fuente.

```

%Reservada
function [ro1,ro2,h]=modelado(mediciones,t=500)

%inicializando variables
n=length(mediciones);
ro1=mediciones(1,2);
ro2=mediciones(n,2);
h=mediciones(ceil(n/2),1);
a=1;
iteraciones=0;
while a>0.0001&&iteraciones<t

    %coeficiente de reflectividad para la iteración actual
    k=(ro2-ro1)/(ro2+ro1);

    %derivada parcial fi respecto a ro1
    acumulador=0;
    for i=1:n
        a=mediciones(i,1);

        ro_0=mediciones(i,2);

        acumulador=acumulador+((ro_0-
rho(a,ro1,h,k))*der_ro_ro1(a,k,h))/((ro_0)**2);
    endfor
    der_fi_ro1=-2*acumulador;

    %derivada parcial fi respecto a ro2
    acumulador=0;
    for i=1:n
        a=mediciones(i,1);

        ro_0=mediciones(i,2);

        acumulador=acumulador+((ro_0-
rho(a,ro1,h,k))*der_ro_ro2(a,k,h))/((ro_0)**2);
    endfor
    der_fi_ro2=-2*acumulador;

    %derivada parcial fi respecto a h
    acumulador=0;
    for i=1:n
        a=mediciones(i,1);

        ro_0=mediciones(i,2);

        acumulador=acumulador+((ro_0-
rho(a,ro1,h,k))*der_ro_h(a,k,h,ro1))/((ro_0)**2);
    endfor
    der_fi_h=-2*acumulador;

    delta_ro1=-0.005*abs(ro1)*sign(der_fi_ro1);
endwhile
endfunction

```

```

        delta_ro2=-
0.005*abs(ro2)*sign(der_fi_ro2
);
        delta_h=-
0.005*abs(h)*sign(der_fi_h);

        %nuevos valores:
        ro1=ro1+delta_ro1;
        ro2=ro2+delta_ro2;
        h=h+delta_h;

        %Cálculo de error:
        delta_fi=der_fi_ro1*delta
_ro1+der_fi_ro2*delta_ro2+der_
fi_h*delta_h;
        a=abs(delta_fi);
        iteraciones+=1;
endwhile
iteraciones
        for l=1:n

                mediciones(l,3)=rho(medic
iones(l,1),ro1,h,k);
        endfor

%texto=["Sep.", "Ra", "Rcalc", "E
rror"];
        mediciones(1:n,4)=100.*(m
ediciones(1:n,2).-
mediciones(1:n,3))./mediciones
(1:n,3);

%Calculo error RMS
rms=0;
for t=1:n
        rms=rms+(mediciones(t,4)*
*2);
endfor
Error_RMS=sqrt(rms/n)

%%Gráficas

```

```

plot(mediciones(1:n,1),medicio
nes(1:n,2),"Resistividad
Medida;",mediciones(1:n,1),med
iciones(1:n,3),"Resistividad
calculada;");
j=title('Resistividad medida
vs calculada');
%set(j,'fontsize',20);

endfunction

%Cálculo de resistividad a
espaciamiento "a"
function
res=rho(a,rho1,h,k,q=20)
        acumulador=0;
        for i=1:q
                acumulador=acumulador+(k*
*i/sqrt(1+((2*i*h)/a)**2))-
(k**i/sqrt(4+((2*i*h/a)**2)))
);
        endfor
        res=rho1*(1+4*acumulador)
;
endfunction

%derivada parcial rho respecto
a rho1 (a=cte)
function
res=der_ro_ro1(a,k,h,q=20)
        acumulador=0;
        for i=1:q
                acumulador=acumulador+((1
-(i*(1-
k**2)/(2*k)))*((k**i/(sqrt(1+(
2*i*h/a)**2)))-
(k**i/(sqrt(4+(2*i*h/a)**2))))
);
        endfor
        res=acumulador*4+1;

```

```

endfunction

%derivada parcial rho respecto
a rho2 (a=cte)
function
res=der_ro_ro2(a,k,h,q=20)
    acumulador=0;
    for i=1:q
        acumulador=acumulador+((2
*i/k)*((1-
k)**2)*(((k)**i)/(sqrt(1+(2*i
*h/a)**2))))-
(((k)**i)/(sqrt(4+(2*i*h/a)**2
))));
    endfor
    res=acumulador;
endfunction

%derivada parcial rho respecto
a h (a=cte)
function
res=der_ro_h(a,k,h,ro1,q=20)
    acumulador=0;
    for i=1:q

        acumulador=acumulador+(i*
*2)*((k**i/(sqrt((4+(2*i*h/a)*
*2)**3))))-
(k**i/(sqrt((1+(2*i*h/a)**2)**
3))));
    endfor
    res=(acumulador*16*ro1*h)
/(a**2);
endfunction

```

La sintaxis para utilizar este código es el siguiente:

```
[res1, res2, esp]=modelado(valor
es, iteraciones=500)
```

Donde:

Res1: Variables en la que se guarda el valor de la resistividad de la capa superior en $\Omega\cdot m$.

Res2: Variable en la que se guarda el valor de la resistividad de la capa inferior en $\Omega\cdot m$.

Esp: Variable en la que se guarda el valor del espesor en metros.

Valores: Es una matriz de dos columnas que contiene el espaciamiento entre electrodos en metros y los valores de resistividad aparente en $\Omega\cdot m$ medidos a través de un SEV con arreglo de electrodos Wenner. La sintaxis para declarar la matriz es la siguiente:

```
Valores=[d_1, rho_1; d_2, rho_2; ·
· · d_n, rho_n]
```

El resultado al correr el programa comprende el modelo obtenido, número de iteraciones, error RMS entre las resistividades aparentes del modelo resultante y las resistividades aparentes medidas; siendo esto un indicador de la exactitud del modelo obtenido; y una gráfica comparativa entre el perfil de resistividades medidos y teóricos.

ANEXO G: DISEÑO DE RED DE TIERRA PARA UNA TORRE ARRIOSTRADA DE MEDICIÓN DE RECURSO EÓLICO.

Se toma como base la guía R56 de Motorola (que cumple con normas IEEE, ANSI, IEC, NFPA) y recomendaciones del NEC (Pablo Díaz 2001) para la puesta a tierra de sitios de comunicaciones y sistemas de descargas contra rayos.

La figura muestra el modelo a utilizar en el diseño, el cual se utilizará para la torre arriestrada que será utilizada como estación meteorológica.

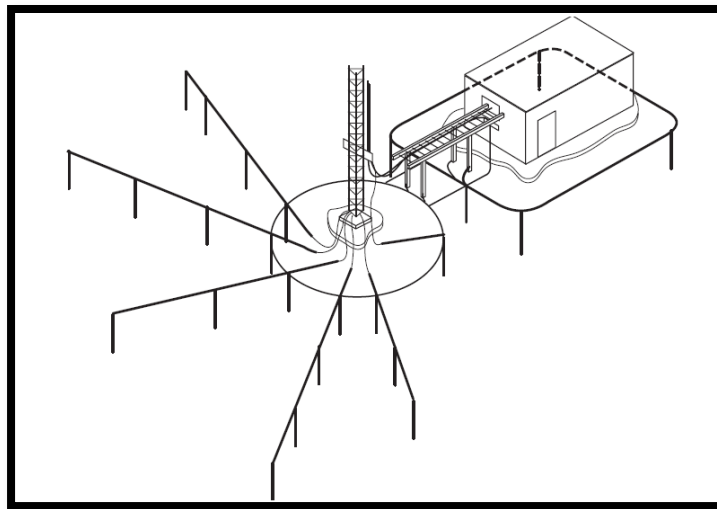


Figura 1. Modelo utilizado para la puesta a tierra de una torre arriestrada.

El diseño consta de:

- a) Un anillo de tierra con sus electrodos de 5/8" y 10'
- b) Tres radiales de cable #2 en empezando en la dirección Norte y dos radiales auxiliares de cable #2, todos espaciados 72°. Sin electrodos por las características del suelo.
- c) Un pararrayos **NIMBUS NIVEL 3** con su bajante.
- d) Aterrizaje de los 6 tensores de la torre mediante conectores bimetálicos. Se debe garantizar conexión eléctrica de los tensores con la torre al sujetarlos a esta.
- e) Una barra principal de tierra. 3 barras en la torre para conexión de equipos.
- f) Todas las partes metálicas y equipos serán aterrizados para garantizar la equipotencialidad de todo el sistema.

Las especificaciones de conexión se adjuntan en los planos eléctricos.

Aspectos que se han considerado:

- La resistencia a tierra para torres no debe sobrepasar los 10 ohms. La industria recomienda que sea menor de 5 ohms (R56 Motorola)
- El pararrayos debe colocarse a 5 metros arriba del equipo de medición que desea protegerse y por lo menos a 10 pulgadas por encima de la torre. Si excede 24 pulgadas deberá sujetarse en un punto no menor a la mitad de la varilla.
- Para estructuras mayores de 45m se recomienda colocar pararrayos a alturas intermedias. Para el caso, puede ser a 42m y el otro sobre la punta de la torre.
- El 80% de la energía baja por la torre. Los conductores bajantes en concreto reforzado o sobre la superficie de la estructura metálica del edificio deben conectarse en la parte superior y en la inferior de la estructura (NFPA 3-9.13). Esta es la razón por la cual se exige a las torres de comunicación, se una a la torre en la parte superior e inferior. Pueden ser mediante conectores de alta presión, para no debilitar la torre o dar lugar a corrosión con la soldadura exotérmica.
- El cable bajante y otros cables no deben poseer curvaturas menores a 90° y sus radio de curvatura debe ser por lo menos de 8 pulgadas (203mm).
- Todos los tensores de las antenas deben unirse al sistema de puesta a tierra mediante conectores bimetálicos.
- Todas las conexiones que se realizan bajo tierra asociadas al sistema de tierra deben soldarse con métodos exotérmicos.
- En torres que superan los 61m de altura, la coraza de los cables coaxiales de los instrumentos deben aterrizar en una barra de tierra de justo debajo de su instrumento y antes de llegar a la canaleta que los dirige al gabinete con un kit de puesta a tierra por cable.

Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.

Resistividad del terreno

Después de realizada la tomografía eléctrica resistiva, a lo largo de la línea del tensor norte, se debe elegir un valor de resistividad que se adecue mejor al diseño de la red de tierra.

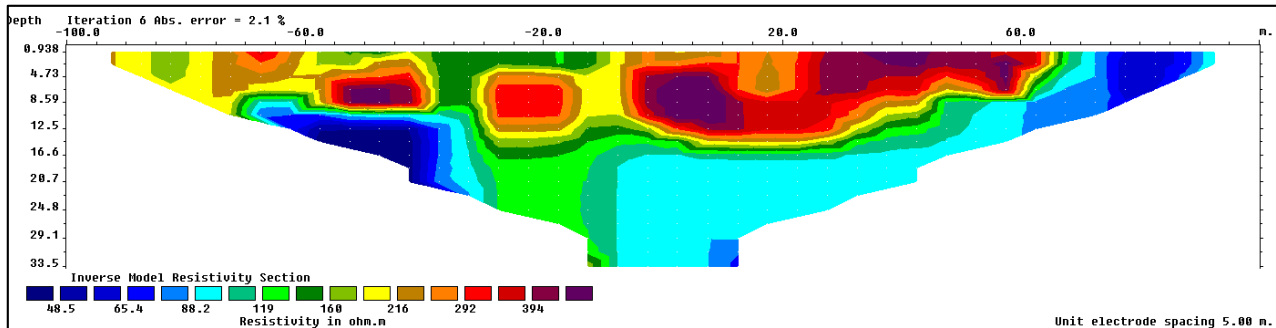


Figura 2. Tomografía línea Norte

Debido a que la tomografía presenta un mapa del suelo con todos los cambios de resistividad, como se muestra en el figura 2. Se toma la siguiente recomendación de la IEEE como criterio para elegir el valor de diseño:

$$\rho_d = \frac{\rho_{(max)} + \rho_{a(min)}}{2} [\Omega. m]$$

Esta ecuación hace el promedio de la máxima y mínima resistividad obtenida en la zona del centro de la torre hasta aproximadamente 20 metros a la redonda y a 4.5 metros de profundidad aprox., esto es debido a que ahí será instalada la red de tierra.

De las gráficas se obtienen estos valores, quedando:

$$\rho_d = \frac{350 + 140}{2} [\Omega. m]$$

$$\rho_d \cong 245 [\Omega. m]$$

Y este es el valor de resistividad con el cual se calculará la Resistencia de puesta a tierra.

Se calcula la resistencia de un solo electrodo y luego la de estos juntos con la del anillo y la de los radiales más la de los electrodos del equipo de electrónica sensible, según fórmulas de la IEEE 142 tabla 4.5 y apéndice B de la Guía R56 de Motorola. Luego se calcula la resistencia en paralelo de ambos valores obteniéndose el valor de diseño de la red de tierra.

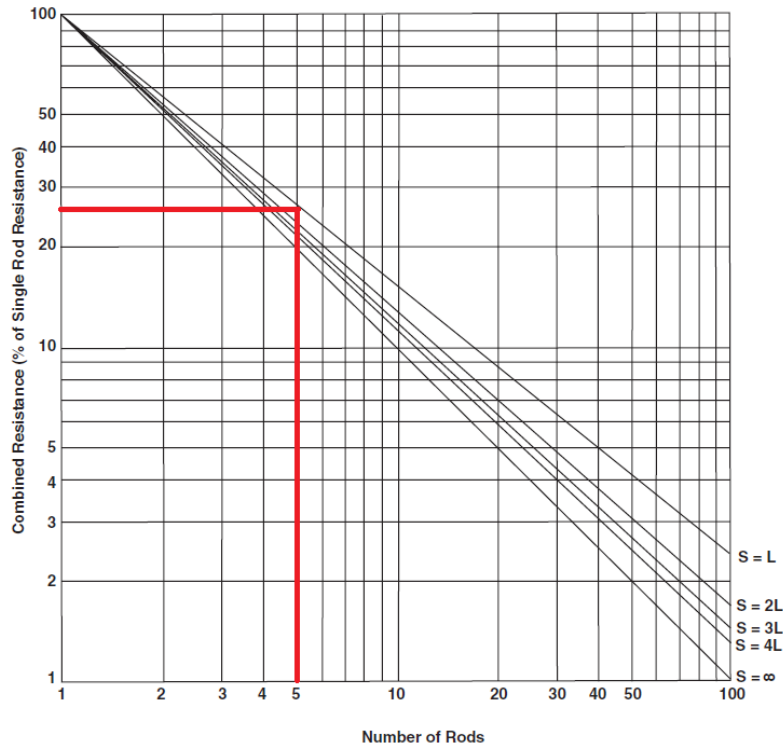
La resistencia de un solo electrodo de longitud “L” y radio “a” se calcula mediante la fórmula:
(L=3m, a=0.0079375m, $\rho = 245\Omega m$)

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

$$R = 82.16 \Omega$$

Para calcular la resistencia combinada de los electrodos con la del anillo de tierra se analiza de la siguiente manera:

1. Se elige el diámetro del anillo, para este caso, se ha tomado 6 metros de diámetro para dejarlo cerca de la zona perimetral de la torre y para soldarlo a la fundación de los muros.
2. Se hace la distribución de electrodos dentro del anillo, tomando en cuenta que las distancias entre ellos se toman en línea recta y deben cumplir con las normas de distancia mínima entre electrodos. Para este caso se eligen 5 electrodos y su distancia aproximada queda a 1.2L (3.5 m). Nota: El número de electrodos puede ir cambiando si la resistencia no cumple con el valor esperado. Es un proceso iterativo.
3. Con la gráfica de Motorola, se eligen en el eje x el número de electrodos que se tienen en el anillo, se intercepta con la línea que representa la separación y se lee el valor del eje de las y que representa la Resistencia Combinada como un porcentaje de un solo electrodo. Para este caso son 5 electrodos y se puede interpolar entre la línea de L y 2L, como se muestra en la gráfica.
4. Se lee el valor de la Resistencia Combinada, que en este caso es 27% que representa un 0.27 y se multiplica por la resistencia obtenida de un solo electrodo.



$$R_{anillo} = R_{electrodo} * R_{comb}$$

$$R_{anillo} = 82.16 * 0.27$$

$$R_{anillo} = 22.18 \Omega$$

5. Se calcula el valor de resistencia de cada radial con las ecuaciones de la norma IEEE 142. Los radiales están configurados como sigue:
- a. 3 radiales de 12 metros de longitud.
 - b. Dos radiales auxiliares de 8 metros. Se recomienda que existan radiales de distinto tamaño para evitar resonancia al momento del impacto de un rayo.
 - c. 5 barras de 3 metros al final de cada radial
 - d. Un arreglo de electrodos al que está conectado el equipo sensible de la torre. Dos electrodos de 3 metros distanciados a 6 metros entre ellos.

Con la siguiente ecuación se calcula la resistencia de los radiales:

$$R_{radial} = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln\left(\frac{4L}{a}\right) + \ln\left(\frac{4L}{s}\right) - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} \right)$$

La ecuación específica que está expresada para una longitud $2L=12\text{m}$ y una profundidad $s/2=0.8\text{m}$. Con $L = 6\text{m}$, $a = 3.27\text{mm}$, $\rho = 245\Omega\text{m}$, $s = 1.6\text{m}$, queda para los radiales más largos:

$$R_{radial} = 31.64 \Omega$$

Con $L = 4\text{m}$, $a = 3.27\text{mm}$, $\rho = 245\Omega\text{m}$, $s = 1.6\text{m}$, queda para los radiales auxiliares:

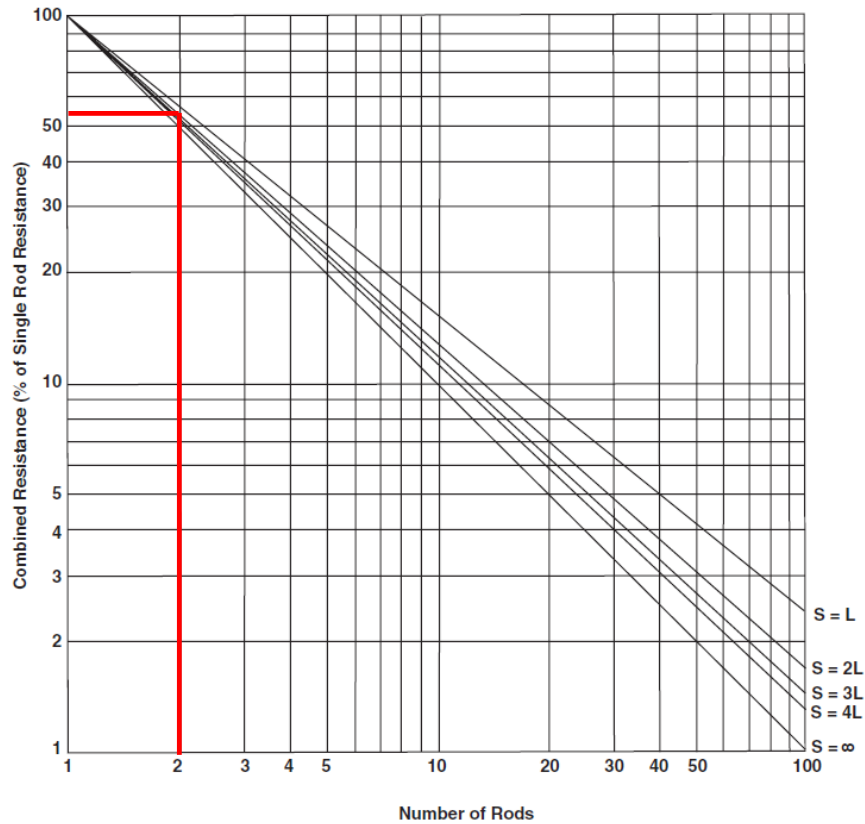
$$R_{radial} = 43.81 \Omega$$

La resistencia de los 5 electrodos en el extremo de cada radial será de 82.16Ω , valor que ya se había calculado anteriormente para cada electrodo. La resistencia en conjunto de estas barras se calcula con el paralelo de las mismas de la siguiente manera

$$R_{electrodos\ de\ radiales} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{radial1}}\right) + \left(\frac{1}{R_{radial2}}\right) + \left(\frac{1}{R_{radial3}}\right) + \left(\frac{1}{R_{radial4}}\right) + \left(\frac{1}{R_{radial5}}\right)}$$

$$R_{electrodos\ de\ radiales} = 16.43 \Omega$$

La resistencia combinada de los dos electrodos conectados al equipo de electrónica sensible de la torre se lee de la gráfica de Motorola con un espaciamiento de $2L$ que se obtiene de un 55% de la siguiente manera:



$$R_{electrodos\ datalogger} = R_{electrodos} * R_{comb}$$

$$R_{electrodos\ datalogger} = 82.16\Omega * 0.55 = 45.19\Omega$$

Obtenidos los valores de las gráficas y ecuaciones quedan los valores de la tabla número 1 y donde también está calculada la resistencia total del sistema.

ELEMENTO	RESISTENCIA[Ω]
Radial 0°	31.64
Radial 120°	31.64
Radial 240°	31.64
Radial Auxiliar 1	43.81
Radial Auxiliar 2	43.81
Electrodos de radiales	16.43
Radiales en conjunto	7.12
Anillo	22.18
Sistema Datalogger	45.19
RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA	3.72

Tabla 1. Descripción de las áreas de la barra principal de puesta a tierra.

La resistencia total no incluye la influencia incidental de cercas, tanques de combustible enterrados, u otros objetos no incluidos en estos cálculos. La influencia de conectar el sistema de tierra a la fundación de los muros no es una influencia considerable a la hora de bajar la resistencia del sistema. No obstante, se recomienda hacer estas soldaduras en caso de que el muro perimetral tenga estas estructuras.

Conexión a la barra principal de tierra.

La manera de conectar la barra principal de tierra también está normada. En la figura se muestran las áreas en las que se divide este elemento del sistema en las cuales se unen los diferentes elementos de la red de tierra dependiendo de su origen.

P	A	N	I
Surge Producers	Surge Absorbers	Non IGZ	Isolated Ground Zones (IGZ)
<ul style="list-style-type: none"> • RF SPD • AC Equip. • Tel. SPD • Cable Shields • ESD 	<ul style="list-style-type: none"> • Building Steel • AC NG Bond • Water Line • Metallic Piping • Concrete Encased Electrode • Ground Rings 	<ul style="list-style-type: none"> • +48VDC GND. • -24VDC GND. • Cable Tray Sys. • Equip. Frame • Battery Racks • Anciliary Equip. 	<ul style="list-style-type: none"> • Logic Ground. • IG Zones

Figura 3. Descripción de las áreas de la barra principal de puesta a tierra.

En la figura se representa una barra de tierra. Cada una le dará lugar a los cables de puesta a tierra según de donde procedan. Por ejemplo, el área “A” está designada para que los electrodos de puesta a tierra se conecten. En el caso de la torre, el anillo de tierra y los radiales. También las demás áreas presentan su descripción.

La manera de conectar los elementos de puesta a tierra en la torre se describe a detalle en los planos eléctricos.

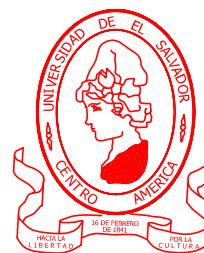
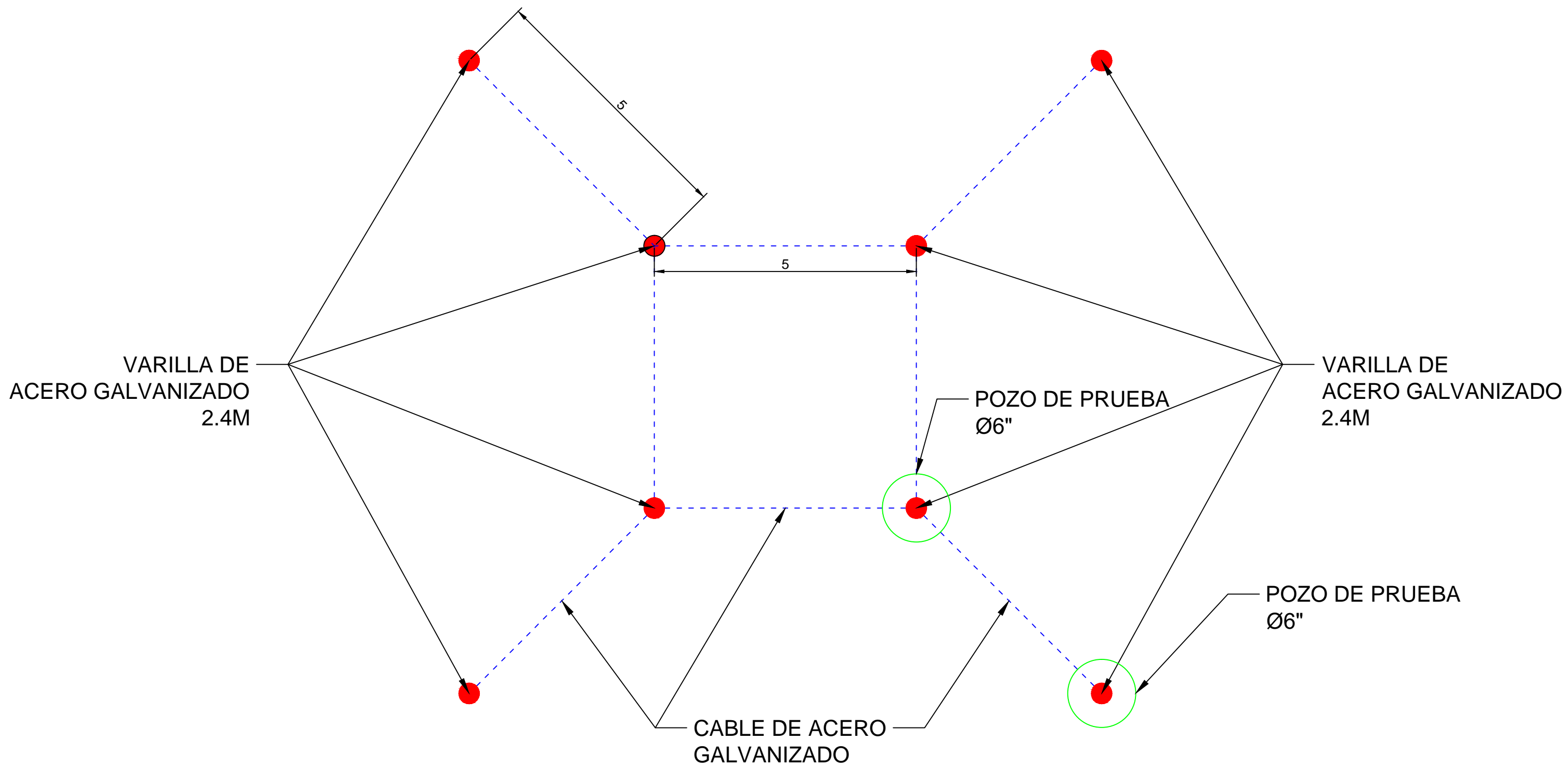
Cableado.

Los tramos a cubrir con el sistema de puesta a tierra y el calibre de los mismos se presentan en la siguiente tabla, con referencia a la guía R56 de Motorola.

#	Material	Aplicación	Página Ref. Motorola
1/0	Cobre desnudo	Bajada de pararrayo	
2	Cobre desnudo	Anillo	422
2	Cobre desnudo	Radiales	425
2	Cobre desnudo	Unión a barra equipotencial	430
6	THHN	Tierra de gabinete de control	429
10	THHN	Tierra de gab. de alimentación	429
2	Cobre desnudo	Tierra de puerta	429
2	Cobre desnudo	Tierra de barra de torre (TGBB)	433
6	THHN	Tierra de escalerilla a barra	472
2	Cobre desnudo	Tierra de retenidas a electrodo	455
2	Cobre desnudo	Tierra de torre a anillo	425

CANTIDAD	UNIDAD	MATERIAL	USO
1	u	Pararrayos Nimbus CPT-3. Nivel 3, radio 97m	Colector de descargas eléctricas
1	u	Contador de rayos	Contador de rayos en torre
130	m	Cable #2 desnudo de cobre	Anillo, radiales, a barra equipotencial, tensores a electrodos, torre a anillo
98	m	Cable #1/0 desnudo de cobre	Bajante de pararrayo
11	m	Cable #6 de cobre	Tierra de gabinete de control,escalera
5	m	Alambre #10 THHN	Tierra gabinete de alimentación
19	u	Barras cooperweld 10' 5/8" certificación UL	Electrodos de puesta a tierra
35	u	Conectores bimetálicos (chicles) YP2U3	Tierra de los tensores
4	u	Bornera de tierra pequeña (barra equipotencial de tierra)	Conexión de kit de tierra de equipos de medición en la torre
1	u	Bornera de tierra (barra equipotencial de tierra)	Unión equipotencial y TGBB
7	u	Abrazaderas de presión cable de paso #2	Unión Torre-cable a anillo, TGBB a torre
2	u	Abrazaderas de presión cable de paso #1/0	Unión Torre-Bajante pararrayos
12	u	Abrazaderas metálicas ajustables para poste (Flejes metálicos con sellos)	Sujeción de cable en torre
16	u	Kit de tierra	Conexión a tierra de cables coaxiales en la torre
4	cartucho de 8	Pólvora	soldadura
14	u	Terminales de ojo cable #2	conexión a barra
2	u	Terminales de ojo cable #6	conexión a barra
4	u	Terminales de ojo alambre #10	conexión a barra
6	u	Anclas de expansión	Fijar la barra

ANEXO H: PROPUESTA DE RED DE TIERRA DE PRUEBAS PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA UES.



DISEÑO RED DE PUESTA A TIERRA PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO

UBICACIÓN: PARQUEO FRENTE A ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESQUEMA DE UBICACIÓN DE ELECTRODOS Y CONDUCTORES

DISEÑO POR:
 Br. WALTER ESAÚ PÉREZ LOARCA
 Br. CHRISTIAN JAVIER SERRANO BARRIOS
 Br. OSCAR ORLANDO SURIO GUEVARA

ASESOR:
 ING. NUMA JIMENEZ

UES	AGO-2015	1/1
-----	----------	-----

ANEXO I: DATOS DE EQUIPOS USADOS EN LAS MEDICIONES

GROUND RESISTANCE TESTERS

Multi-Function

Special product features

Model 6471

Test ground resistance without the need of auxiliary rods!



AC Current Probes
Model SR182



The Model 6471 provides a fast and easy way to measure the value of the earth/ground using the 2 Clamp method (no auxiliary rods needed).

SPECIFICATIONS



cover closed

MODEL	6471
ELECTRICAL	
2 Clamp Measurement	
Range	0.10 to 500Ω
Resolution	0.01 to 1Ω
Measurement Frequency	Auto: 1611Hz Manual: 128Hz-1367Hz-1611Hz-1758Hz
3-Point Measurement	
Range (Auto-Ranging)	0.09Ω to 99.9kΩ
Resolution	0.01Ω to 100Ω
Test Voltage	Nominal 16 or 32Vrms user selectable
Resistance Measurement Frequency	41 to 513Hz automatic or user selectable
Test Current	Up to 250mA
Accuracy	±2% of Reading + 1ct @ 128Hz
Soil Resistivity 4-Point Measurement	
Test Method	Wenner or Schlumberger selectable with automatic calculation in Ω-meters
Range (Auto-Ranging)	0.01 to 99.99kΩ; ρ max: 999kΩm
Resolution	0.001 to 10Ω
Test Voltage	16 or 32V user selectable
Frequency	From 41 to 128Hz selectable
External Voltage Measurement	
Range (Auto-Ranging)	0.1 to 65.0V _{ac/dc} – DC to 440Hz
Accuracy	±2% of Reading + 1ct
Resistance Measurement (Bond Testing)	
Measurement Type	2-Pole (with lead resistance compensation) or 4-Pole (Kelvin sensing) user selectable
Range (Auto-Ranging)	2-Pole 0.02 to 99.99kΩ; 4-Pole 0.02 to 99.99kΩ
Accuracy	±2% of Reading + 2cts
Test Voltage	16V _{dc} (+, - or auto polarity)
Test Current	Up to 250mA max
Data Storage	
Memory Capacity	512 test results (64KB)
Communication	Optically Isolated USB
Power Source	
Recharging Source	9.6V rechargeable battery pack (included) 110/220V, 50/60Hz external charger with 18V _{dc} , 1.9A output



TEST KITS

300 ft Kit: Catalog #2135.50

Includes meter, carrying bag for meter, carrying bag for kit, two 300 ft color-coded leads on spools (red/blue), two 5 ft color-coded leads (red/blue), two 100 ft color-coded leads (hand-tied, green/black), two SR182 current probes, rechargeable NiMH batteries, optical USB cable, power adapter 110/240V with power cord 115V US, four T-shaped auxiliary ground electrodes, set of five spaded lugs, one 100 ft tape measure, and USB stick supplied with DataView® software, ground tester workbook and user manual.

ACCESSORIES

► **MN82 current probe (2mA to 10Arms)**
Catalog #2135.71 (optional)



► **Reel Caddy**
Catalog #2135.85 (optional)
Set of two, for use with ground kit spools

PRODUCT INCLUDES

► **SR182 current probe (0.5mA to 40Arms)**
Catalog #2135.72



Specification

MEGGER DET2/2

Earth Resistance Ranges:

0,010 Ω to 19,99 k Ω (Auto-ranging) 1 m Ω resolution

Accuracy (23°C \pm 2°C):

\pm 0,5% of reading \pm 2 digits. Service error \pm 5% of reading \pm 2 digits \pm 10 m Ω (meets VDE service error over 50 m Ω)

Test Frequency:

105 Hz to 160 Hz reversing d.c. (50 Hz environments default to 128 Hz, 60 Hz environments default to 150 Hz). Set in steps of 0,5 Hz

Test Current:

50 mA max. (selectable high and low levels)

Max Output Voltage:

< 50 V r.m.s.

Interference:

Typically 40 V pk to pk (50 Hz, 60 Hz, sinusoidal nature)

Max. Current spike

(Loop) Resistance:

Range (R_E)	High current (R_p)	Low current (R_L)
0,010 Ω - 0,499 Ω	5 k Ω	1 k Ω
0,500 Ω - 1,999 Ω	5 k Ω	3 k Ω
2,000 Ω - 19,99 Ω	10 k Ω	5 k Ω
20,000 Ω - 199,9 Ω	50 k Ω	20 k Ω
200, 0 Ω - upwards	50 k Ω	50 k Ω

Max. Potential Spike Resistance:

Range (R_E)	High current (R_p)		Low current (R_p)	
	(R_{p1})	(R_{p2})	(R_{p1})	(R_{p2})
0,010 Ω - 0,499 Ω	1 k Ω	10 k Ω	1 k Ω	10 k Ω
0,500 Ω - 1,999 Ω	1 k Ω	20 k Ω	1 k Ω	10 k Ω
2,000 Ω - 19,99 Ω	1 k Ω	20 k Ω	1 k Ω	10 k Ω
20,000 Ω - 199,9 Ω	200 x R_E	20 k Ω	200 x R_E	20 k Ω
200, 0 Ω - upwards	50 k Ω total		50 k Ω total.	

Depending on the selected function, the parameters can be shown or changed. See Table 6.

Table 6. Control Loop Parameters

Function	Parameter	Setting Range	Remarks
RE 3-pole and RE 4-pole	U ST		display only
	F ST		display only
	FM	(AFC/94/105/111/128) Hz	
	UM	48 V/20 V	selectable to 20 V with CODE
	RK	0.000 Ω ... 29.99 Ω	in position RE 3-pole only ^[1]
	RE LIMIT	0.000 Ω ... 999 kΩ	only if activated with CODE
	♪ (warning sound)	On/Off	is activated with CODE
	R ^[1]	On/Off	only if activated with CODE
RE	U ST		display only
	F ST		display only
∞	UM	48 V/20 V	selectable to 20 V with CODE
and RE 4-pole ∞	RK	0.000 Ω ... 29.99 Ω	in position RE 3-pole only ^[1]
	I (ratio)	80 ... 1200	display only
	RE LIMIT	0.000 Ω ... 999 kΩ	only if activated with CODE
	♪ (warning sound)	On / Off	only if RE LIMIT is activated with CODE
	R*	On / Off	only if activated with CODE
	U ST		display only
R~	F ST		display only
	FM	(AFC/94/105/111/128) Hz	
	RK	0.000 Ω ... 29.99 Ω	
	R ~ LIMIT	0.000 Ω ... 999 kΩ	only if activated with CODE
	♪ (warning sound)	On / Off	only if R ~ LIMIT is activated with CODE
R... 2-pole and 4-pole	U ST		display only
	F ST		display only
	RK	0.000 Ω ... 29.99 Ω	
	R LIMIT	0.000 Ω ... 9,99 kΩ	only if activated with CODE
	♪ (warning sound)	On / Off	only if R LIMIT is activated with CODE

[1] See Compensation of Earth Electrode Connecting Lead.

Specifications

Note

Fluke reserves the right to modify specifications without notice for the purpose of product improvement.

General

Temperature Range

Working Temperature -10 °C to +50 °C (+14 °F to +122 °F)

Storage Temperature -30 °C to +60 °C (-22 °F to +140 °F)

Dimensions

Outer diameter 377 mm (15 in)

Inner diameter 310 mm (12 in)

Depth 30 mm (1.25 in)

Weight

Split-core transformer 4.9 kg (11 lb)

Total (with accessories and packaging) 7.7 kg (17 lb)

Transformation Ratios 1 : 1000

1 : 800

1 : 500

1 : 300

1 : 200

Technical Data for Selective Earth Resistance Measurements

Insulation voltage 2 kV (core against secondary winding)

Max. current through split-core transformer 3 A (primary current, transformation ratio 1:1000)

Additional Error for Selective Earth Resistance Measurements

Primary current >2.5 mA $\pm 2\%$ (transformation ratio 1:1000)

Primary current <2.5 mA $\pm 5\%$ (transformation ratio 1:1000)



The DET14C is shown measuring a ground spike in a ground well.

APPLICATIONS

Typical testing applications include:

- Pole grounds
- Service entrance/meter ground electrodes
- Service panels
- Pad mount transformer grounds
- Transmission tower grounds - utility ground cables
- Telephone pedestals
- Telephone cabinets
- Lightning protection ground electrodes

FEATURES AND BENEFITS

Large elliptical clamp (head) design

- Allows testing of round cables/rods up to 37 mm diameter and ground tapes/straps up to 50 mm width
- Improved testing access

Smooth mating surfaces on the clamp head

- Easy to clean
- No interlocking teeth to damage

CATIV 600 V operation

- Highest level of user safety available
- Unit can be used safely before the distribution board

Noise filter function

- User can select the filter function to increase noise immunity
- Allows the unit to be used in higher electrical noise environments

Resistance and current limit alarm functions (visual and audible)

- Minimum and maximum limits can be set to reduce test time/improve accuracy

Intelligent data hold function (preset before testing)

- Increases instrument ease of use in difficult testing locations

Backlit display

- Allows for operation in low light environments such as cable basements

Data storage (both models)/results downloading (DET24C)

- Reduces potential for error in recording results

Time and date stamped results

- Improved data/results management
- Improved accuracy of result reporting

New ergonomic trigger design

- Easier and more comfortable to operate
- Less chance of slippage causing the head to snap shut

Ultra long battery life (24 hours continuous) with readily available batteries

- Longer operating time
- Reduced cost of ownership

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Resistance Measurements

Ground Resistance Range	Resolution	Accuracy
0.05 Ω to 0.99 Ω	0.01 Ω	± 1.5% ± 0.05 Ω
1.00 Ω to 9.99 Ω	0.01 Ω	± 1.5% ± 0.1 Ω
10.0 Ω to 99.9 Ω	0.1 Ω	± 2% ± 0.5 Ω
100.0 Ω to 199.9 Ω	0.1 Ω	± 5% ± 1 Ω
200 Ω to 400 Ω	1 Ω	± 10% ± 10 Ω
400 Ω to 600 Ω	1 Ω	± 10% ± 10 Ω
600 Ω to 1200 Ω	10 Ω	± 20%
1200 Ω to 1500 Ω	10 Ω	± 35%

- Frequency of measurement 1390 Hz.

Alarm Settings

Alarm Type	Range	Resolution
Threshold 1	1 - 1500 Ω	1 Ω
Threshold 2	0 - 1500 Ω	1 Ω

Current Measurement (RMS)

Current Range	Resolution	Accuracy
0.5 mA to 0.99 mA	0.01 mA	± 2% ± 0.05 mA
1.00 mA to 9.99 mA	0.01 mA	± 2% ± 0.05 mA
10.0 mA to 99.9 mA	0.1 mA	± 2% ± 0.1 mA
100 mA to 999 mA	1 mA	± 2% ± 1 mA
1.00 A to 9.99 A	0.01 A	± 2% ± 0.01 A
10.0 A to 35.0 A	0.1 A	± 2% ± 0.1 A

- True RMS readings up to a crest factor of 5.0 (peak current 40 A)
- Accuracy guaranteed for 50 Hz and 60 Hz
- Measurement over the range 16 Hz to 400 Hz
- Maximum current is 100 A RMS continuous and 200 A RMS for 60 s max at 50 Hz and 60 Hz

ANEXO J: FOTOGRAFÍAS DE LAS MEDICIONES REALIZADAS A LO LARGO DEL PRESENTE TRABAJO DE GRADUACIÓN

- *Resistividad de suelo aplicando método de tomografía eléctrica resistiva*



Figura J.1: Resistivímetro y accesorios para medición de resistividad de suelo

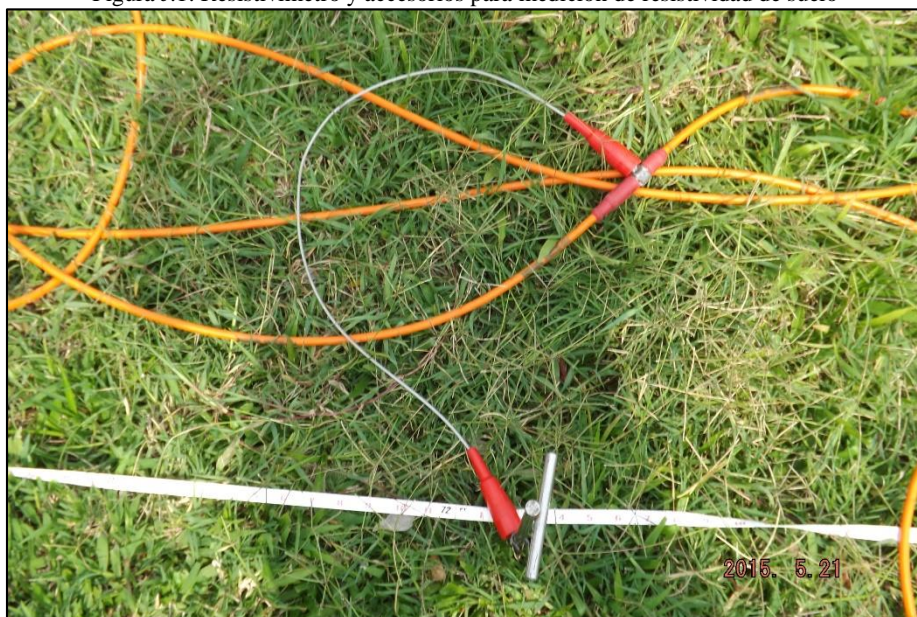


Figura J.2 Conexión de electrodo y cable



Figura J.3 Electrodo colocados listos para medición



Figura J.4 Resultado de una medición de resistividad en Candelaria de la Frontera

- *Resistividad de suelo aplicando método de cuatro puntos*



Figura J.5: Colocando electrodos según arreglo Wenner. Centro Comercial Santa Rosa



Figura J.6 Capas visibles en terreno de Centro Comercial Santa Rosa



Figura J.7 Electrodo colocados según arreglo Schlumberger



Figura J.8 Resultado de una medición de resistividad en Predio Baldío FIA-UES

- *Resistencia de puesta a tierra de subestaciones eléctricas de transmisión*



Figura J.9: Puente entre terminal C1 y P1 en telurometro

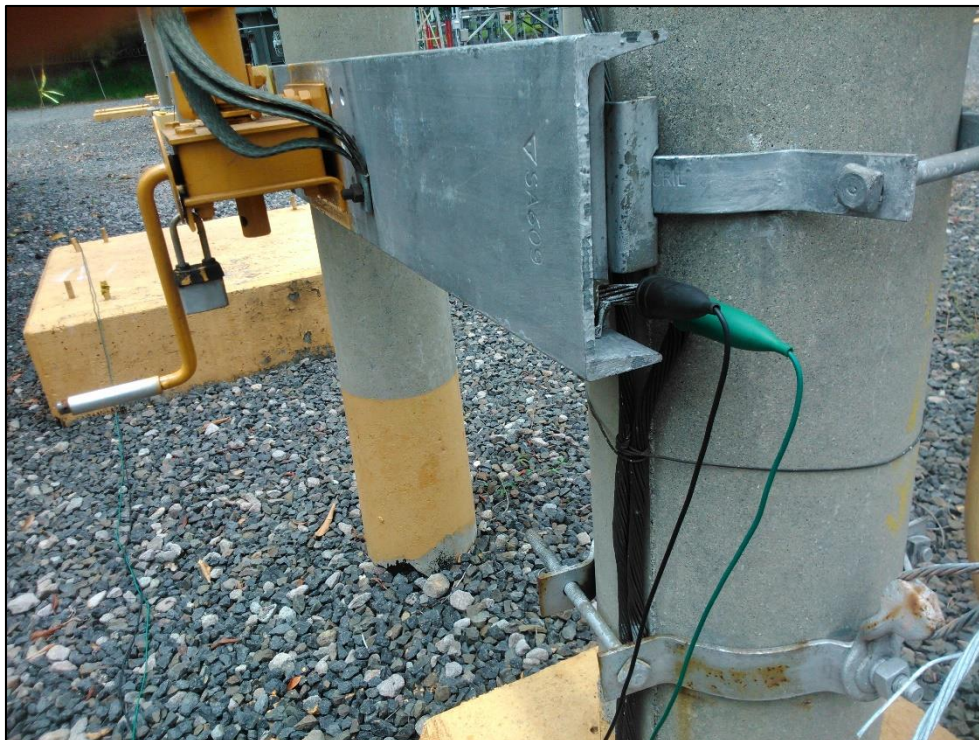


Figura J.10: Punto de prueba para método de cuatro polos en subestación 1



Figura J.11 Cadena utilizada como electrodo en pavimento



Figura J.12 Método de caída de potencial completo en subestación 2



Figura J.13 Método de caída de potencial 62% dentro de la subestación 3



Figura J.14 Medición de resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión en subestación 1

- *Potenciales superficiales en subestaciones eléctricas de transmisión*



Figura J.15: Electrodo colocado simulando un pie de un operador dentro de la subestación 2



Figura J.16: Electrodo colocados para medir gradiente de potencial de toque



Figura J.17: Medición de potencial de toque



Figura J.18: Equipo de trabajo de graduación. Oscar Surio, Walter Pérez y Christian Serrano