



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE
RESISTENCIA EN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.**

Rolando Darío Chávez Valverth
Asesorado por
Francisco Javier González López

Guatemala , mayo de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE
RESISTENCIA EN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ROLANDO DARÍO CHÁVEZ VALVERTH

ASESORADO POR EL INGENIERO FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ

LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2004.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO: Ing. Sidney Alexander Samuels Milson.
VOCAL I: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos.
VOCAL II: Lic. Amahán Sánchez Álvarez.
VOCAL III: Ing. Julio David Galicia Celada.
VOCAL IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz.
VOCAL V: Br. Elisa Yazminda Vides Leiva.
SECRETARIO: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco.

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO: Ing. Sidney Alexander Samuels Milson.
EXAMINADOR: Ing. Edgar Florencio Montufar Urizar.
EXAMINADOR: Ing. Marvin Hernández.
EXAMINADOR: Ing. Pedro Cubes.
SECRETARIO: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE
RESISTENCIA EN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 10 de febrero de 2003.

Rolando Darío Chávez Valverth

Guatemala 8 de agosto de 2003

Ingeniero: Gustavo Orozco,
Coordinador del Área de Potencia,
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica,
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Estimado ingeniero:

Respetuosamente me permito comunicarle que he revisado el trabajo de graduación del estudiante: **Rolando Darío Chávez Valverth**, carné número 92-12381, con el título: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA EN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA”**, encontrando que es satisfactorio, ya que su contenido cumple con los objetivos propuestos, por lo que procedo por este medio a su aprobación.

El autor de la tesis y el suscrito asesor, somos responsables por el contenido que en ésta se presenta.

Atentamente,

Ing. Francisco Javier González López.

Colegiado número: 2364.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
GLOSARIO	XXIII
RESUMEN.....	XXX
OBJETIVOS.....	XXXII
HIPÓTESIS.....	XXXIII
INTRODUCCIÓN	XXXIV

1. GENERALIDADES SOBRE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	1
1.1. Conceptos básicos	1
1.1.1. Puesta a tierra	2
1.1.2. Resistividad eléctrica de los suelos	4
1.1.3. Factores que influyen en la resistividad del terreno.....	8
1.1.3.1. Naturaleza del terreno.....	9
1.1.3.2. Estratigrafía.....	10
1.1.3.3. Humedad.....	12
1.1.3.4. Temperatura.....	13
1.1.3.5. Salinidad	14
1.1.3.6. Variaciones estacionales.....	15
1.1.3.7. Factores de naturaleza eléctrica	15
1.1.4. Respuesta transitoria del SPT	16
1.2. Partes que comprende la puesta a tierra.....	19

1.2.1.	El suelo.....	21
1.2.2.	Tomas de tierra	22
1.2.2.1.	Electrodos de puesta a tierra	23
1.2.2.2.	Líneas de enlace con tierra.....	24
1.2.2.3.	Puntos de puesta a tierra.....	25
1.2.3.	Línea principal de tierra	25
1.2.4.	Derivaciones de la línea principal de tierra.....	26
1.2.5.	Conductores de protección.....	26
1.3.	Materiales de puesta a tierra	27
1.3.1.	Materiales que constituyen el pozo de puesta a tierra	27
1.3.2.	Conductores de protección.....	30
1.3.2.1.	Tipos de conductores de protección	31
1.3.2.2.	Sección de los conductores de protección	31
1.3.3.	Tomacorrientes con protección a tierra para uso doméstico y uso general similar	33
1.3.4.	Clases de electrodos.....	34
1.3.4.1.	Electrodos de varilla de acero recubierto con cobre (copperweld)	35
1.3.4.2.	Tubería metálica de agua enterrada	37
1.3.4.3.	Estructura metálica del edificio	38
1.3.4.4.	Electrodo de concreto armado o ufer.....	38
1.3.4.5.	Anillo de tierra	39
1.3.5.	Electrodos de puesta a tierra especialmente contruidos.....	40
1.3.5.1.	Electrodos de varilla o tubería	40
1.3.5.2.	Electrodos de placa	43
1.3.5.3.	Estructuras metálicas enterradas.....	43

	1.3.5.4.	Electrodos par puesta a tierra en radiofrecuencia.....	44
1.3.6.		Accesorios	44
	1.3.6.1.	Conectores.....	44
	1.3.6.2.	Registros	46
1.3.7.		Mejoramiento de la resistencia a tierra	48
	1.3.7.1.	Varillas de mayor diámetro.....	48
	1.3.7.2.	Varillas más largas	49
	1.3.7.3.	Varillas en paralelo.....	50
1.3.8.		Mallas	52
1.4.		Propósito y tipos de sistemas de puesta a tierra	54
	1.4.1.	Objeto de las puestas a tierra.....	54
		1.4.1.1. Unión sólida entre un sistema eléctrico y la tierra	54
		1.4.1.2. Control de potenciales anormales en el suelo (gradientes peligrosos)	55
		1.4.1.3. Circulación de corrientes anormales	57
1.4.2.		Definición de puesta a tierra	59
1.4.3.		Tipos de sistemas de puesta a tierra	60
		1.4.3.1. Tierra de protección	61
		1.4.3.2. Tierra de servicio.....	62
		1.4.3.3. Mallas a tierra.....	65
1.4.4.		Clasificación de los SPT según su aplicación.....	66
		1.4.4.1. SPT para instalaciones eléctricas	66
		1.4.4.2. SPT para equipos eléctricos	66
		1.4.4.3. SPT en señales electrónicas.....	67
		1.4.4.4. SPT de protección electrónica	67
		1.4.4.5. SPT para protección atmosférica	68
		1.4.4.6. SPT para protección electrostática	68

1.5. Instalaciones y equipos que deben conectarse a tierra.....	68
1.5.1. SPT de instalaciones eléctricas.....	70
1.5.1.1. Tipos de instalaciones que requieren un SPT.....	70
1.5.1.2. Tipos de instalaciones en ca que no necesitan estar sólidamente aterrizados..	71
1.5.1.3. Conductores a aterrizar.....	72
1.5.1.4. Influencia del suelo (tierra) en los circuitos eléctricos.....	73
1.5.1.5. Lugar de puesta a tierra del sistema.....	75
1.5.2. Equipos y canalizaciones que deben estar puestos a tierra	76
1.5.2.1. Canalizaciones metálicas	76
1.5.2.2. Equipo fijo en general	77
1.5.2.3. Equipo fijo específico	79
1.5.2.4. Equipos no eléctricos.....	80
1.5.2.5. Equipos conectados por cordón y clavija.	81
1.5.2.6. Instalaciones de comunicaciones y canalizaciones para sistemas de cómputo	82
1.5.2.7. Instalaciones provisionales	83
1.5.2.8. Líneas	83
1.5.2.9. Puesta a tierra de equipos conectados mediante cordón	84
1.5.2.10. Partes metálicas de equipos fijos consideradas aterrizadas.....	85
1.5.2.11. Continuidad eléctrica del circuito de tierra.....	85
1.5.2.12. Circuitos que no se deben aterrizar	87

	1.5.2.13.	Consideraciones para un buen diseño de sistema de puesta a tierra de quipos eléctricos	87
1.6.		Valores aceptables de resistencia de puesta a tierra	88
	1.6.1.	Resistencia de electrodos artificiales	88
	1.6.2.	Resistencia del SPT en subestaciones.....	88
	1.6.3.	Resistencia del SPT en locales especiales	89
	1.6.4.	Instalación eléctrica para construcciones riesgosas, locales para explosivos.....	90
2.		METROLOGÍA	91
2.1.		Conceptos importantes de la metrología	92
	2.1.1.	Magnitud	92
	2.1.2.	Unidad de medida.....	94
	2.1.3.	Medición	94
	2.1.4.	Exactitud.....	95
	2.1.5.	Repetibilidad	96
	2.1.6.	Reproducibilidad	96
	2.1.7.	Incertidumbre.....	97
	2.1.8.	Error de una medición	97
		2.1.8.1. Error grueso o grave	99
		2.1.8.2. Error sistemático	99
		2.1.8.3. Error aleatorio	100
		2.1.8.4. Tolerancia	101
2.2.		Instrumentos de medición y sus características	102
	2.2.1.	Patrones de referencia	102
	2.2.2.	Transductor de medición	102
	2.2.3.	Cadena de medición.....	103

2.2.4.	Sistema de medición	103
2.2.5.	Tipos de instrumentos	103
2.2.5.1.	Instrumento indicador	103
2.2.5.2.	Instrumento registrador	104
2.2.5.3.	Instrumento integrador	105
2.2.5.4.	Sensor o detector.....	105
2.2.6.	Ajuste	105
2.2.7.	Calibrado	106
2.2.8.	Alcance nominal	106
2.2.9.	Intervalo de medición	106
2.2.10.	Valor nominal	107
2.2.11.	Característica de respuesta.....	107
2.2.12.	Tiempo de respuesta.....	107
2.2.13.	Exactitud.....	108
2.2.14.	Precisión o repetibilidad	108
2.2.15.	Sensibilidad	108
2.2.16.	Resolución.....	109
2.2.17.	Estabilidad.....	109
2.2.18.	Discreción.....	109
2.2.19.	Error de un instrumento de medición	110
2.2.20.	Especificación de un instrumento de medición.....	110

3.	INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA PARA MEDIR LA RESISTENCIA DE UN SPT Y LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	111
3.1.	Componentes esenciales de un instrumento	114
3.1.1.	Fuente de potencia.....	114
3.1.2.	Métodos para eliminar corrientes de error.....	115
3.1.3.	Sistemas de medición	115

3.2.	Sistemas de medición.....	116
3.2.1.	Sistema de ohmetro o voltamperímetro.....	116
3.2.2.	Sistema comparador de resistencias.....	117
3.2.3.	Sistema de balance nulo	118
3.2.4.	Sistema combinado	119
3.3.	Telurómetro	120
3.3.1.	Telurómetro T-4V (Digital)	122
3.4.	Megger	124
3.4.1.	Principio de funcionamiento del Megger modelo 21159.....	125
3.4.1.1.	Indicador	126
3.4.1.2.	Generador	126
3.4.1.3.	Manivela.....	126
3.5.	Vibroground.....	129
3.5.1.	Aplicaciones.....	129
3.6.	Geotest.....	130
3.6.1.	Medidor de resistencia de tierra y resistividad geotest ht2016.....	130
3.7.	Otros instrumentos de medición	133
3.7.1.	El telohm (Mash and Thompson).....	133
3.7.2.	El terrameter (ABEM)	133
3.7.3.	Instrumento de verificación multifunción speedtest ht 2018.....	134
3.7.4.	Macrotest ht 5030.....	136
3.7.5.	Equipo con pinzas para medir la resistencia de un SPT.....	137
3.7.6.	Principio de operación	139
3.7.7.	GTR-2, Equipo para medición de resistividad de un terreno muy grande	141

3.7.7.1.	Preparación del instrumento	141
3.7.7.2.	Componentes del equipo	141
3.7.7.3.	Adquisición de datos.....	141
3.7.7.4.	Especificación del teclado.....	142
3.7.8.	Oden-A.....	145
3.7.8.1.	Aplicaciones.....	145
3.7.9.	El instrumento de Shepard.....	146
4.	MÉTODOS UTILIZADOS PARA MEDIR LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	147
4.1.	Medición de resistencia de puesta a tierra	147
4.1.1.	Método del 62% o de caída de potencial.....	147
4.1.1.1.	Principio de caída de potencial	147
4.1.1.2.	Aplicación del principio de medidas	150
4.1.1.3.	Medición de resistencia de un electrodo por el método de caída de potencial	151
4.1.1.4.	Medición de la resistencia de mallas de tierra.....	156
4.1.2.	Método directo o de los dos puntos.....	157
4.1.3.	Método de la pendiente	158
4.1.3.1.	Procedimiento	158
4.1.4.	Método de los tres puntos o puente Nippold	160
4.2.	Medición de la resistividad del terreno	161
4.2.1.	Medida de la resistividad eléctrica.....	162
4.2.1.1.	Condiciones para la medición de la resistividad del suelo.....	165

4.2.1.2.	Para la seguridad del operador que mide cerca de instalaciones eléctricas energizadas.....	165
4.2.1.3.	Para asegurar la representatividad de las medidas de campo	166
4.2.2.	Tipos de prospecciones geoléctricas.....	168
4.2.2.1.	Sondeo Eléctrico vertical.....	168
4.2.2.2.	Calicatas eléctricas	170
4.2.3.	Método directo o simplificado	172
4.2.4.	Método Wenner o de los cuatro electrodos	174
4.2.4.1.	Procedimiento de medición	176
4.2.4.2.	Dispositivo Wenner	180
4.2.4.3.	Dispositivos Wenner a, b.....	181
4.2.4.4.	Sondeo Wenner	181
4.2.4.5.	Calicata Wenner.....	182
4.2.4.6.	Ventajas y limitaciones del método	183
4.2.5.	Método de Schlumberger	184
4.2.5.1.	Dispositivo Schlumberger.....	184
4.2.5.2.	Sondeo Schlumberger.....	186
4.2.5.3.	Calicata Schlumberger	187
4.2.6.	Método polo-dipolo	189
4.2.6.1.	Dispositivo polo-dipolo	189
4.2.6.2.	Calicata polo-dipolo.....	190
4.2.7.	Método del doble dipolo.....	191
4.2.7.1.	Dispositivo doble dipolo (axil).....	191
4.2.7.2.	Sondeo dipolar	192
4.2.7.3.	Calicata dipolar	193
4.2.8.	Método Lee.....	194
4.2.9.	Otros métodos para medir la resistividad del terreno	195

4.2.9.1.	Medición de la resistividad utilizando muestras del suelo.....	195
5.	PRUEBAS DE CAMPO	197
5.1.	Medición de la resistencia de puesta a tierra de un solo electrodo	197
5.1.1.	Procedimiento utilizado en la aplicación del método del 62% o de caída de potencial	198
5.1.2.	Procedimiento utilizado en la aplicación del método directo o de los dos puntos.....	201
5.1.3.	Procedimiento utilizado en la aplicación del método de los tres puntos o puente Nippold	203
5.2.	Medición de la resistencia de puesta a tierra de una malla.....	206
5.2.1.	Procedimiento utilizado en la aplicación del método del 62% o de caída de potencial	206
5.2.2.	Procedimiento utilizado en la aplicación del método de la pendiente.....	207
5.3.	Medición de la resistividad	210
5.3.1.	Procedimiento utilizado en la aplicación del método Wenner.....	211
5.3.2.	Procedimiento utilizado en la aplicación del método de Schlumberger	213
5.3.3.	Procedimiento utilizado en la aplicación del método del polo-dipolo	214
5.3.4.	Procedimiento utilizado en la aplicación del método del doble dipolo	216
5.3.5.	Procedimiento utilizado en la aplicación del método directo.....	218

6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	221
6.1.	Medición de resistencia de puesta a tierra de un solo electrodo.....	222
6.2.	Medición de resistencia de puesta a tierra de una malla.....	228
6.3.	Medición de la resistividad.....	230
	CONCLUSIONES	233
	RECOMENDACIONES.....	236
	BIBLIOGRAFÍA.....	237
	ANEXOS.....	243

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Modelo analítico de suelo conductor de resistividad ($\Delta\rho$) homogénea ..	4
2.	Perfil geográfico del suelo.....	11
3.	Modelos utilizados para representar un electrodo de puesta a tierra vertical	17
4.	Modelo utilizado para representar un electrodo de puesta a tierra horizontal	18
5.	Varilla electroquímica.....	29
6.	Zanja alrededor del electrodo de tierra con compuestos químicos que mejoran la resistividad	29
7.	Tomacorriente con protección a tierra o polarizado	33
8.	Formas en las que se puede enterrar un electrodo en la tierra	41
9.	Diferentes tipos de conectores eléctricos	45
10.	Los conectores unen los conductores con los electrodos del SPT	45
11.	Ejemplo de un SPT con su registro.....	47
12.	Relación entre el diámetro de la varilla y la resistencia de tierra	49
13.	Variación de la resistencia con la profundidad, para un electrodo de 1.02 plg de diámetro en suelo muy húmedo	49
14.	Porcentaje de conductividad de electrodos de tierra en paralelo en un área de electrodos aislados	51
15.	En los cruces de la malla, los cables se conectan sólidamente.....	53

16.	Protección en caso de energización de las masas.....	55
17.	Potenciales peligrosos de toque y de paso en subestación de media y baja tensión	56
18.	Conexión de cargas en sistemas estrella con neutro a tierra.....	57
19.	Conexión de cargas en sistema delta o estrella con neutro a tierra.....	58
20.	Dispersión de corrientes a frecuencia industrial en el suelo con hemisferios concéntricos.....	59
21.	Sistema en delta-estrella con neutro aislado.....	73
22.	Sistema en estrella con neutro puesto a tierra	74
23.	Cajas metálicas	77
24.	Se deben colocar canalizaciones y cajas independientes para las computadores	83
25.	Esquemas de un conector no roscado y uno roscado.....	85
26.	Puente de unión o conector	86
27.	En hospitales la resistencia del SPT será menor de 3ζ	89
28.	En instalaciones de alto riesgo, la resistencia del SPT debe ser menor de 5ζ	90
29.	Circuito básico del sistema de ohmetro o voltamperímetro.....	116
30.	Circuito básico del sistema comparador de resistencias.....	118
31.	Circuito básico del sistema de balance nulo	119
32.	Circuito básico del sistema combinado	119
33.	Esquema de funcionamiento de un telurómetro.....	120
34.	Telurómetro digital mod. T-4V.....	122
35.	Las dimensiones del equipo están dadas en milímetros.....	124
36.	Algunos modelos de medidores de resistencia de tierra Megger	127
37.	Accesorios incluidos con los medidores marca Megger.....	127
38.	Diagrama del circuito del Megger de tierras modelo 21159	128
39.	Vibroground.....	130

40.	Geotest HT2016. Instrumento multifunción para la medida de resistencia de tierra, diferenciales y corriente de cortocircuito.....	132
41.	Macrotest HT5030. Instrumento multifunción, registra disturbios de voltaje y picos de corriente y mide la resistencia de puesta a tierra ..	137
42.	Medidores de inducción marca Clamp-on modelos 3710 y 3730.....	138
43.	Circuito equivalente que muestra la distribución de un SPT.....	140
44.	Circuito cerrado de corriente en el suelo para la medida de los parámetros.....	148
45.	Esquema de medidas de corriente y potencial para resistividad y resistencia de puesta a tierra.....	150
46.	Medición de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo por el método de caída de potencial.....	151
47.	Medición de la resistencia de puesta a tierra de una malla por el método de caída de potencial.....	156
48.	Medición de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo por el método de dos puntos.....	158
49.	Configuración simétrica.....	162
50.	Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad del suelo.....	163
51.	Disposición de los circuitos de medida del método simplificado con electrodo piloto.....	172
52.	Medidas Wenner de la resistividad aparente del suelo con un telurómetro.....	177
53.	Líneas de medida de la resistividad aparente (AA', BB') principal, (CC', DD') complementarios.....	177
54.	Curvas de puntos correspondientes a cuatro líneas de medida Wenner.....	178
55.	Disposición de los circuitos de medida del dispositivo Wenner.....	180
56.	Dispositivos a a-Wenner (izquierda) y b b-Wenner (derecha).....	181

57.	Sondeo Wenner. La distancia interelectrónica pasa de a (AMNB) a $na(A'M'N'B')$	182
58.	Calicata Wenner. Los cuatro electrodos se desplazan a la vez, manteniendo sus separaciones.....	182
59.	Dispositivo Schlumberger.....	184
60.	Sondeo Schlumberger. Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras M y N están fijos	186
61.	Calicata Schlumberger (segunda variante). Los electrodos M y N se mueven de A hasta B manteniendo su separación	187
62.	Dispositivo de cuatro electrodos. La corriente se inyecta por los electrodos externos y la diferencia de potencial se mide entre los electrodos M y N	188
63.	Dispositivo polo-dipolo	189
64.	Dispositivo doble dipolo.....	191
65.	Sondeo dipolar. Los dipolos se mantienen, aumentando la separación entre ellos	193
66.	Calicata dipolar. Se desplaza el dispositivo dipolar manteniendo las separaciones	193
67.	Configuración de los electrodos para la medición de resistividad mediante el método de Lee.....	194
68.	Forma en la que están colocados los electrodos afuera del edificio T-1, lado norte.....	198
69.	Configuración utilizada para medir la resistencia por el método de caída de potencial	201
70.	Configuración utilizada para medir la resistencia de un electrodo puesto a tierra por el método directo.....	202
71.	Configuración utilizada para medir la resistencia de un electrodo puesto a tierra por el método del puente de Nippold.....	205

72.	Forma en que se realizaron las mediciones con el método del puente Nippold para el electrodo 1	206
73.	Forma en que se realizaron las mediciones con el método del puente Nippold para los demás electrodos	206
74.	Planta de la configuración utilizada para medir la malla de tierra por el método de caída de potencial	207
75.	Planta de la configuración utilizada para medir la malla de tierra por el método de la pendiente	210
76.	Arreglo utilizado para medir la resistividad por el método de Wenner	212
77.	Arreglo utilizado para medir la resistividad por el método de Schlumberger.....	214
78.	Arreglo utilizado para medir la resistividad por el método del polo-dipolo	216
79.	Arreglo utilizado para medir la resistividad por el método del doble dipolo	218
80.	Arreglo utilizado para medir la resistividad por el método directo	220

TABLAS

I.	Resistividades referenciales de suelos naturales genéricos.....	10
II.	Valores de referencia de la resistividad del agua según su procedencia	13
III.	Características técnicas del telurómetro T-4V	123
IV.	Características mecánicas del telurómetro T-4V	124
V.	Características técnicas del Megger 21159.....	128
VI.	Características técnicas del Geotest HT2016.....	132
VII.	Características técnicas del Speedtest HT2018	135
VIII.	Características técnicas del Macrotest HT5030.....	137
IX.	Características técnicas de los medidores de inducción Clamp-on modelos 3710 y 3730	139
X.	Series de distancias de medida Wenner para una profundidad media de 8 m.....	179
XI.	Medición de la resistencia de un electrodo puesto a tierra por el método de caída de potencial	200
XII.	Resultados de las mediciones hechas al aplicar el método de caída de potencial.....	200
XIII.	Medición de la resistencia de un mismo electrodo puesto a tierra por el método directo	202
XIV.	Resultados de las mediciones hechas al aplicar el método directo.....	202
XV.	Medición de la resistencia de un electrodo puesto a tierra por el método del puente Nippold	204

XVI.	Resultados de las mediciones hechas al aplicar el método del puente Nippold	204
XVII.	Medición de la resistencia de una malla de tierra por el método de caída de potencial	207
XVIII.	Medición de la resistencia de una malla de tierra por el método de la pendiente.....	209
XIX.	Medición de la resistividad por el método de Wenner	211
XX.	Medición de la resistividad por el método de Schlumberger	213
XXI.	Medición de la resistividad por el método del polo-dipolo	215
XXII.	Medición de la resistividad por el método del doble dipolo	216
XXIII.	Medición de la resistividad por el método directo.....	219
XXIV.	Resultados de la resistencia del electrodo 1, obtenidos por tres métodos diferentes.....	223
XXV.	Resultados obtenidos al medir la resistencia del electrodo 2, ubicado en la parte de afuera del edificio T-1, lado norte.....	224
XXVI.	Resultados obtenidos al medir la resistencia del electrodo ubicado entre los edificios T-3 y T-5.....	225
XXVII.	Resultados obtenidos al medir la resistencia del electrodo ubicado atrás del edificio T-4.....	226
XXVIII.	Resultados de resistencia de una malla, obtenidos por dos métodos diferentes.....	229
XXIX.	Resultados de resistividad, obtenidos al ensayar cinco métodos diferentes.....	230
XXX.	Factores de corrección recomendados para cada método de medición	236

LISTA DE SÍMBOLOS

Δs	Sección, área
Δr	Longitud
ρ	Resistividad
ΔV	Diferencia de potencial
ΔI	Corriente
R	Resistencia
E	Intensidad de campo eléctrico
ds	Diferencial de superficie
dI	Diferencial de corriente
l	Longitud del segmento de suelo que se está analizando
P	Conductividad
$\Omega \cdot m$	Ohmio por metro. Unidad de medida de ρ en el Sistema Internacional de medidas (SI)
S	Siemens. Unidad de medida de la conductividad en el SI
A	Amperio. Unidad de medida de la corriente en el SI

V.....	Voltio. Unidad de medida del voltaje en el SI
KV/cm.....	Kilovoltios sobre centímetro. Unidad de medida que expresa el valor del gradiente de potencial
L.....	Inductancia
C.....	Capacitancia
ϵ	Permitividad eléctrica
μ	Permeabilidad magnética
ρ_o	Resistividad del terreno adjunto en $\Omega \cdot \text{cm}$
ρ_1	Resistividad del terreno circundante en $\Omega \cdot \text{cm}$
R_n	Resistencia neta
n.....	número de electrodos
L.....	Largo de la varilla en cm
a_0	Diámetro de la varilla en cm
a_1	Diámetro del terreno adjunto a la varilla en cm
V_p	Voltaje de paso
V_t	Voltaje de contacto
V_n	Voltaje de línea
X_c	Capacitancia parásitas
I_f	Corriente de falla
R.....	Resistencia interna del sistema
R_o	Potenciómetro
X.....	Resistencia del SPT que se está midiendo
G.....	Galvanómetro
I.....	Corriente inducida que circula por X y R
I_o	Corriente de entrada
i.....	Corriente medida por el galvanómetro

P_1	Resistencia en el electrodo P_1
P_2	Resistencia en el electrodo P_2
R_1 y R_2	Resistencias de los electrodos auxiliares
R_t	Resistencia que se quiere medir
I_1 e I_2	Corrientes que circulan por los electrodos auxiliares
V	Voltaje
r	Lectura del galvanómetro
dV	Voltaje entre los electrodos M y N
I	Corriente entre los electrodos A y B
PS	Potencial espontáneo
Res	Resistividad aparente calculada
V_b	Voltaje de salida del GTR-2
CT	Tiempo de cada ciclo
CN.....	Frecuencia media a la que se mide
K	Factor que depende de la geometría
ρ_m	Resistividad media
ρ	Resistividad
r	Radio hemisférico equivalente del SPT
C_1, C_2	Electrodos de corriente utilizados al realizar mediciones con el Megger de tierras
P_1 y P_2	Electrodos de potencial utilizados al realizar mediciones con el Megger de tierras
d	Distancia entre electrodos
R_1	Resistencia del electrodo que se mide mediante el método del puente Nippold
R_{1-2}	Resistencia entre los electrodos 1 y 2
R_{1-3}	Resistencia entre los electrodos 1 y 3

R_{2-3}	Resistencia entre los electrodos 2 y 3
C.....	Distancia entre electrodos que se asume al usar el método de la pendiente
μ	Cambio de pendiente en la gráfica de resistencia a tierra contra distancia
D_p/C	Coeficiente utilizado en el método de la pendiente para calcular distancia a la cual medir
a.....	Símbolo de la distancia en el método de Wenner
ρ	Resistividad promedio ($\Omega \cdot m$)
b	Profundidad de enterramiento del electrodo
A y B.....	Electrodos de corriente
M y N.....	Electrodos de potencial
G	Factor geométrico que depende de la disposición de los electrodos
L	$b + a/2$
E.....	Intensidad de campo eléctrico (V/m)
n.....	Coeficiente que multiplica a la distancia "a" para separar los dipolos
x	Distancia del origen, al punto medio entre los dos dipolos
c	Factor de corrección parcial
C_D	Factor de corrección para el método directo
C_N	Factor de corrección para el método del puente Nippold
C_P	Factor de corrección para el método de la pendiente

C_S	Factor de corrección para el método de Schlumberger
C_{dd}	Factor de corrección para el método del doble dipolo
C_{pd}	Factor de corrección para el método del polo dipolo

GLOSARIO

Aterramiento efectivo	Es la conexión a tierra del sistema a través de una baja impedancia.
Aterramiento no efectivo	Es la conexión a tierra del sistema a través de una impedancia.
Aterramiento sólido	Es la conexión directa a tierra entre el sistema y el conductor de puesta a tierra.
Barra equipotencial	Barra colectora conductora, sólidamente conectada a la puesta a tierra, que provee la condición de equipotencialidad a todos los conductores de bajada a tierra que convergen

y al conductor neutro, que se le conectan para ser puestos a tierra.

Circuito	Conductor o sistema de conductores a través de los cuales puede fluir una corriente eléctrica.
Circuitos de medida	Son las trayectorias de medida eléctrica, que se establecen tendiendo conductores entre los terminales del instrumento de medida (telurómetro, geómetro) y el suelo, a diferentes distancias preestablecidas.
Conductor	Alambre o conjunto de alambres, no aislados entre sí, destinados a conducir la corriente eléctrica.
Conductor neutro	Conductor exclusivo para el retorno de las corrientes de operación normal de los equipos eléctricos de una instalación; se le conecta a tierra en un solo punto.
Conductor de puesta a tierra	Conductor que es usado para conectar los equipos o el sistema de alambrado con uno o más electrodos a tierra.

Conexión a la puesta a tierra	Unión sólida con una puesta a tierra, mediante un conductor eléctrico; desde una barra equipotencial, desde el terminal de conexión a tierra o desde un punto accesible de la masa de un aparato eléctrico.
Electrodo	Conductor terminal de un circuito, el cual puede ser una varilla rígida, una placa, etc., en contacto con un medio de distinta naturaleza.
Electrodos de medida	Son varillas rígidas de metal en forma de estacas de pequeñas dimensiones, que se clavan en el suelo en los puntos terminales de los circuitos de medida, de corriente y de potencial, asegurando la mínima resistencia eléctrica de contacto durante las medidas.
Electrodo de puesta a tierra	Es un conductor metálico que proporciona el contacto eléctrico con el suelo. Se instala embutido, ya sea directamente en el suelo natural o en el relleno de una excavación. Puede tener diferentes formas.
Masa o carcasa	Es la caja metálica exterior o el chasis que contiene o soporta a un aparato eléctrico, que

presenta un punto, denominado terminal o borne de tierra, desde el cual se realiza la conexión a tierra según corresponda.

Puesta a tierra

Comprende toda la ligazón metálica directa, de sección suficiente, entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo. Su objeto es que en el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima del terreno no existan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falla o la de descarga de origen atmosférico.

Puesta a tierra (SPT)

Instalación de seguridad eléctrica en la que un conductor eléctrico desnudo simple o armado es enterrado en el suelo con la finalidad de dispersar corrientes eléctricas y captar el potencial de referencia cero.

Resistencia a tierra

Valor de la resistencia entre un punto cualquiera de una instalación, sea esta parte

activa desenergizada, o no-activa, y la masa terrestre.

Resistencia mutua

Resistencia que aparece entre electrodos de puesta a tierra o puntos próximos en el suelo, mediante el cual, la corriente que se dispersa a través de uno de ellos, modifica el potencial del otro; su unidad es el ohm.

Resistividad aparente

Es la resistividad obtenida con una medida directa en el suelo natural, bajo el esquema geométrico especificado por el método de (4) electrodos, aplicado con circuitos independientes de corriente y potencial, solo es representativo de un punto de la característica del suelo estratificado.

Resistividad del suelo

Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo; se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo, su magnitud se expresa en $\Omega \cdot m$ u $\Omega \cdot cm$; es la inversa de la conductividad.

Resistividad equivalente	Es la resistividad obtenida con una medida indirecta, bajo las condiciones que impone un electrodo explorador introducido en el suelo natural.
Sondeo geoelectrico	Medida de la resistividad aparente del suelo estratificado, aplicando el principio de caída de potencial con un método y distancias especificadas para una relación más o menos aproximada con la profundidad de la exploración (método WENNER: $a =$ profundidad media)
Suelo	Sistema natural, resultado de procesos físicos químicos y biológicos, con componentes principalmente minerales y sólidos inertes que le dan estabilidad, y adicionalmente líquidos y gases que definen su comportamiento eléctrico.
Suelo estratificado	Condición real de los suelos conformados por estratos de diferente resistividad y espesor, su formación obedece a los fenómenos geológicos naturales.

Suelo homogéneo	Condición ideal (teórica) de un suelo isotrópico y de profundidad infinita (un solo estrato) que puede ser representado por un solo valor de resistividad, cualquiera que fuere la profundidad del sondeo de las medidas.
Tensión a tierra	En los circuitos puestos a tierra, es la tensión eficaz entre un conductor dado y el punto o conductor que está a tierra. En los circuitos no puestos a tierra, es mayor la diferencia de tensión entre un conductor dado y cualquiera de los otros conductores del circuito.
Terminal de conexión a tierra	Es un punto propio de la masa o carcasa de un aparato que está designado para ser conectado sólidamente, ya sea a la barra equipotencial o al circuito colector.
Tierra	Suelo local de una instalación eléctrica con la que interactúa con un comportamiento conductivo natural regularmente insuficiente.
Tierra remota	También denominada tierra de referencia, es el lugar o la zona de mínima resistencia, más próxima del suelo subyacente a una instalación eléctrica o a una puesta a tierra,

respecto de las cuales se le atribuye por convención el potencial cero.

RESUMEN

Los capítulos de esta investigación se presentan en este orden temático. El proceso de investigación parte de una base teórica, este permite el planteamiento de la hipótesis, la cual debe pasar por una verificación experimental. Con estos datos se procede a corregir la hipótesis para volver a verificar, repitiéndose el procedimiento hasta que haya una concordancia entre la hipótesis y la verificación experimental.

En el capítulo 1 se exponen los conceptos generales de resistividad, resistencia y puesta a tierra. Se examinan también los factores que influyen en la resistencia de los sistemas de puesta a tierra y se examinan las características que deben tener los diversos tipos de sistema de puesta a tierra y sus partes. La información de este capítulo se basa principalmente en la Norma Oficial Mexicana (NOM), normas IEC, Código Nacional de Electricidad de Perú, pues no se encontró información suficiente en las normas guatemaltecas.

En el capítulo 2 se enumeran varios conceptos muy importantes de metrología relacionados con el instrumento, el sistema de medición, la magnitud

a ser medida, etc. Por su utilidad, estos conceptos serán utilizados a lo largo de este trabajo, por lo que es necesario tener un conocimiento previo de los mismos.

El capítulo 3 trata de los diferentes tipos de instrumentos que se utilizan para medir resistencia de puesta a tierra y resistividad. Este capítulo enumera y describe el funcionamiento básico y las características técnicas de algunos modelos disponibles actualmente en el mercado.

Los principales sistemas de medición de resistividad y resistencia de puesta a tierra son descritos en el capítulo 4. Primeramente, se trata lo relacionado con los sistemas de medición de resistencia de puesta a tierra de un electrodo y una malla. Por último, se tratan los sistemas de medición de resistividad, describiéndose en cada caso los pasos necesarios para su implementación así como sus alcances y limitaciones.

En el capítulo 5 se presentan los resultados experimentales obtenidos al aplicar los métodos presentados en el capítulo 4. Este capítulo se limita a la presentación de resultados y no entra en algún tipo de análisis.

En el capítulo 6 se hace un análisis comparativo de los resultados obtenidos al aplicar los métodos de medición de resistividad y resistencia de puesta a tierra explicados anteriormente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Analizar mediante comparación, los métodos utilizados para medir resistencia de puesta a tierra y la resistividad del terreno.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Describir los elementos que forman parte de un buen Sistema de Puesta a Tierra (SPT).
2. Analizar la importancia que tiene una correcta instalación de puesta a tierra, para la seguridad de las personas y el equipo eléctrico.
3. Describir las características de los instrumentos que se utilizan para medir la resistencia de un SPT y la resistividad del terreno.
4. Analizar los métodos utilizados para realizar las mediciones pertinentes a un Sistema de Puesta a Tierra.

5. Determinar en forma experimental la exactitud de cada uno de los métodos que se analicen a lo largo de la investigación.

HIPÓTESIS

Como base para comparar los diferentes métodos para medir resistencia de puesta a tierra, se tomará el método de caída de potencial y el método de Wenner será la base de comparación entre los métodos utilizados para medir resistividad.

Se toma como hipótesis que el método de caída de potencial y el método de Wenner dan resultados exactos, por lo cual se toman como bases de comparación. Ambos métodos están normalizados; esta afirmación será la hipótesis inicial que servirá para desarrollar este trabajo de investigación y se tratará de demostrar su validez.

INTRODUCCIÓN

Cuando se entierra un conductor, este pasa a tener el mismo potencial que la tierra; este potencial tiene, por convención, un valor de cero voltios. Este fenómeno es muy importante pues permite el desarrollo de sistemas de puesta a tierra (SPT) que sirven para proteger a las personas y al equipo conectado al sistema eléctrico de descargas eléctricas provenientes de rayos o cortocircuitos. Además un SPT provee estabilidad a los sistemas eléctricos y sistemas de comunicaciones y ayuda a eliminar la interferencia electromagnética que puede provenir de sistemas eléctricos adyacentes.

Para que un SPT sea funcional, este debe tener una baja resistencia, ya que la corriente circulará por la trayectoria que ofrezca menor resistencia. Es en este punto donde se aplican los conocimientos ofrecidos por la metrología, ya que para asegurar que el SPT sea funcional, deben realizarse mediciones de resistencia y de resistividad a fin de garantizar que se tendrá un SPT funcional sin caer en un sobredimensionamiento costoso.

Actualmente, en Guatemala no se le da mucha importancia a la adecuada instalación del SPT y la mayoría de personas que se dedica a diseñar y construir sistemas eléctricos, desconoce lo relacionado con las mediciones de resistividad y de resistencia de puesta a tierra. En algunos casos, por ejemplo,

cuando se hacen este tipo de mediciones, las personas encargadas utilizan un multímetro convencional, pero debido a que el aparato no está diseñado para realizar estas medidas, la lectura que proporciona ni siquiera da una idea aproximada de la magnitud verdadera.

Debido a la importancia que tienen las mediciones de resistencia y resistividad para el buen diseño de los SPT y la falta de información que existe en el medio guatemalteco, se creyó conveniente investigar lo relacionado a los principales sistemas de medición de puesta a tierra y resistividad, desarrollados hasta hoy y hacer un análisis comparativo, para sugerir opciones que sean de fácil aplicación y que den resultados óptimos.

CONCLUSIONES

1. El método directo, utilizado para medir la resistencia de puesta a tierra de electrodos individuales se concluye que aunque es un método muy fácil de aplicar; porque solo se utiliza un electrodo auxiliar y no es necesario medir distancias, pues la distancia a la que se clava el electrodo auxiliar no influye en la lectura del medidor. A pesar de esto, este es un método muy inexacto pues en las pruebas realizadas para la elaboración de este trabajo generó lecturas entre cinco y seis veces más altas que las obtenidas por el método de caída de potencial. Por esta razón, **NO SE ACONSEJA SU USO** a menos que se utilice el factor de corrección sugerido.
2. La aplicación del método del puente Nippold es más sencilla que la del método de caída de potencial pues para efectuar la medición solamente se necesitan dos terminales de corriente y dos electrodos auxiliares. En los ensayos con este método se comprobó que las distancias de separación entre electrodos no afectan el resultado final de la medición, por lo que estas pueden ser arbitrarias. También se comprobó que la disposición de los electrodos entre sí (en línea recta o en triángulo) tampoco afecta el resultado final de la medición. Este método brinda resultados cuya variación puede ser hasta un 20 % de los obtenidos por el método de caída de potencial.

3. En los ensayos realizados para medir la resistencia de un solo electrodo por los métodos de caída de potencial y puente Nippold se comprobó que la dirección en la cual se siembran los electrodos auxiliares no afecta el resultado final de la medición.
4. El método de la pendiente sirve para medir la resistencia de una malla; es un método que necesita mayor procesamiento matemático para obtener un resultado y es un poco más elaborado que el de caída de potencial. La ventaja de este método es que requiere distancias más pequeñas para efectuar la medición que el método de caída de potencial. Entre estos dos métodos hay una diferencia aproximada de 15 % por lo que es necesario utilizar el factor de corrección sugerido en el capítulo 6.
5. En cuanto a los métodos utilizados para medir resistividad utilizando tres electrodos el método más confiable es el directo; con este se obtiene el valor de la resistividad a partir de la medida de la resistencia de un electrodo y la aplicación de la ecuación que relaciona estas dos magnitudes. En las pruebas realizadas, este método aportó dar resultados que coinciden con los obtenidos por el método de Wenner. El método polo dipolo fue el más inexacto de los métodos de resistividad ensayados.
6. De los métodos que miden resistividad utilizando cuatro electrodos, el método de Schlumberger y el método del doble dipolo, dan resultados muy parecidos a los obtenidos de que la aplicación del método de Wenner.

7. Los métodos más confiables para la medición de resistencia y resistividad son el método de caída de potencial y el método de Wenner respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. Las mediciones de resistencia y resistividad se deben realizar en la época del año más seca, pues es en esta época cuando estas magnitudes registran sus valores más altos.
2. Se deben aplicar los coeficientes de corrección a los resultados obtenidos según el método de medición se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XXX. Factores de corrección recomendados para cada método de medición

Método	Coeficiente
Caída de potencial	1
Directo	0.1875
Puente Nippold	1.1000
Pendiente	0.8600
Directo (para resistividad)	1
Wenner	1
Schlumberger	1.0022
Polo-Dipolo	1.0044
Doble Dipolo	0.9700

BIBLIOGRAFÍA

1. Analizadores y registradores de redes.
http://www.iope.com.br/p_ie_koban_a.htm. Oct 2002.
2. Apparao, A.; Gangadhara Rao, T.; Sivarama Sastry, R.; Subrahmanya Sarma, V. **Depth of detection of buried conductive targets with different electrode arrays in resistively prospecting**. Geophysical Prospecting, 1992, 40: 749-760.
3. Boletín 70, año 3. *Grupo Interuniversitario de Certificaciones de Redes GICER* <http://www.ispjae.cu/gicer>. Oct. 2002.
4. Brescolí, A. **Sistema de medida de la resistividad eléctrica del suelo**. Proyecto Fi de Carrera ETSETB, UPC. 1995.
5. Conexión a tierra, www.procobreperu.org. Nov. 2002.
6. Curso de tierra. GRUPO INTERUNIVERSITARIO DE CERTIFICACIÓN DE REDES www.surac.com. Nov. 2002.
7. DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD DEL INSTITUTO DE NOREÑA EN ASTURIAS. Puesta a tierra.
www.centros5.pntic.mec.es/ies.de.norena/html/depart/PDep_El/Pagina%201/PAGINA1.htm. Oct. 2002.

8. ¿Dudas? Consejos de uso (FAQ's).
www.htinstruments.com/html/dudas.htm. Oct. 2002.
9. Fallas monofásicas a tierra - la red de tierra.
<http://www.ing.unlp.edu.ar/sisspot/libros/pr/tierra>. Sep. 2002.
10. Forma práctica de medir los sistemas de aterramientos,
www.plantaexterna.cl/tierras/resistiv.htm. Nov. 2002.
11. Geología. La explotación geológica en el noroeste de Cuajone.
www.iimp.org.pe/tratec/geologia.htm. Nov. 2002.
12. González López, Francisco Javier. **Fundamentos teóricos sobre metrología**. Guatemala: 1999. 118pp.
13. Hayt, William H. Jr. **Teoría Electromagnética**. 5 edición. Mexico: Mc. Graw Hill, 1996. 527 pp.
14. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System. www.ieee.org. Oct. 2002.
15. IEEE Standards Interpretation for IEEE Std 80-1986. www.ieee.org. Oct. 2002.
16. Imágenes de resistividad eléctrica; Un método geofísico al servicio del conocimiento y el desarrollo nacional.
<http://www.cigeo.edu.ni/investig/plegable.pdf>. Nov. 2002.
17. Instrumentación, <http://petrus.upc.es/~wwwdib/tesis/mgasulla/Cap4.pdf>.
Nov. 2002.

18. Instrumental. www.datawaves.com. Oct. 2002.
19. La importancia de una correcta puesta a tierra, www.mediciónycontrol.com, Nov. 2002
20. La resistencia del sistema de aterramiento, www.plantaexterna.cl/tierras/resisis.htm. Nov. 2002.
21. Martín, José Raúl. **Diseño de subestaciones eléctricas**. México: Mc. Graw Hill, 1992. 509 pp.
22. Medición con equipos de los diferentes sistemas de puesta a tierra. <http://elektra.udea.edu.co/~tierras/index.html>. Oct. 2002.
23. Medición de resistencia de puesta a tierra, <http://members.tripod.com/JaimeVp/Electricidad/electric1.HTM>. Nov. 2002.
24. Mediciones, www.ingelectricista.com.ar. Nov. 2002.
25. Mediciones, <http://www.paas.unal.edu.co/investigaciones/tierras/mediciones.htm>. Nov. 2002.
26. Mediciones y objetivos de los sistemas de puestas a tierra, www.plantaexterna.cl/tierras/protec.htm. Nov. 2002.

27. Medida de la resistividad del suelo,
<http://petrus.upc.es/~wwwdib/tesis/mgasulla/Cap2.pdf>. Nov. 2002.
28. Métodos de resistividad. info@trxconsulting.com. Nov. 2002.
29. Métodos eléctricos de prospección.
<http://vppx134.vp.ehu.es/fisica/agustin/geoelec/intro.html>. Nov. 2002.
30. Norma Oficial Mexicana 001 – SEDE - 1999.
31. Normas Técnicas Peruanas. Resolución Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales N° 0062 y 0064-1999/INDECOPI-CRT. 11 y 13 de diciembre de 1999.
32. Orellana, E. **Prospección Geoeléctrica por campos variables**. Madrid: Paraninfo. Vol. 2. 1974.
33. Pallás, R.; Rosell, J. **Interferencias en instrumentación electrónica**. Barcelona: Ediciones UPC. 1995
34. Procedimiento para medición de resistencia de puesta a tierra.
<http://www.tomasdetierra.com/medic.html>. Oct. 2002.
35. Prospección de estratos superficiales por el método de la resistividad aparente. Configuración Wenner.
<http://www.unne.edu.ar/cyt/tecnologicas/t-044.pdf>. Nov. 2002.
36. Protección de las instalaciones.
http://www.guiaelectrica.cl/normas_electricas.htm. Sep. 2002.

37. Puesta a tierra www.ingelectricista.com.ar. Nov. 2002.
38. Puestas a tierra en instalaciones domiciliarias e industriales.
http://www.guiaelectrica.cl/informacion_tecnica2.html. Sep. 2002.
39. Red de puesta a tierra. www.ing.unlp.edu.ar/sispot/. Sep. 2002.
40. Redes de distribución. www.procobreperu.org/publicaciones.htm. Oct. 2002
41. Relatoría Medición y medidores.
<http://elektra.udea.edu.co/~tierras/relatorias.html>. Oct. 2002.
42. Resistividad del terreno, www.inini.com.mx/mediciones.html, Nov 2002.
43. Respuesta de diferentes configuraciones electrónicas de puesta a tierra ante la inyección de impulsos de corriente. mmlozano@usb.ve. Nov. 2002.
44. Resumen de normas técnicas peruanas del sistema de conexión a tierra
www.procobreperu.org/publicaciones.htm. Nov. 2002.
45. Resumen: Información de Sica News. www.sicanews.com. Sep. 2002.
46. Riu, P.; Rosell J.; Ramos, J. **Sistemas de instrumentación**. Barcelona: Ediciones UPC. 1995.

47. Roy, A. **Depth of investigation in Wenner, three-electrode and dipole-dipole dc resistivity methods.** *Geophysical Prospecting*, 1972, 20: 329-340.
48. Seguridad eléctrica interior, www.procobreperu.org/publicaciones.htm.
Nov. 2002.
49. Teoría y diseño de sistemas de tierras según las normas NOM e IEEE.
www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html. Oct. 2002.
50. Zohdy, A. R. **A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves.** *Geophysics*, 1989, 54(2): 245-253.

ANEXOS

National Electrical Code

TABLA 250-95. Tamaño mínimo de conductores para aterrizado de gabinetes y equipos. <i>(Minimum size equipment grounding conductors for grounding raceway and equipment)</i>		
Capacidad del dispositivo automático de disparo por sobrecorriente. No excediendo (Amperios) <i>(Rating or setting of automatic over current device in circuit ahead of equipment, conduit, etc., not exceeding)</i>	Calibre (Size)	
	Alambre de cobre No. <i>(Copper wire No.)</i>	Alambre de aluminio o de aluminio combinado con cobre No. <i>(Aluminum or copper-clad aluminum wire No.)</i>
15	14	12
20	12	10
30	10	8
40	10	8
60	10	8
100	8	6
200	6	4
300	4	2
400	3	1
500	2	1/0
600	1	2/0
800	0	3/0
1000	2/0	4/0
1200	3/0	250 MCM
1600	4/0	350 MCM
2000	250 MCM	400 MCM
2500	350 MCM	600 MCM
3000	400 MCM	600 MCM
4000	500 MCM	800 MCM
5000	700 MCM	1200 MCM
6000	800 MCM	1200 MCM

Norma IEEE 80-2: Guía para mediciones

Propósito

El propósito de esta norma es presentar los métodos de instrumentación práctica que pueden ser usados para la medición de la impedancia de la tierra, potenciales de toque y paso, y distribuciones de corriente de sistemas de tierra largos o extensos (mayores de 20000 metros cuadrados).

Precauciones generales

- No hacer mediciones al SPT durante periodos de actividad de tormenta o relámpagos en áreas comprendidas en la estación a ser medida o en la red de potencia conectada a esta.
- No conectar las puntas de prueba a líneas de transmisión fuera de servicio durante estos periodos.
- En el caso de que aparezcan tormentas o relámpagos en esta zona, cuando las pruebas se estén haciendo, se deben suspender las mediciones, abrir las conexiones y aislar de la malla los conductores instalados.

Seguridad en la preparación de las pruebas

- Cuando se manipulen altos voltajes, usar botas y guantes aislantes, protección para los ojos, y cascos.
- Evitar tener contacto sin la debida seguridad entre el equipo y las puntas de prueba.
- Es recomendable que las personas que vayan a trabajar en las mediciones entiendan bien su parte correspondiente en la prueba.

Seguridad en las mediciones

- Es esencial que una persona (supervisor), coordine todas las operaciones, manteniendo control de las conexiones hechas a todos los circuitos y autorizar las energizaciones de la prueba. Ninguna persona puede trabajar en, o tocar el circuito de prueba sin el permiso del supervisor.
- Cada persona debe ser avisada de las consecuencias de la corriente que circula por la tierra.
- Tener cuidado con los animales que podrían estar en contacto con los electrodos de corriente de tierra.

Procedimientos preliminares

La exactitud en la medición de la resistencia de los SPT, depende de la localización de los electrodos de prueba, la mínima distancia para las pruebas que tendrán una exactitud aproximada de la medida del 95%, puede ser estimada por 6.5 veces la extensión del SPT. Esta extensión está dada por la máxima distancia diagonal del SPT.

Las frecuencias más cercanas por arriba y por debajo de la frecuencia del sistema de potencia con niveles bajos de ruido, pueden ser determinadas por el ancho de banda y su habilidad para atenuar voltajes con ruido que pueden producir variaciones en la lectura. Si los voltajes a las frecuencias seleccionadas son promediados y los niveles de ruido a la frecuencia seleccionada permanecen constantes, puede hacerse la medida de la impedancia cuando el voltaje de la malla y la corriente de prueba está arriba de los niveles de ruido.

La magnitud de la corriente y la selección de la frecuencia dependerán del método usado para la prueba. Las siguientes fuentes son muy usadas:

- Baja potencia, con amplificador (0.1 -10)A, con un rango de frecuencias de (10-600Hz).
- Oscilador amplificador, con transformador ajustable, frecuencias por arriba y debajo de la frecuencia del sistema de potencia.

- El Sistema de Potencia de la estación de servicio con un transformador auxiliar (1-100)A.
- Generador de potencia portátil (50-100)A, con frecuencias por arriba y por debajo del Sistema de Potencia.

La prioridad en la medición de los SPT, es la integridad de la conexión del más antiguo componente de tierra conectado a la malla. Esto es muy importante en los SPT viejos, en los cuales las conexiones de baja resistencia en la malla pueden haber sido destruidas por corrosión o por corrientes de falla. La medida de la resistencia es hecha por una inyección de corriente desde el punto de prueba y un punto remoto de la malla (+30m).

Efectos mutuos

Los métodos de esta guía para las mediciones requieren una fuente AC. Estos métodos pueden introducir errores.

Los errores de las medidas de la impedancia de las SPT resultan de la resistencia mutua entre la malla y el potencial de prueba, entre la corriente de prueba y el voltaje de prueba, y entre la corriente de prueba y la malla. Estas resistencias mutuas pueden ser mitigadas por una adecuación entre la malla y el voltaje de prueba y entre el voltaje de prueba y la corriente de prueba.

Una segunda fuente de error en la medida en el acople inductivo entre los puntos de Voltaje y corriente. Estos errores pueden ser más grandes cuando los conductores están en paralelo. Cuando esta $Z_{mutua} > Z$ del SPT puede dar una lectura equivocada, por esta razón es recomendable que en SPT grandes la medición sea hecha en puntos que formen 90 grados con la malla. Con un ángulo menor de 90 grados cualquier voltaje producido en un electrodo forma un acople con la corriente que fluye por el electrodo, lo cual genera un voltaje inducido que se suma al valor de la impedancia, produciendo un error. Cuando el ángulo es mayor a 90 grados se da lo opuesto, el voltaje mutuamente acoplado es negativo y de una reducción en la medida de la impedancia.

Medida de la impedancia por inyección de corriente

Método del voltímetro

Es uno de los instrumentos más simples para la medición de la impedancia. En este método se usa una corriente AC (0.1-10A) con una frecuencia cercana a la de la frecuencia del SPT.

Para aplicar el método se utiliza un transformador M, un selector de frecuencia, un voltímetro y una resistencia. La medida solo de la magnitud de la impedancia, pero no el ángulo de ésta.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- Buscar la frecuencia del SPT +/- 10Hz para encontrar un ruido bajo
- Poner el oscilador de frecuencia a la frecuencia seleccionada
- Medir el potencial entre el SPT y el electrodo
- Ajustar el amplificador de salida a la corriente seleccionada
- Repetir los pasos anteriores para una distancia mas grande del electrodo hasta que el valor de la impedancia sea asintótico

Método del analizador de red canal-dual

Este método determina automáticamente, de la medición de voltaje y corriente, la impedancia del SPT.

La impedancia del SPT puede ser medida con niveles de corriente de 10-100A usando un generador de potencia portátil que puede ser de 120 V ac, con la frecuencia del SPT. Una desviación de mas de 10Hz puede introducir un error significativo.

La impedancia del SPT puede ser medida por la corriente inyectada tomada desde el sistema de potencia de la red. Los voltajes inducidos sobre los conductores de tierra y los conductores de prueba, modificaran la medida de la corriente de prueba para magnitudes de 50-100A.

1 GENERALIDADES SOBRE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

1.1 Conceptos básicos

La física acepta la convención que el globo terráqueo tiene un potencial eléctrico de cero voltios, en la práctica esto es muy importante, ya que el suelo es considerado como un conductor de la corriente eléctrica, de manera que un conductor conectado a ella pasa a tener el mismo potencial y este es también llamado "TIERRA" (earth, ground). El término MASA es utilizado cuando no se trata de una tierra verdadera, sino de un chasis, un soporte metálico o bastidor. También es representada comúnmente por las siglas GND o en algunos instrumentos por las letras E o G. En el tendido de cables es indicado con el aislante de color verde, amarillo, verde-amarillo o un cable desnudo.

La instalación de un SPT permite la protección de las personas y los bienes contra los efectos de las caídas de rayos, descargas estáticas, señales de interferencia electromagnética y contactos indirectos por corrientes de fugas a tierra. Por lo tanto, la ejecución correcta del SPT brinda importantes beneficios al evitar pérdidas de vidas, daños materiales e interferencias con otras instalaciones.

1.1.1 Puesta a tierra

Se le llama sistema de puesta a tierra (SPT), a la unión eléctrica entre todas las masas metálicas de una instalación y por lo menos un electrodo dispersor enterrado en el suelo, con el fin de conseguir una unión con la menor resistencia eléctrica posible entre las masas y la tierra. Si esa unión se realiza sin interposición de impedancia alguna, se dice que es una puesta a tierra directa, en caso contrario sería una vinculación indirecta.

Se entiende por masa a las partes metálicas accesibles de los elementos de la instalación y de los aparatos eléctricos, separados de las partes bajo tensión por su aislamiento funcional. Asimismo, los contactos indirectos son aquellos que se establecen con piezas conductoras (elementos inactivos) que, sin estar normalmente bajo tensión, pueden estarlo por un defecto de su aislamiento. Su peligrosidad está en que los usuarios se acerquen a las masas sin saber que están energizadas.

Con el SPT se busca que las corrientes de falla a tierra encuentren un camino más fácil, que el que ofrecería el cuerpo de una persona que tocara la carcasa metálica bajo tensión. De esta manera, como el SPT tiene una resistencia mucho menor que la del cuerpo humano, la corriente de falla circulará por la red de tierra, en lugar de hacerlo por el cuerpo de la persona.

Las normas de aplicación establecen que, en las instalaciones eléctricas en general se conectarán al SPT:

- a) Las instalaciones de pararrayos
- b) Las instalaciones de antenas, tanto de TV como de FM
- c) Los tomacorrientes y las masas metálicas de baños y cocinas
- d) Las estructuras metálicas y las armaduras de columnas y muros de hormigón
- e) Las instalaciones ejecutadas con tubos metálicos de: agua, y calefacción, así como calderas, depósitos, instalaciones de ascensores y montacargas, y en general todo elemento metálico que pueda entrar en contacto con un cable bajo tensión

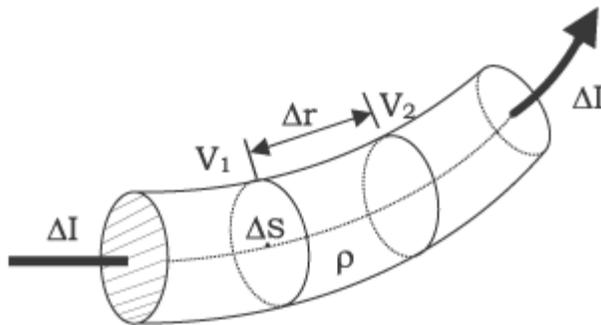
Por este motivo, en los aparatos y en la instalación eléctrica, hay que prever un cable de puesta a tierra que se conecte directa o indirectamente al SPT. En las instalaciones industriales deben realizarse tomas de tierra independientes para las masas metálicas de los aparatos eléctricos, para la conexión de los neutros de los transformadores de potencia y para la conexión de los descargadores o pararrayos.

1.1.2 Resistividad eléctrica de los suelos

Para determinar las condiciones eléctricas bajo las cuales ocurre la conducción de corriente en el suelo, se establece un modelo matemático a partir de:

- Un porción de suelo de sección (ΔS), longitud (Δr) y resistividad (ρ).
- Una diferencia de potencial (ΔV) en sus extremos, que hace circular una corriente (ΔI).

Fig. 1. Modelo analítico de suelo conductor de resistividad ($\Delta\rho$) homogénea



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

La resistencia (R) de un segmento de suelo (Δr) que se toma como conductor, al ser recorrido por una corriente (ΔI) está dada por la resistividad (ρ) del material que lo constituye y la geometría del conductor en la siguiente relación

$$R = \rho \frac{\Delta r}{\Delta s} \quad (1.1)$$

Por otro lado, según la **Ley de Ohm** la resistencia (R) para el mismo segmento, también estará dada por:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (1.2)$$

Igualando ambas expresiones de (R) e intercambiando términos se tiene:

$$\frac{\Delta V}{\Delta r} = \rho \frac{\Delta I}{\Delta s} \quad (1.3)$$

De esto, se obtiene que la intensidad del campo eléctrico (E) en la dirección (r) del suelo se comporta de la misma forma que en el aire o en el vacío; es decir, es conservativo y por lo tanto inversamente proporcional a la superficie de dispersión (ds) de la corriente (dI).

$$-E = \rho J = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (1.4)$$

A partir de este análisis se concluye que las siguientes ecuaciones son válidas para su aplicación en cualquier material puesto que existe un campo conservativo. (13-134)

La resistividad eléctrica ρ de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad σ como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material.

A partir de esta ecuación podemos despejar la resistividad:

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \quad (1.5)$$

donde $l = \Delta r$ es la longitud del segmento de suelo que se está analizando.

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ($\Omega \cdot m$). La conductividad se define como el inverso de la resistividad.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1.6)$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el siemens (S). La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad o presión.

Estrictamente hablando, todos los cuerpos son eléctricamente conductores dado que permiten, en mayor o menor medida, el paso de portadores de cargas eléctricas. Estos portadores pueden ser electrones o iones, hecho que permite distinguir entre dos tipos de conductividad: electrónica e iónica. Los cuerpos con conductividad electrónica se clasifican en metales y semiconductores. Los cuerpos con conductividad iónica se conocen como electrolitos si no presentan forma gaseosa.

En los metales los electrones de valencia de sus átomos pueden moverse entre la red cristalina que éstos forman, sin estar vinculados a ninguno en particular. La facilidad de movimiento de los electrones y su gran número provocan una conductividad muy elevada. Su resistencia aumenta con la temperatura y con el contenido de impurezas. La resistividad de los metales a temperatura normal varía entre 10^{-8} y $10^{-7} \Omega \cdot m$. Son pocos y muy escasos los componentes de la corteza terrestre que posean conductividad metálica. Entre ellos se cuentan los metales nativos (oro, plata, cobre, estaño, aluminio, etc.) y quizá algún mineral poco abundante como la ullmanita (NiSbS).

Los semiconductores son muchos y de gran importancia práctica. Su resistividad depende de su contenido de impurezas. Además, su conductividad aumenta con la temperatura. Por ello, no se puede representar la resistividad de un mineral con un dato único, sino que puede variar dentro de límites amplios.

En los cuerpos dieléctricos o aisladores, los electrones están fuertemente ligados al átomo. Esto puede deberse a que existan enlaces covalentes o iónicos. En este último caso la red cristalina forma un electrolito sólido. La mayoría de los minerales pertenecen a este grupo. A temperaturas normales las resistividades son muy altas, generalmente superiores a $10^7 \Omega \cdot m$. Son minerales dieléctricos el azufre, la blenda, la calcita, el cinabrio, el cuarzo, las micas y el petróleo entre otros.

1.1.3 Factores que influyen en la resistividad del terreno

Desde el punto de vista eléctrico, un terreno se caracteriza por su resistividad. Es importante que la resistividad sea lo más baja posible. Puesto que los terrenos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, un terreno dado tendrá una resistividad aparente que promedia los efectos de las diferentes capas que componen el terreno.

La resistividad aparente, no es constante en el tiempo y se ve afectado por varios factores, siendo los principales⁽⁴⁰⁾:

- a) Naturaleza del terreno
- b) Humedad
- c) Temperatura

- d) Salinidad
- e) Estratigrafía
- f) Variaciones estacionales
- g) Factores de naturaleza eléctrica

1.1.3.1 Naturaleza del terreno

La resistividad varía de un terreno a otro, ya que este, es una composición de rocas, gases, agua y materiales orgánicos e inorgánicos que varía de un lugar a otro. El uso del suelo, como medio conductor de corrientes eléctricas, depende de su conductividad, por lo que requiere de la presencia de sustancias solubles y concentradoras de humedad, que varían según los terrenos y pueden ser mejoradas técnicamente.

Normalmente, el suelo no es buen conductor de la electricidad, sin embargo, la dispersión de la corriente permite una capacidad de conducción aceptable que también es de naturaleza electrolítica y electroquímica, y depende principalmente de la porosidad del material, que contiene la humedad y las sales solubles, y acompaña a otras características como la granulometría, la compactación y la temperatura que controlan su conductividad, especialmente tratándose de los estratos superficiales donde las corrientes mayores de 10 A ocasionan por efecto Joule, el incremento local de la resistividad.

A medida que las rocas son más compactas y antiguas, su resistividad aumenta, puesto que sus materiales constituyentes, tales como el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc., son prácticamente aislantes. Sólo si la roca contuviese minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora. Sin embargo, todas las rocas tienen poros, los cuales están ocupados total o parcialmente por electrolitos, lo que ocasiona que, en conjunto, las rocas se comporten como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos. La resistividad de las rocas puede variar en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros.

Tabla I. Resistividades referenciales de suelos naturales genéricos

Tipo de suelo	ρ (Ohm-m)
Limos, arcillas, suelo vegetal y de cultivo	10 - 100
Tierra fina, turbas, concreto húmedo (suelo)	100 - 300
Tierra aluvial, arenas firmes, suelo seco	300 - 800
Arena eólica, lecho de río, cascajo	800 - 3000
Rocas estratificado, fracturadas, monolíticas	3000 - 10000
Suelos de feldespatos, micas, cuarzos	5000 - 30000
Concreto normal exterior (seco)	10000 - 50000

Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

1.1.3.2 Estratigrafía

Los suelos tienen conformación estratificada, con capas superpuestas de diferente resistividad, que se han formado debido a los procesos de meteorización, transporte y acumulación de productos sólidos a través de las

edades geológicas. Cuando los suelos son planos, las capas son gruesas y laminares (litoral costero, selva baja), y cuando son accidentados son delgados e irregulares (sierra, selva alta).

Fig. 2. Perfil geográfico del suelo



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

En ocasiones ocurre que cuando se utilizan picas profundas, se atraviesan varias capas de terreno de naturaleza diferente y, por lo tanto, resistividad diferente. Al medir con el telurómetro la resistividad aparente del terreno, dará un valor medio, de resistividades de cada capa afectada por el espesor de las mismas. A veces ocurre que una sola capa de terreno presenta una resistividad tan baja que hace imperceptible la de las demás. Ejemplo, cuando el electrodo alcanza una zona con agua.

La resistividad de algunos minerales, y de las rocas que estos forman, varía según la dirección de medida que se toma, es decir, que presentan *anisotropía*. La formación de estratos puede producir anisotropía. Tal es el caso

de las rocas sedimentarias. En general, este efecto será débil dada la aleatoriedad de las orientaciones de los minerales en la roca.

1.1.3.3 Humedad

La humedad es inversamente proporcional a la resistividad. De entre todos los factores, la humedad es el más importante; además, es el que se puede alterar con mayor facilidad mediante la lluvia o el riego del suelo. Diferentes grados de humedad para un mismo terreno darán lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo.

La humedad facilita la disociación de las sales en iones, que transportan la corriente eléctrica a través del terreno. Si hay más humedad, hay más disociación y mayor movilidad de estos elementos dentro del terreno. La resistividad de las rocas puede variar en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros.

El agua pura es muy poco conductora a causa de su muy reducida disociación. La resistividad del agua destilada es de unos $10^5 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ por lo que se considera como aislante; sin embargo, las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan una conductividad apreciable, pues siempre tienen disuelta alguna sal, generalmente NaCl. En la tabla 2 se presentan algunos valores de resistividad del agua.

Tabla II. Valores de referencia de la resistividad del agua según su procedencia

Tipo de agua	ρ (ohm-m)
Meteóricas (lluvia atmósfera limpia)	800 – 1200
Meteóricas (lluvia atmósfera industrial)	30 – 400
Superficiales puras (filtraciones del suelo)	\approx 3000
Superficiales salobres (mar y minerales)	\approx 0.1
De anomalías geotérmicas	0.03 - 0.3
Subterráneas	1 - 20
Estancadas	30 – 150
Filtraciones rocosas	30 – 1000

Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

1.1.3.4 Temperatura

La resistividad del terreno también depende de la temperatura, pues esta influye notablemente en la resistividad de los fluidos que hay en los poros del suelo y de las rocas. Un descenso de la temperatura provoca un aumento de la resistividad y en el punto de congelación el agua pasa a ser un dieléctrico mal conductor debido a que esta pasa al estado sólido, evitando de esta manera la disociación de las sales y el movimiento de los electrolitos.

La temperatura del terreno es directamente proporcional a la temperatura exterior, pero también depende de la profundidad a la que midamos y del tiempo que permanezcan las bajas temperaturas, puesto que el terreno es un gran almacén de calor y tiene una gran inercia térmica.

A -5°C se puede congelar el agua de una pequeña capa superficial del terreno. Si esta temperatura se mantiene durante muchas horas, el grosor de esta capa irá aumentando progresivamente. Este factor hay que tenerlo muy presente en zonas de sierra o en lugares fríos de la meseta.

1.1.3.5 Salinidad

A lo largo de los apartados anteriores, se ha visto la gran influencia que tienen las sales sobre el terreno, varían considerablemente la resistividad aparente y llegan incluso a convertir terrenos malos conductores en buenos conductores.

Uno de los sistemas mas utilizados para aumentar la resistividad del terreno, es añadir sal y posteriormente regar. Los aditivos químicos más conocidos son la sal industrial combinada en capas con carbón, que es la fórmula clásica, y los productos denominados sales higroscópicas o gel. La sal industrial (C1Na) multiplica la conductividad del terreno, el carbón conserva un cierto nivel de humedad y ayuda a que el agua descienda a niveles más bajos, hasta el extremo inferior del electrodo.

Las sales higroscópicas, como lo indica su nombre, tienen la cualidad de conservar una mayor cantidad de humedad en el volumen en que están contenidas. Es algo análogo al efecto de una esponja, eso se denomina higroscopía.

1.1.3.6 Variaciones estacionales

Varios de los factores antes descritos, como son la humedad, temperatura, salinidad, etc., se ven afectados a lo largo del año, debido a las variaciones estacionales y climatológicas, sobre todo en las capas superficiales del terreno. Si se introducen los electrodos a mayor profundidad, las variaciones climáticas afectarán menos al terreno. Por esto, las mediciones del SPT se deben efectuar anualmente en la época más desfavorable, en la que el terreno esté más seco.

1.1.3.7 Factores de naturaleza eléctrica

Existen factores de naturaleza eléctrica que pueden afectar a la resistividad del terreno, tales como el gradiente del potencial y la magnitud de la corriente de puesta a tierra. Respecto al primero, la resistividad no se ve afectada hasta que el gradiente no alcanza un cierto valor crítico (varios kV/cm) lo que origina la formación de pequeñas áreas eléctricas en el suelo que hacen que el electrodo se comporte como si fuera de mayor tamaño.

La magnitud de la corriente de puesta a tierra puede también modificar el comportamiento del electrodo de tierra si su valor es muy elevado, bien por provocar gradientes excesivos o bien por dar lugar a calentamientos en torno a los conductores enterrados que provoquen la evaporación del agua.

1.1.4 Respuesta Transitoria del SPT

Para que al circular una corriente de cortocircuito o descarga atmosférica hacia el SPT, no se origine una elevación de potencial y por consiguiente riesgos de daños al personal y equipos, es necesario garantizar caminos de baja impedancia.

Hasta Ahora, típicamente se han diseñado los SPT pensando en bajas resistencias, las cuales corresponden al comportamiento del sistema ante corrientes de baja frecuencia y en régimen permanente; sin embargo, se conoce que el comportamiento de un sistema de puesta a tierra posee tres componentes fundamentales:

- a) Respuesta resistiva (drenaje efectivo de corriente)
- b) Respuesta capacitiva
- c) Respuesta inductiva

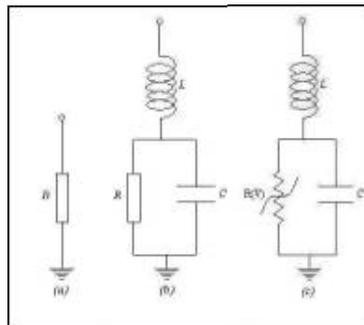
En la literatura, se pueden encontrar diferentes modelaciones de configuraciones sencillas de puesta a tierra, haciendo uso de estas tres componentes⁽⁴³⁾.

En la figura 3, pueden observarse tres modelos:

- a) Este es el comúnmente utilizado y solo toma en cuenta el parámetro resistivo.

- b) Este modelo toma en cuenta los parámetros inductivo-capacitivo, y por lo tanto el comportamiento en alta frecuencia de esta configuración.
- c) Se diferencia respecto al modelo (b), en el hecho que el parámetro resistivo depende de la tensión que aparezca en el electrodo el cual es directamente proporcional a la densidad de corriente que incida sobre éste (fenómeno de ionización).

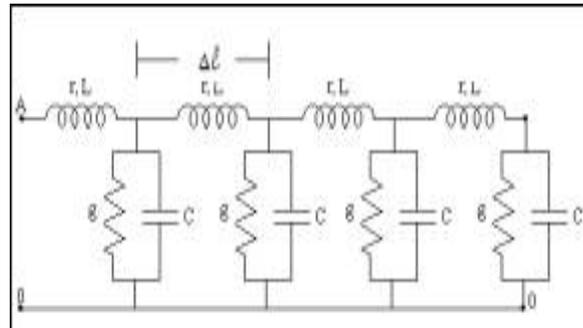
Fig. 3. Modelos utilizados para representar un electrodo de puesta a tierra vertical.



Fuente: M. Lozano. 2002.

En la figura 4, puede observarse el modelo circuital más sencillo, para simular un electrodo horizontal; si se desea tomar en cuenta el fenómeno de ionización, el parámetro G debe variar con la tensión en el nodo, similar al caso del electrodo vertical.

Fig. 4. Modelo utilizado para representar un electrodo de puesta a tierra horizontal



Fuente: M. Lozano. 2002.

Al aplicar a un electrodo de puesta a tierra (horizontal o vertical) una onda de corriente con un elevado di/dt , durante los primeros instantes va a existir una marcada influencia del parámetro inductivo en lo que es la elevación de voltaje en los terminales de dicho electrodo, de hecho, durante los primeros microsegundos, el sistema responde a través de su impedancia ante impulso, la cual dependiendo de los parámetros L y C , puede poseer un alto valor.

Los parámetros L y C , vienen determinados por las características del suelo, tales como: resistividad (ρ), permitividad eléctrica (ϵ) y permeabilidad magnética (μ). Debido a esto, se considera que no tomar en cuenta la respuesta transitoria del sistema de puesta a tierra que se esté estudiando, es modelar de forma incompleta al sistema y por lo tanto se corre el riesgo de que ante la ocurrencia de un fenómeno transitorio, se produzcan fallos que pueden llevar consigo altos costos por interrupción de servicio, por reposición de equipos dañados, etc.

En la literatura internacional se presentan diversos modelos para estudiar las respuestas de los SPT ante eventos transitorios; sin embargo, es poca la información respecto a mediciones de respuestas obtenidas tras experimentación en campo, lo cual lleva como consecuencia que muy pocos de los modelos encontrados sean confiables ya que no han sido verificados efectivamente con pruebas.

1.2 Partes que comprende la puesta a tierra

El tercer cable, en un sistema eléctrico monofásico, o línea a tierra, es un conductor de cobre conectado a un electrodo contenido en un pozo del patio o jardín, o en un sótano. El revestimiento de este cable es comúnmente de color amarillo o verde. Generalmente, va conectado a una bornera contenida en una caja o en un tablero.

En los sistemas eléctricos trifásicos es el cuarto o quinto cable, luego de las tres fases (R, S y T) y el neutro (N), este último corresponde al suministro en "estrella"; comúnmente se conecta el neutro a tierra.

El electrodo es el elemento conductor que se utiliza para transferir la corriente a otro medio. En el caso de un SPT es una varilla, de sección circular de cobre (Cu) o acero revestido de Cu (denominado Coperweld) y, en otros casos, una platina de sección rectangular, que es enterrada en un pozo vertical u horizontal de tierra cernida y tratada químicamente.

El uso del suelo, como medio conductor de corrientes eléctricas, depende de su conductividad, que es de naturaleza electroquímica y electrolítica. Esto significa que para mantener una baja resistividad se requiere la presencia de sustancias solubles y concentradoras de humedad, que varían según los terrenos y pueden ser mejoradas técnicamente.

Todo el SPT consta de las siguientes partes:

- a) Tomas a tierra
- b) Líneas principales de tierra
- c) Derivaciones de las líneas principales de tierra
- d) Conductores de protección

En otras palabras, el conjunto de conductores, así como sus derivaciones y empalmes, que forman las diferentes partes de las puestas a tierra, constituyen el SPT.

Con carácter general, respecto a los materiales que se emplean en la realización de los SPT, se debe tener mucho cuidado de que sean capaces de soportar las condiciones más severas con respecto a materiales metálicos, corrosión galvánica intergranular, corrosión galvánica por contacto entre diferentes metales y aleaciones, oxidación etc., materiales sintéticos, rayos solares, elevación brusca de temperatura, congelamiento, dilatación o contracciones por envejecimiento y fragilidad.

Los elementos que intervienen en toda puesta de tierra son:

- a) **El circuito de puesta a tierra**, que canaliza las corrientes de falla o descargas atmosféricas
- b) **El terreno**, encargado de absorber las descargas
- c) **El electrodo**, elemento de unión entre el terreno y el circuito

Estos elementos se pueden dividir en cinco categorías:

- a) El suelo
- b) Tomas de tierra
- c) Línea principal de tierra
- d) Derivaciones de la línea principal de tierra
- e) Conductores de protección

1.2.1 El suelo

El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y materiales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que la resistividad del suelo aparte de depender de su composición intrínseca, dependa también de factores externos (como los mencionados en la sección anterior), que pueden provocar que un mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo. Además, cuando se mide la resistividad del terreno en un punto, por cualquier método, el valor que se obtiene es una resistividad media o aparente que promedia el efecto de las diferentes capas que componen el terreno.

La evaluación eléctrica de los suelos, se hace basándose en medidas de Resistividad; la información geológica propone tablas genéricas con rangos de referencia, para suelos (tabla 1) y para las aguas que los recargan (tabla 2); por otro lado, disponiendo de una muestra «representativa», también se hacen medidas de laboratorio, en ambos casos los datos obtenidos no siempre son correctos. La medición más exacta es la medida de campo, tomando todas las previsiones para que los errores sean mínimos.

1.2.2 Tomas de tierra

La toma de tierra es el elemento de unión entre el terreno y el circuito eléctrico instalado. Esta consta de tres elementos fundamentales que son:

- a) Electrodo
- b) Líneas de enlace con tierra
- c) Puntos de puesta a tierra

1.2.2.1 Electrodo de puesta a tierra

Son las varillas que se clavan en terrenos más o menos blandos y que sirven para encontrar zonas más húmedas y con menor resistividad eléctrica. Son muy importantes en terrenos sin vegetación y cuya superficie al quedar expuesta a los rayos del sol, está completamente seca.

Los electrodos se fabrican con tubos o varillas de acero galvanizado o bien con varillas de copperweld, debido a su resistencia mecánica y su resistencia a la corrosión. Ahora bien, todo metal convertido en electrodo e introducido en un terreno más o menos húmedo, se corroe debido a las siguientes causas:

- a) Reacción química entre el agua del terreno y el electrodo
- b) Ataque de los agentes químicos contenidos en el terreno
- c) Corrientes eléctricas que atraviesan el terreno
- d) Corrientes galvánicas

El acero galvanizado, se puede usar en terrenos cuya constitución química no ataque a dicho material. En terrenos con componentes corrosivos, se utiliza el copperweld, que consiste en una varilla de hierro a la cual se adhiere una lámina de cobre. Este cobre está soldado sólidamente y en forma continua a la varilla de acero. Este material combina las ventajas de la alta conductividad del cobre con la alta resistencia mecánica del acero. Tiene buena conductividad, excelente resistencia a la corrosión, buena resistencia mecánica para ser clavada en el terreno y se puede conectar a los cables del SPT a través de conectores.

Aunque los electrodos más utilizados son los descritos anteriormente, también existen otros tipos de electrodos, que pueden ser: placas, conductores enterrados horizontalmente, tuberías de agua, estructuras de concreto, etc. Estos electrodos se estudiarán con más detalle cuando se hable de los materiales utilizados para construir un SPT.

1.2.2.2 Líneas de enlace con tierra

Están formadas por los conductores que unen el electrodo, anillo o malla, con el punto de puesta a tierra. Estos conductores son de cobre o de algún otro metal con alto punto de fusión y su dimensionamiento está de acuerdo con alguna de estas premisas: ⁽²¹⁻²⁰⁸⁾

- a) La corriente máxima de falla no debe provocar en el conductor y en los empalmes, temperaturas cercanas al punto de fusión del material. Se debe considerar que su duración será un máximo de 2 segundos, pues es el tiempo máximo que las protecciones tardan en operar.

- b) En ningún caso el área del cable que forma la línea de enlace con tierra debe ser menor de 35 mm^2 en conductores de cobre o de sección equivalente en otro material.

1.2.2.3 Puntos de puesta a tierra

Está formado por un sistema que permita la conexión y desconexión para poder aislar el circuito de puesta a tierra de la edificación, de la toma de tierra, de modo que se puedan hacer mediciones en ella. En el punto de puesta a tierra es donde se mide el valor de la resistencia de la toma de tierra.

1.2.3 Línea principal de tierra

Es la parte del circuito del SPT, que está formado por conductores de cobre y que se usa para conectar los conductores de protección, la cubierta del equipo de conexión, y el conductor neutro (cuando el sistema esté puesto a tierra), al electrodo. Su recorrido debe ser lo más corto posible y sin cambios bruscos de dirección.

Para un SPT tiene que usarse un puente de unión principal sin empalme, para conectar el conductor de protección y la cubierta del equipo de conexión al conductor neutro del sistema. El puente de unión principal deberá ser un conductor, una barra, un tornillo o un conductor similar adecuado.

La conexión del conductor principal a un electrodo a tierra debe ser accesible y hacerse de una manera que asegure una puesta a tierra permanente y efectiva. Cuando sea necesario asegurar esta condición para un sistema metálico de tuberías que sea usado como electrodo, se debe hacer un puente efectivo alrededor de todas las uniones y secciones y de cualquier equipo que sea susceptible de ser desconectado para reparaciones o reemplazos, a menos que la conexión sea a un electrodo embutido en concreto o enterrado que no se requiera que sea accesible ^(30: 250-94 Exc. a y b).

1.2.4 Derivaciones de la línea principal de tierra

Las derivaciones de las líneas de tierra están formadas por conductores que unen la línea principal de tierra con los conductores de protección o directamente con las masas.

1.2.5 Conductores de protección

El conductor de protección debe estar presente en todas las instalaciones de baja tensión, sin importar el esquema de tierra adoptado, y sirve para asegurar la continuidad del circuito de tierra.

En un circuito terminal el conductor de protección une las masas de los equipos y también el terminal de tierra de las alimentaciones de corriente. En un circuito de distribución, el conductor de protección conecta el terminal de tierra del tablero de donde parte el circuito al terminal de tierra del tablero de alimentación del circuito.

En el circuito de puesta a tierra, los conductores de protección unen las masas a la línea principal de tierra. En otros casos, reciben igualmente el nombre de conductores de protección aquellos conductores que unen las masas:

- a) a otras masas
- b) a elementos metálicos distintos de las masas
- c) a un relé de protección

En los suministros de la empresa eléctrica encargada de la distribución del servicio eléctrico en baja tensión, no deberá unirse en ningún lugar el conductor neutro con la red de puesta a tierra del cliente.

1.3 Materiales de puesta a tierra

1.3.1 Materiales que constituyen el pozo de puesta a tierra

(31: 350.072)

Se puede clasificar los materiales que forman el pozo de puesta a tierra, de la siguiente manera:

- a) Material circundante al electrodo
- b) Elementos químicos para reducir la resistencia de puesta a tierra
- c) Conectores entre el electrodo y conductor de puesta a tierra
- d) Protección externa del pozo

La elección e instalación de los materiales debe ser tal que:

- a) El valor de la resistencia de puesta a tierra esté conforme a las normas de protección y se mantenga la estabilidad de la resistencia.
- b) Las corrientes de falla a tierra y fuga circulen sin peligro, según sollicitaciones térmicas y electromecánicas.
- c) La solidez y protección mecánica estén aseguradas, según condiciones estimadas de influencia externa.

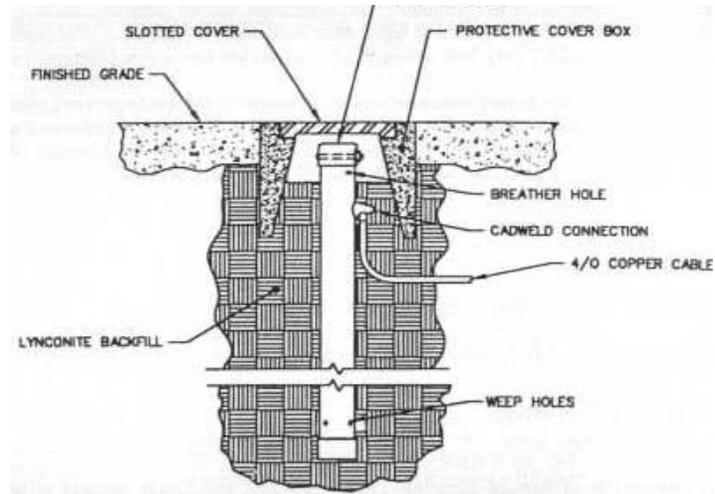
Ahora bien, el problema de lograr una resistencia baja en la roca así como en otros suelos de alta resistividad, está asociado con el material en contacto con el electrodo y la compactación que éste recibe al rellenar el pozo.

El relleno ideal debe compactarse fácilmente, no ser corrosivo, ser buen conductor eléctrico, y no debe dañar el ambiente, ni perjudicar la vida o la fauna. La bentonita entre otros compuestos como el sulfato de magnesio, el sulfato de cobre, o compuestos químicos patentados (THOR GEL, GEM, etc.) cumple con esos requisitos.

La bentonita es una arcilla consistente en el mineral montmorillonita, un silicato de aluminio, y tiene la particularidad de absorber hasta cinco veces su peso de agua y de hincharse hasta 13 veces su volumen seco. Y tiene una resistividad de $2.5 \Omega \cdot m$ con humedad del 300%.

Aparte del relleno con alguno de los compuestos mencionados, existen otros métodos químicos más. En el primero, en un registro junto a la varilla se colocan unos 30 cm de los compuestos.

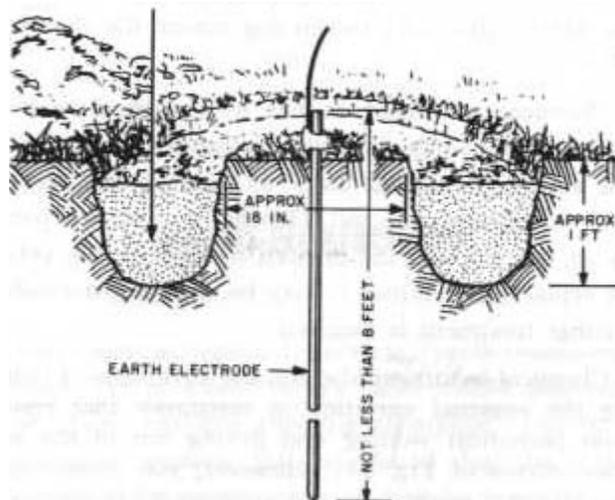
Fig. 5. Varilla electroquímica



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

Este método es efectivo donde hay poco espacio como en banquetas o estacionamientos.

Fig. 6. Zanja alrededor del electrodo de tierra con compuestos químicos que mejoran la resistividad



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

El otro método para mejorar la resistividad del terreno, es excavar una zanja alrededor de la varilla y llenarla con unos 20 o 40 Kg. de los compuestos químicos mencionados arriba, diluyendo con agua.

La primera carga dura unos dos o tres años y, las posteriores aún más, por lo que el mantenimiento es menos frecuente con el tiempo.

Por último, se puede utilizar uno de los cementos puzolánicos grafiticos conductores (EarthLink 101, etc.) de la siguiente manera: se cubre el cable del electrodo [4/0 AWG] colocado horizontalmente en una zanja de unos 75 cm de profundidad, con una capa de cemento seco de unos 5 cm de grueso y 50 cm de ancho. Con el tiempo, el cemento toma la humedad del suelo y endurece. Este método desarrollado en Japón en los 70s, tiene la ventaja que no requiere mantenimiento, es antirrobo, y por el tipo de material, no se corroen los cables con el tiempo, y, se adapta perfectamente a los lugares donde la capa superficial es poco profunda y de alta resistividad.

1.3.2 Conductores de protección ^(31: 370.053)

El conductor de protección debe ser de cobre, resistente a cualquier condición de corrosión o estar adecuadamente protegido contra esta, no debe ser de cobre con aluminio o de aluminio porque este se corroe cuando está en contacto con la tierra o con el cemento, sin embargo, puede ser sólido o cableado, aislado, cubierto o desnudo. El conductor de protección debe ser instalado en un solo tramo, sin uniones ni empalmes, con excepción de las barras colectoras que sí pueden ser unidas.

1.3.2.1 Tipos de conductores de protección

El conductor de protección instalado junto con los conductores del circuito, puede ser uno o más, o una combinación de los siguientes:

- a) Un conductor de cobre u otro material resistente a la corrosión. Este conductor puede ser sólido o cableado; aislado, cubierto, o desnudo; y en forma de un conductor o de una barra colectora de cualquier forma
- b) Tubería metálica pesada, tubería metálica intermedia, tubo metálico liviano o tubería metálica pesada flexible aprobada para el uso
- c) Las armaduras y cubiertas metálicas de los cables
- d) Las bandejas para cables
- e) Otras canalizaciones específicamente aprobadas para la puesta a tierra

1.3.2.2 Sección de los conductores de protección

Cuando los conductores estén en paralelo y en canalizaciones múltiples, el conductor de protección debe estar en paralelo. La sección de este debe ser dimensionada basándose en la capacidad nominal de corriente de los dispositivos de protección contra sobrecorriente que protegen a los conductores del circuito en la canalización y deberá estar de acuerdo con la Tabla NEC 250-95.

Cuando los conductores se dimensionan para compensar la caída de tensión, los conductores de protección, se deben dimensionar en forma proporcional. Deben considerarse las siguientes excepciones:

- a) El conductor de protección no menor de 0,75 mm² de cobre y no menor que los conductores del circuito, si forma parte integral de un cordón registrado, podrá usarse para los equipos conectados por cordón que deben ser puestos a tierra, cuando el equipo esté protegido por un dispositivo de protección contra sobrecorriente de capacidad nominal menor a 20 A.
- b) El conductor de protección no necesitará ser mayor que la sección de los conductores del circuito que alimentan el equipo.
- c) Cuando una canalización o armadura de cable o cubierta es utilizada como conductor de protección.

Este conductor, si es de calibre 4 o mayor, no requiere de protección, excepto en casos donde esté expuesto a daño físico severo. En caso de ser calibre 6 debe fijarse a la construcción o, debe correr por un tubo conduit. Los calibres menores, deben correr siempre por tuberías conduit. En el caso de las tuberías conduit, éstas deben estar conectadas a tierra en ambos extremos; esto incluye las tuberías que cubren el cable de puesta a tierra de las acometidas residenciales.

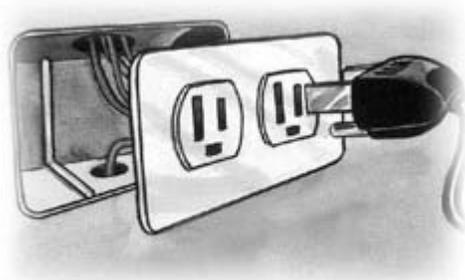
1.3.3 Tomacorrientes con protección a tierra para uso domestico y uso general similar ^(31-370.054)

Se recomienda utilizar para tensión mayor a 50 V pero no superior a 250 V y corriente no mayor a 16 A, enchufes y tomacorrientes fijos o portátiles para corriente alterna, con protección a tierra, o polarizados. Esta norma se aplica también a enchufes incorporados en cordones y a enchufes y tomacorrientes incorporados en cordones de extensión. También se aplica a enchufes y tomacorrientes que son componentes de un artefacto.

Esta norma técnica no se aplica a:

- a) Enchufes, tomacorrientes y adaptadores para propósito industrial
- b) Artefactos adaptadores
- c) Tomacorrientes fijos combinados con fusibles, interruptores automáticos, etc.

Fig. 7. Tomacorriente con protección a tierra o polarizado



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

El terminal de puesta a tierra de un tomacorriente polarizado debe ser conectado a una caja de salida puesta a tierra mediante un puente de unión, es decir que se debe conectar entre cada uno de los conductores de protección y la caja metálica.

Debe tomarse en cuenta las siguientes excepciones:

- a) Cuando la caja de salida es de superficie, el contacto metálico entre el soporte del dispositivo y la caja se puede usar para establecer el circuito de puesta a tierra
- b) Las cajas de piso diseñadas y registradas para proporcionar una continuidad a tierra satisfactoria entre la caja y el dispositivo

Cuando entren a una caja más de un conductor de protección de un circuito derivado, todos los conductores deberán tener un buen contacto eléctrico entre sí y estar dispuestos de tal manera, que la desconexión de un tomacorriente, aparato u otro dispositivo alimentado desde la caja, no interfiera o interrumpa la continuidad de la puesta a tierra.

1.3.4 Clases de electrodos ^(31-370.056)

El electrodo dispensor o de puesta a tierra es el conductor (jabalinas, perfiles, cables desnudos, cintas, etc.) o conjunto de conductores en contacto con la tierra que garantizan una unión íntima con ella.

Cuando los electrodos de tierra están lo suficientemente distantes, como para que la corriente máxima que pasa por uno de ellos no modifique el potencial de los otros, se dice que los electrodos de tierra son independientes.

Los electrodos de puesta a tierra pueden ser uno o un grupo de los descritos a continuación:

1.3.4.1 Electrodo de varilla de acero, recubierto con cobre (copperweld)

Su diámetro nominal debe ser mayor a 12 mm y su longitud mayor de 2.40 m, la profundidad mínima a la cual debe introducirse es de 2.40 m. Si se encuentra roca a menos de 1,25 m de profundidad, el electrodo debe enterrarse horizontalmente.

Es muy importante tomar en cuenta que por norma ^(30: 250-26c), los electrodos de puesta a tierra de las instalaciones eléctricas deben estar accesibles y preferiblemente en la misma zona del puente de unión principal del sistema.

De acuerdo con la norma ^(30: 250-81), el sistema de electrodos de puesta a tierra se forma interconectando los siguientes tipos de electrodos (siempre que existan):

- a) Tubería metálica de agua enterrada
- b) Estructura metálica del inmueble
- c) Electrodo empotrado en concreto
- d) Anillo de tierra

En caso de no disponer de alguno de los anteriores, se deben usar uno o más de los electrodos especialmente contruidos:

- a) Electrodos de varilla o tubería
- b) Electrodos de placa
- c) Otras estructuras o sistemas metálicos subterráneos cercanos

Los tipos de electrodos fuera de la norma son:

- a) Tuberías de gas enterradas. Porque en los Estados Unidos las compañías suministradoras de este fluido se opusieron a ello.
- b) Electrodos de aluminio. Aunque en Europa se han utilizado, los comités del NEC se opusieron a incluirlos porque el aluminio es un material que se corroe con mayor facilidad que el cobre y los compuestos químicos que se le forman no son buenos conductores eléctricos.

1.3.4.2 Tubería metálica de agua enterrada

Para que una tubería de agua pueda usarse como electrodo de puesta a tierra, debe reunir los siguientes requisitos:

- a) Por lo menos tener 3 m en contacto directo con la tierra
- b) Eléctricamente continua hasta el punto de conexión, puenteando el medidor del agua, si está colocado en una posición intermedia

La única desventaja de su uso es que debe complementarse con un electrodo adicional, de cualquiera de los tipos mencionados arriba. Por otro lado, la American Water Works Association está proponiendo que se eliminen las tuberías de agua como electrodos principales, debido a que con el uso cada vez mayor de equipos electrónicos, la corriente de fuga es en parte corriente continua, lo que provoca corrosión galvánica en las tuberías.

No hay que confundir este tipo de electrodo, con el requerimiento de la norma ^(30: 250-80a), de conectar los sistemas interiores de tuberías para agua al puente de unión principal o a los electrodos de puesta a tierra, con el fin de poner a tierra los equipos.

1.3.4.3 Estructura metálica del edificio

La estructura metálica de los edificios puede ser usada, siempre que su impedancia a tierra sea baja. Para que la impedancia sea pequeña, se deben unir las columnas a las partes metálicas de la cimentación con conductores según los calibres de los conductores de puesta a tierra que indica la norma ^(30: 250-94) y, en caso de haber sellos formados por películas plásticas, éstos se deben puentear.

1.3.4.4 Electrodo de concreto armado o ufer

En las estructuras nuevas, el concreto armado puede ser utilizado como electrodo principal. Éstas deben tener por lo menos 6 metros de una o más varillas de acero de no menos de 13 mm de diámetro localizado en y cerca del fondo de un cimiento o zapata, empotrado al menos 50 mm en el concreto ^(30: 250-81c).

El concreto tiene una estructura química alcalina y una composición que atrae y retiene humedad. La combinación de estas características permite al concreto exhibir una resistividad consistentemente de unos $30 \Omega \cdot m$. Los electrodos de concreto tienen una resistencia a tierra mayor o igual que las varillas de cobre de un tamaño compatible, siempre que estén en contacto con suelos con resistividad de $50 \Omega \cdot m$ o menor.

Las pruebas indican que la resistencia típica a tierra de una base para columna de anclaje, medida en los pernos es de alrededor de 50Ω , sin usar métodos especiales. De allí que la resistencia efectiva de un edificio de estructura metálica con veintitantas columnas en paralelo sea de menos de 5Ω , siempre y cuando se asegure que la estructura esté conectada a las varillas. Para ello, se suelda por métodos de fusión un cable de acero a las varillas, mismo que se conectará a su respectiva columna.

1.3.4.5 Anillo de tierra

Un anillo de tierra consiste en un conductor de cobre desnudo, de sección transversal no menor al calibre 2 AWG y de longitud no menor a 6 m enterrado a una profundidad de 800 mm y, que rodee al edificio o estructura.

Estos anillos de tierras se emplean para circundar una fábrica o un sitio de comunicaciones y para proveer un plano equipotencial alrededor de edificios y equipos.

En subestaciones eléctricas, el anillo se forma utilizando un cable de cobre de calibre alrededor de 1000 MCM, que rodea el área ocupada por el equipo de la subestación. A este cable se conectan las derivaciones a cada aparato mediante un cable más delgado que podría ser 500 MCM o 4/0 AWG.

En este sistema se eliminan las grandes distancias de descarga y los potenciales peligrosos se reducen al disiparse la corriente de falla por varios caminos en paralelo.

1.3.5 Electrodo de puesta a tierra especialmente construido

Cuando no se dispone de alguno de los electrodos mencionados en el punto anterior, se pueden usar uno o más de los electrodos siguientes (según NOM 250-83c):

- a) Electrodo de varilla o tubería
- b) Electrodo de placa
- c) Otras estructuras o sistemas metálicos subterráneos cercanos

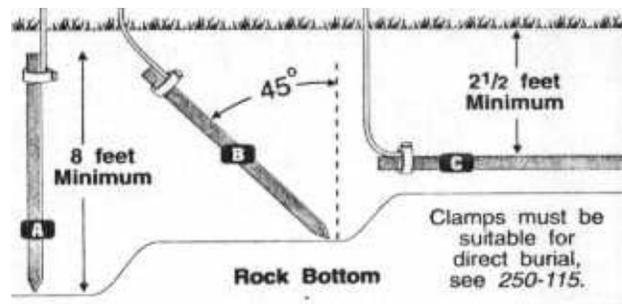
1.3.5.1 Electrodo de varilla o tubería

Los electrodos de varilla y tubo, no deben tener menos de 2,40 m de largo y deben instalarse de tal modo que por lo menos 2,40 m de su longitud esté en contacto con la tierra (30: 250-83c).

Las varillas de metales no ferrosos deben estar aprobadas y tener un diámetro mayor a 13 mm de diámetro, y las demás de por lo menos 16 mm. Las tuberías deben tener un diámetro no inferior a 19 mm, y si son de acero, deben tener una protección contra corrosión en su superficie.

Las varillas de acero con un recubrimiento de cobre de 10 milésimas duran un promedio de 35 años en un suelo promedio; si tiene un recubrimiento de 13 milésimas dura hasta 45 años. En cambio, una varilla de acero galvanizado tiene una vida estimada de 15 años.

Fig. 8. Formas en las que se puede enterrar un electrodo en la tierra



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

Estos electrodos se aplican al suelo mediante percusión hasta que alcanzan la profundidad adecuada. En caso de terrenos rocosos o de talpetate, las varillas no pueden meterse de esa manera porque se doblan o simplemente no pueden entrar.

Cuando la roca está a menos de 2,40 m, estos electrodos pueden meterse en diagonal hasta con un ángulo de 45° de la vertical. Pero, si no es este el caso, se deben enterrar horizontales en una zanja abierta para el caso a 800 mm de profundidad por lo menos.

La alternativa al golpeado es perforar un agujero, instalar la varilla y rellenar nuevamente el agujero.

La resistencia de contacto de una varilla está dada por la fórmula de Dwight del M. I. T. ⁽⁴⁹⁾:

$$R = \frac{\rho \left[\ln \left(\frac{4L}{a} \right) - 1 \right]}{2\pi L} \quad (1.7)$$

donde:

ρ : resistividad del terreno en ζ *cm.

L: largo de la varilla en cm.

a: diámetro de la varilla en cm.

La fórmula de Dwight para el caso de varilla enterrada en doble capa de tierra:

$$R = \frac{\rho_0 [LN a_1 - LN a_0]}{2\pi L} - \frac{\rho_1 [LN(4L) - 1 - LN(a_1)]}{2\pi L} \quad (1.8)$$

donde:

ρ_0 : resistividad del terreno adjunto en $\Omega \cdot \text{cm}$.

ρ_1 : resistividad del terreno circundante en $\Omega \cdot \text{cm}$.

L: largo de la varilla en cm.

a_0 : diámetro de la varilla en cm.

a_1 : diámetro del terreno adjunto a la varilla en cm.

1.3.5.2 Electrodo de placa

Los electrodos de placa no deben tener menos de 0,2 m² de superficie en contacto con el suelo y si son de acero deben tener por lo menos 6,4 mm de espesor. Si son de material no ferroso deberán tener por lo menos 1,52 mm de espesor.

1.3.5.3 Estructuras metálicas enterradas

Las normas técnicas mencionan la puesta a tierra mediante sistemas de tuberías o tanques enterrados. Pero, puede ser cualquier clase de estructura metálica subterránea.

1.3.5.4 Electroodos para puesta a tierra en radio frecuencia

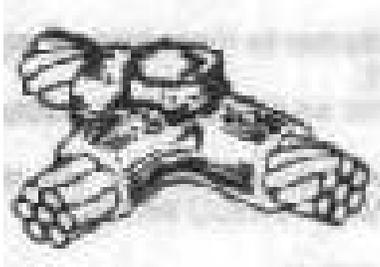
En el caso de torres de radiodifusión, se emplean cables en configuración de estrella (radiales) para su puesta a tierra porque se ha encontrado que es mejor tener conectados los cables en un punto que tener múltiples anillos rodeando el sitio. Esos cables radiales pueden ser menores a 30 m de largo si el suelo es adecuado. Los cables dispersan la energía de las descargas muy eficientemente, puesto que la corriente se divide en proporciones iguales en los cables radiales y entre más cables, menor corriente que los circula, por lo que una baja corriente es más fácil de disipar y esta tendrá menor impacto en la elevación del potencial de tierra del sistema.

1.3.6 Accesorios

1.3.6.1 Conectores

Los conductores de puesta a tierra y los puentes de unión deben asegurarse mediante soldaduras exotérmicas, abrazaderas conectores a presión u otros medios aprobados ^(30: 250-115) y no deben tener soldaduras con materiales de puntos de baja fusión (estaño, plomo, etc.).

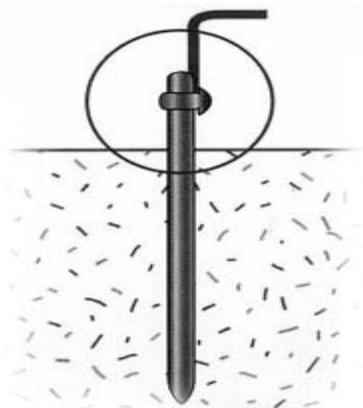
Fig. 9. Conectores eléctricos



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

Las abrazaderas deben ser adecuadas para el número y tipo de conductores. Además, deben ser compatibles con los materiales de los conductores y los electrodos de puesta a tierra, y cuando se usen enterradas, deben ser del tipo apropiado ^(30: 250-115). Estos conectores apropiados tienen marcada la leyenda *BURIED*.

Fig. 10. Los conectores unen los conductores con los electrodos del SPT



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

En resumen, para conectar los conductores del SPT con los electrodos se puede utilizar uno de los métodos indicados a continuación:

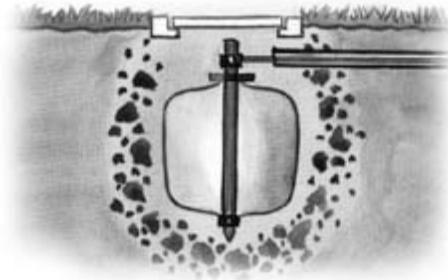
- a) Una abrazadera con perno de bronce o latón o de hierro fundido maleable
- b) Un accesorio de tubería, vástago u otro dispositivo aprobado, roscado en la tubería o en el accesorio
- c) Una abrazadera hecha de una tira de hoja metálica que tenga una base metálica rígida en contacto con el electrodo y una tira del mismo material y de dimensiones que no se encojan durante o después de la instalación
- d) Otros medios aprobados substancialmente iguales

1.3.6.2 Registros

Las abrazaderas u otros accesorios para puesta a tierra, deben estar aprobados para su uso general sin protección ^(30: 250-117), o protegerse contra daño físico como se indica a continuación:

- a) Colocándolas en lugares donde no sea probable que sufran daños
- b) Encerrándolas en una cubierta de metal, madera u otro material de protección equivalente

Fig. 11. Ejemplo de un SPT con su registro



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

Esta conexión debe ser accesible, siempre que no esté en un electrodo hundido, empotrado o enterrado ^(30: 250-112).

Pero en el caso de las subestaciones, deben hacerse mediciones periódicas en los registros para comprobar que los valores del sistema de tierras se ajustan a los valores de diseño. Por ello, se recomienda dejar registros en los electrodos de varilla.

Aparte de los registros de fábrica, se pueden construir esos registros empleando un tubo de albañal, con la boca hacia arriba para que sirva de tope a una tapa de cemento.

1.3.7 Mejoramiento de la resistencia a tierra

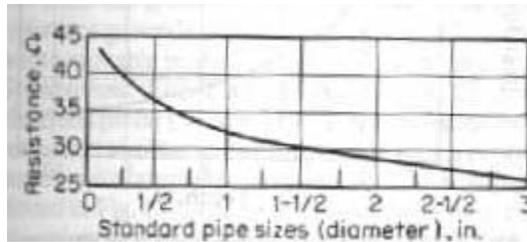
Para los sistemas con un electrodo único que conste de una varilla, tubería o placa, que tiene una resistencia a tierra de 25 Ω o más, que se complementa con electrodos adicionales de los tipos mencionados anteriormente y separados por lo menos una distancia de 1,83 m entre sí, su resistencia se puede reducir de las siguientes maneras ^(30 250-84):

- a) Usando una varilla de mayor diámetro
- b) Usando varillas más largas
- c) Poniendo dos, tres o más varillas en paralelo
- d) Tratando químicamente el terreno

1.3.7.1 Varillas de mayor diámetro

Usando varillas de 19 mm en lugar de varillas de 13 mm se logra una reducción en la resistencia a tierra de hasta un 10% máximo.

Fig. 12. Relación entre el diámetro de la varilla y la resistencia de tierra

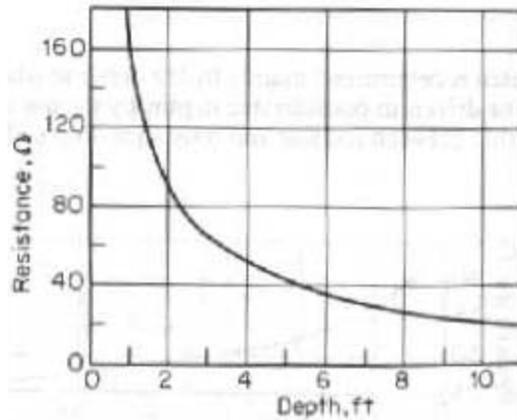


Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

1.3.7.2 Varillas más largas

Para los casos donde las capas superiores de la tierra son de arena y donde a gran profundidad se encuentra una capa de terreno húmedo, existen varillas que se acoplan unas a otras para lograr longitudes hasta de 15 m.

Fig. 13. Variación de la resistencia con la profundidad, para un electrodo de 1.02 plg de diámetro en suelo muy húmedo



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

Aunque en algunas subestaciones de compañías eléctricas de los E.U. han empleado varillas con longitudes de hasta 30 m, por lo general, doblando el largo, se obtiene una reducción del 40% de resistencia a tierra.

1.3.7.3 Varillas en paralelo

El colocar varias varillas en paralelo es una manera muy efectiva de bajar la resistividad. Pero, las varillas de tierra no deben ser colocadas muy cerca una de otra, porque cada varilla afecta la impedancia del circuito. La distancia entre ellas no debe ser menos de 1,83 m, aunque se recomienda que estén separadas más del largo de cualquiera de ellas ^(30: 250-83).

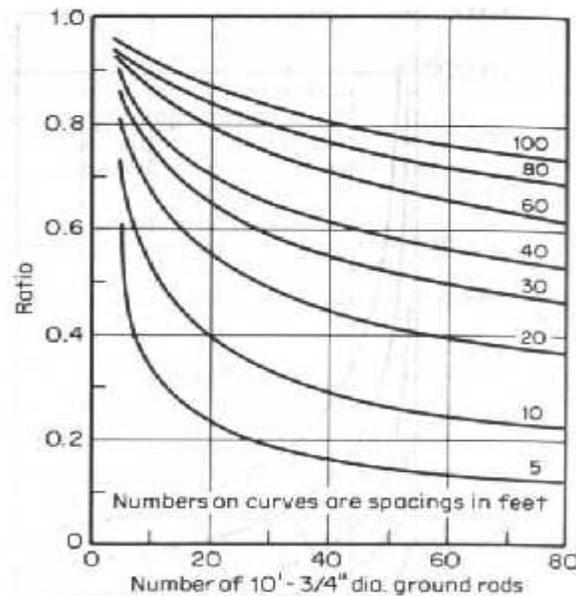
Cuando se utilizan múltiples electrodos, la impedancia es mayor y cada electrodo adicional no contribuye con una reducción proporcional en la resistencia del circuito. Por ejemplo, dos varillas reducen la resistencia al 58% de una sola, mientras que 20 varillas apenas reducen ese valor al 10 %.

La resistencia neta para n varillas R_n esta determinada por la resistencia de una sola varilla R . Este es un valor aproximado que considera que las varillas están espaciadas por una distancia igual al diámetro del cilindro protector.

$$R_n = [R/n] * [2 - e^{-0.17*(x-1)}] \quad (1.9)$$

y representa el decaimiento de la capacitancia asociada con la propagación en la tierra⁽⁴⁹⁾.

Fig. 14. Porcentaje de conductividad de electrodos de tierra en paralelo en un área de electrodos aislados



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

Es de observar que, muchas varillas cortas tienden a ser más efectivas que unas cuantas largas. Esto puede ser verificado al unir las ecuaciones de las resistencias individuales y las de grupo. Por ejemplo, un terreno de resistividad de $1000 \Omega \cdot m$. Una varilla de 25 cm da una resistencia a tierra de 300Ω . Dos varillas de 12.5 cm dan una resistencia de 210Ω . Esto es, $2/3$ de la resistencia.

1.3.8 Mallas

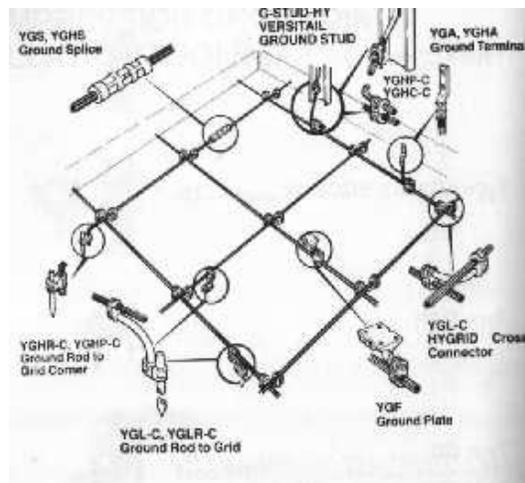
El SPT mediante una malla reticulada se presenta como una buena alternativa para instalaciones eléctricas de potencias elevadas ^(30: 921-18). La malla consta de una red de conductores enterrados a una profundidad que usualmente varía de 0,3 a 1,0 m, colocados paralela y perpendicularmente con un espaciamiento adecuado a la resistividad del terreno y preferentemente formando retículas cuadradas.

El cable que forma el perímetro exterior de la malla debe ser continuo de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo eléctrico de la subestación o planta generadora. Con ello, se evitan altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y terminales cercanas ^(30: 921-25).

En cada cruce de conductores de la malla, los cables deben conectarse rígidamente con soldadura exotérmica entre sí y en los puntos donde se

conectan los equipos que pudieran presentar falla o, en las esquinas de la malla, los conductores deben conectarse a electrodos de varilla o tubo de 2,4 m de longitud mínima, clavados verticalmente.

Fig. 15. En los cruces de la malla, los cables se conectan sólidamente



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

Los cables que forman la malla deben colocarse preferentemente a lo largo de las hileras de estructuras o equipo para facilitar la conexión a los mismos, ya que es una práctica común de ingeniería aterrizar a dos cables diferentes todos los equipos.

Los conectores empleados en la malla del sistema de tierras de una subestación deben ser de tipo de compresión o soldables.

1.4 Propósito y tipos de sistemas de puesta a tierra

1.4.1 Objeto de las Puestas a Tierra

Los SPT se establecen con el objetivo principal, de limitar la tensión que, con respecto a tierra, puedan presentar en un momento dado las masas metálicas (tensión de contacto), entre distintos lugares del suelo en las inmediaciones de la puesta a tierra (tensión de paso), asegurar la actuación de las protecciones (R de la puesta a tierra) y eliminar o disminuir el riesgo que supone una avería en el material utilizado.

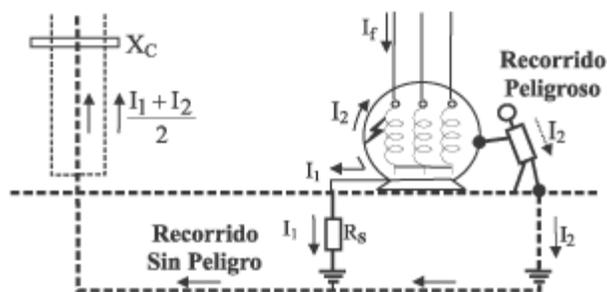
Los SPT en general constituyen una parte fundamental en las instalaciones eléctricas de todo tipo y permiten cumplir con las exigencias técnicas de seguridad humana y de las propias instalaciones así como con la confiabilidad de la operación, mediante el desempeño de las funciones descritas a continuación:

1.4.1.1 Unión sólida entre un sistema eléctrico y la tierra

Proporcionando el potencial de referencia ($V = 0$) en la barra equipotencial, o según el caso en el punto Neutro y en las masas que se le conectan. De modo que durante el funcionamiento normal o durante fallas asegura:

- a) La protección de las personas contra la energización accidental de las masas por acumulación de carga estática o por falla (I_f) directa o indirecta.
- b) El correcto funcionamiento del propio sistema y sus periféricos de protección, comunicaciones, control, automatismos, flujo y procesamiento de datos, así como de todas las cargas conectadas a él.

Fig. 16. Protección en caso de energización de las masas



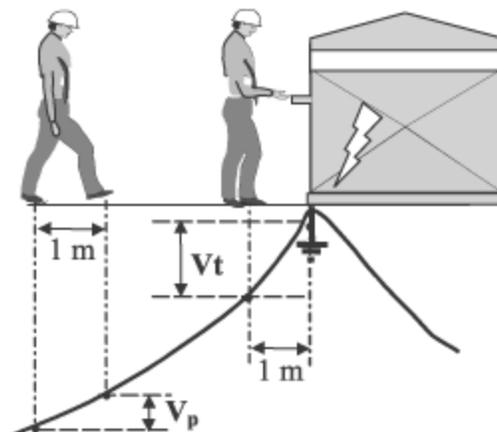
Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

1.4.1.2 Control de potenciales anormales en el suelo (gradientes peligrosos)

El SPT limita los potenciales en el suelo y entre el suelo, las partes metálicas de las instalaciones eléctricas y la proximidad de éstas, brindando durante las fallas⁽⁴⁸⁾:

- a) Protección a las personas: asegurando que las tensiones de toque (V_t) y paso (V_p) de la instalación sean menores o iguales que las similares admisibles por el cuerpo humano.
- b) Protección a equipos de baja tensión: Especialmente los equipos e instrumentos electrónicos, evitando elevadas diferencias de potencial y descargas inversas desde la masa a los circuitos internos.

Fig. 17. Potenciales peligrosos de toque y de paso en subestación de media y baja tensión



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

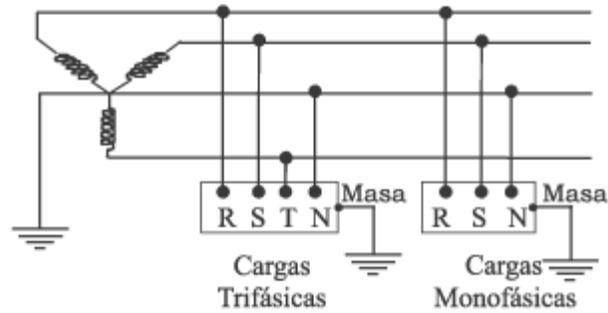
- c) Evacuar, conducir, derivar a tierra y cerrar el circuito de corrientes eléctricas ocasionales o permanentes del sistema eléctrico.

1.4.1.3 Circulación de corrientes anormales

El SPT por su mínima resistencia de dispersión, asegura la circulación a través del suelo de:

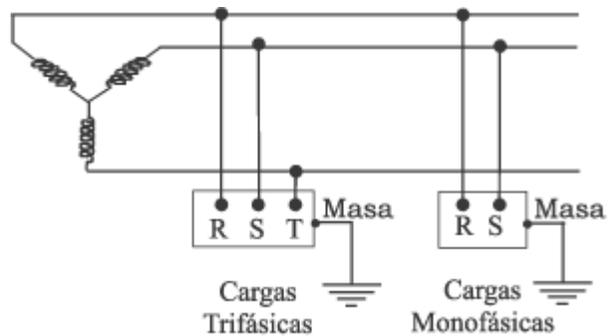
- a) **Elevadas corrientes;** senoidales (corto circuito) y de impulso (rayo, maniobra).
- b) **Corrientes de régimen permanente;** por desbalance de carga, o procesos continuos.
- c) **Corrientes inducidas;** por formación de anillos, por carga estática, etc.

Fig. 18. Conexión de cargas en sistemas estrella con neutro a tierra



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

Fig. 19. Conexión de cargas en sistema delta o estrella sin neutro a tierra



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

De acuerdo con su aplicación y características físicas y de instalación, los SPT normalmente se diseñan para funcionamiento permanente con corrientes de pequeña o limitada magnitud y solamente para funcionamiento breve con elevadas corrientes como las de falla o rayo; en este último caso, su comportamiento transitorio depende de su geometría.

a) Cuando son SPT de seguridad generalmente en alta tensión.

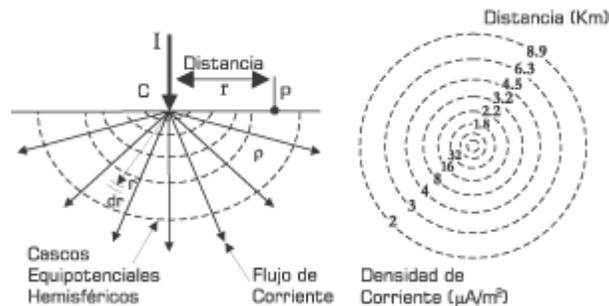
- Controlan los gradientes peligrosos (tensiones de toque y paso)

- Detectan bajas resistencias de dispersión
- Los interruptores (o disyuntores) definen el tiempo de conducción

b) Cuando son SPT de referencia de potencial, generalmente en baja tensión

- No tienen como objetivo el control de los gradientes peligrosos
- Pueden tener moderadas o bajas resistencias de dispersión
- Los fusibles, interruptores termomagnéticos o diferenciales definen el tiempo de conducción

Fig. 20. Dispersión de corrientes a frecuencia industrial en el suelo - hemisferios concéntricos



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

1.4.2 Definición de puesta a tierra

La denominación "puesta a tierra" comprende toda la unión metálica directa, sin fusible ni protección alguna, de sección suficiente, entre determinadas partes de una instalación y uno o varios electrodos enterrados en el suelo, para conseguir que en la instalación, la edificación y el área próxima, no existan diferencias de potencial peligrosas y también que se

permita el paso a tierra de las corrientes de falla y las corrientes de impulso por descarga de origen atmosférico o por maniobra.

Un SPT puede basarse en uno o varios pozos unidos, en cuyo caso se habla de una malla. En la costa, en la mayoría de SPT, se construye fácilmente pozos verticales de dos a tres metros de profundidad. En las zonas altas (3,000 a 4,000 ó más metros) es habitual construir pozos horizontales con menor profundidad pero mayor extensión horizontal. Estos, son realizados con conductores flexibles o con placas de Cu en diferentes longitudes y arreglos, tienen la ventaja de no sólo dispensar corrientes indeseables sino también de controlar gradientes peligrosas en un sistema eléctrico.

Cuando se trata de obtener una baja resistencia de puesta a tierra se diseña una malla, es decir un arreglo de dos o más pozos. Cuando son tres o más pozos, el arreglo más conveniente para un máximo aprovechamiento es una figura geométrica (triángulos, cuadrados, etc.), si no existe esa posibilidad, por limitaciones del terreno, el arreglo de la malla se hace simplemente lineal. La distancia entre los pozos verticales enmallados debe ser el doble de la longitud del electrodo, es así que para dos pozos con varillas estándar de 2.40 metros se estima una distancia de cinco metros.

Ante las posibles fallas de aislamiento de los conductores en algunos equipos eléctricos, se corre el riesgo de que la cubierta metálica de éstos quede con tensión eléctrica. El contacto directo con un equipo electrificado puede producir en el ser humano desde alteraciones del ritmo cardíaco hasta la muerte. La conexión a tierra eficaz conduce la electricidad indeseable hacia tierra alejando el peligro en forma segura. La cubierta metálica ("shield"), puesta a tierra, es usual en muchas líneas de transmisión de la información, porque protege a los equipos electrónicos contra perturbaciones electromagnéticas.

También sirve como referencia de las señales en un equipo electrónico y para eliminar las diferencias de potencial entre diferentes componentes de un sistema de comunicaciones o control automático.

1.4.3 Tipos de sistemas de puesta a tierra

Las normas internacionales (norma NSEG 5 E.n. 71, capítulo III), establecen que las conexiones de tierra se dividen en:

- a) Tierras permanentes
- b) Tierras temporales

Además, las tierras permanentes se dividen en:

- Tierras de protección
- Tierras de servicio

1.4.3.1 Tierra de protección

Su objetivo es evitar la aparición de tensiones peligrosas entre partes de la instalación que normalmente están sin tensión y otras partes vecinas que puedan encontrarse al potencial de tierra.

Deberán conectarse a la tierra de protección todas las partes metálicas de una instalación que normalmente están sin tensión, como carcazas de máquinas, de transformadores, de aparatos, partes conductoras accesibles de estructuras y edificios, cubiertas de plomo de cables de alta y baja tensión, dispositivos de puestas a tierra de las líneas aéreas y el cable de guardia de las mismas.

La puesta a tierra de protección es la que se realiza normalmente en las edificaciones, de allí la importancia de conocer sus características. El conductor de protección (denominado comúnmente conductor de tierra) debe ser eléctricamente continuo y no ser seccionado en punto alguno de la instalación ni pasar por el interruptor termomagnético. Tendrá la capacidad de soportar la corriente máxima de cortocircuito coordinada con las protecciones instaladas en el circuito.

Como conductores de protección en instalaciones domiciliarias deben utilizarse cables unipolares aislados, con sección no menor a 2,5 mm². En todos los casos hay que efectuar la conexión a tierra de todas las masas de la instalación.

1.4.3.2 Tierra de servicio

Se utiliza para conectar en forma permanente a tierra ciertos puntos de las instalaciones de corrientes elevadas. Deberán conectarse a la tierra de servicio los limitadores de tensión, el neutro u otro punto del sistema si hay razones de servicio que aconsejen dicha conexión.

La conexión a tierra de servicio debe hacerse con alambres o cables conductores en lo posible sin uniones, no se acepta el uso de conductores de construcciones metálicas para estas conexiones.

Los sistemas usuales de puesta a tierra en las redes trifásicas están definidos como tales por la norma IEC 364; y se describen con letras que representan⁽⁴⁵⁾:

Primera letra:

Condiciones de puesta a tierra de la fuente de energía

T = puesta a tierra directa de un punto de la red.

I = aislamiento de todas las partes activas con respecto a tierra o puesta a tierra de un punto de la red a través de una impedancia.

Segunda letra:

Condiciones de puesta a tierra de las masas en la instalación eléctrica.

T = masas puestas a tierra directamente, independientemente de la fuente de energía.

N = masas unidas directamente a la puesta a tierra funcional.

Tercera letra: (válida para los sistemas TN)

Disposiciones de los conductores de protección y neutro.

S = conductores separados para el de protección y neutro.

C = conductor único con funciones de protección y de neutro, llamado conductor PEN.

Basándose en lo anterior se tiene:

Sistema IT: el esquema de distribución consta de las tres fases activas (RST). En ellas el neutro no está sólidamente conectado a tierra (está aislado o conectado a tierra por medio de impedancias de elevado valor).

Sistema TNS: son redes en las que además de las tres fases (RST) existen otros dos conductores (el neutro y el conductor de protección). Es decir, los usuarios no realizan puestas a tierra de las instalaciones ya que la misma se ejecuta mediante el último conductor mencionado, que es suministrada por la compañía distribuidora.

Sistema TNC: en este sistema de distribución se emplean 4 conductores, tres para las fases y un cuarto que realiza las funciones de neutro y de conductor de protección.

Sistema TT: consiste de una puesta a tierra de servicio conectada sólidamente a tierra de la cual se toma el conductor neutro, es decir que la distribución emplea 4 conductores, tres para las fases y uno para el neutro, mientras que el conductor de protección es provisto por el usuario, derivándolo de su puesta a tierra de seguridad.

En los sistemas TT, el centro de la estrella de los transformadores de alimentación está conectado al neutro y a la vez puesto sólidamente a tierra en ese punto. En las condiciones reales de una red se producen desequilibrios en los consumos y circulación de corrientes armónicas que ocasionan que este conductor pueda tener potenciales respecto de tierra superiores a la máxima tensión de contacto admitida (24 V). Por esta razón nunca se debe emplear el neutro de la compañía distribuidora de electricidad como conductor de protección, es decir que no se deben conectar al mismo las puestas a tierra de una instalación particular.

1.4.3.3 Mallas a tierra

Cuando se construye una malla de tierra alejada de la instalación o cuando se interconectan dos mallas alejadas, la unión se debe hacer mediante dos conductores independientes. En general, se utilizará la misma malla de tierra con fines de protección y de servicio, cuando ambas pertenecen a instalaciones con la misma tensión. Cuando se utilicen mallas diferentes se debe verificar que no haya peligro para las instalaciones y las personas, debido a las corrientes máximas que puedan circular en las mallas.

1.4.4 Clasificación de los SPT según su aplicación⁽³⁰⁾

1.4.4.1 SPT para instalaciones eléctricas

En instalaciones eléctricas se utiliza el llamado SPT de servicio o funcional. Su propósito es limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de rayos, fenómenos de inducción o, de contactos no intencionales con cables de tensiones más elevadas. También sirve para mantener al potencial de tierra, alguna parte de los circuitos de alimentación, como pueden ser los centros de la estrella en generadores y transformadores.

Este tipo de SPT se logra al unir, mediante un conductor apropiado, una parte de la instalación eléctrica con la tierra.

1.4.4.2 SPT para equipos eléctricos

En este caso se utiliza el SPT conocido como puesta a tierra de protección y consiste en la puesta a tierra de las masas metálicas de los equipos eléctricos para brindar protección contra contactos indirectos eliminando los potenciales de contacto al derivar las corrientes de falla que pudieran poner en peligro la vida y la propiedad. También permite que operen las protecciones por sobrecorriente de los equipos.

Se consigue al conectar todas las partes metálicas que pueden llegar a energizarse al punto de conexión del SPT. En ocasiones se realizan puestas a tierra conjuntas, funcionales y de protección.

1.4.4.3 SPT en señales electrónicas

En este caso se utiliza el SPT de referencia que sirve para brindar un potencial constante, que es empleado para evitar la contaminación con señales con frecuencias diferentes a la deseada. Se logra mediante blindajes conectados a un potencial cero, que es la tierra.

1.4.4.4 SPT de protección electrónica

El SPT de referencia también se utiliza para evitar la destrucción de los elementos semiconductores por voltaje, ya que al tener una referencia a tierra, se puede colocar dispositivos de protección que se conectan entre los conductores activos y la referencia cero.

1.4.4.5 SPT para protección atmosférica

La puesta a tierra de pararrayos es la encargada de llevar a tierra las sobretensiones producidas por las descargas atmosféricas sobre los descargadores y los pararrayos. Sirve para canalizar la energía de los rayos a tierra sin mayores daños a personas y propiedades. Se logra con una malla metálica igualadora de potencial conectada a la tierra que cubre los equipos o edificios a proteger.

1.4.4.6 SPT para protección electrostática

Sirve para neutralizar las cargas electrostáticas producidas en los materiales dieléctricos. Se obtiene al unir todas las partes metálicas y dieléctricas, utilizando la tierra como referencia. Cada sistema de tierras debe cerrar únicamente el circuito eléctrico que le corresponde.

1.5 Instalaciones y equipos que deben conectarse a tierra

Se le llama electrodo al conjunto de conductores enterrados en el suelo, que funcionan como parte del SPT y que están unidos por un puente. Según las normas internacionales (Reglamento de instalaciones eléctricas de Perú), se debe conectar a tierra los siguientes elementos, según el caso

Si el SPT es de servicio particular:

- La barra equipotencial del tablero de distribución
- La bajada del pararrayos
- Los armados de acero de las estructuras de concreto del edificio
- Las tuberías y conductos metálicos (agua y otros) excepto tuberías de combustibles

a) Si el SPT es de servicio público:

- El punto neutro de los transformadores y sistemas eléctricos

- Las bajadas de tierra de los pararrayos y descargadores
- Las estructuras, carcasas y masas de todas las máquinas y equipos eléctricos
- Los soportes metálicos de los aislamientos de líneas y sistemas eléctricos
- Las masas de los instrumentos y aparatos manuales

Cuando un equipo es alimentado por una instalación eléctrica diferente de la instalación interior, se debe proveer un medio para su conexión a tierra.

1.5.1 SPT de instalaciones eléctricas

1.5.1.1 Tipos de instalaciones que requieren un SPT

a) Sistemas eléctricos en c.c. de no más de 300 V, a menos que:

- Suministren energía a sistemas industriales en áreas limitadas y sean equipados con un detector de tierra
- Operen a menos de 50 V entre conductores

- Sean alimentados con un rectificador desde un sistema en c.a. aterrizado
- b) Sistemas de c.c. en tres hilos
- c) Sistemas eléctricos en c.a. cuando el voltaje a tierra esté entre 50 y 150 V
(30: 250-5d)
- d) Sistemas de c.a. de menos de 50 V si están alimentados por transformadores de sistemas a más de 150 V a tierra o por sistemas no aterrizados

1.5.1.2 Tipos de instalaciones en c.a. que no necesitan estar aterrizados solidamente

Los sistemas en c.a. de 50 a 1000 V que cumplan con los siguientes requisitos no se requiere que estén aterrizados.

- a) Sistemas eléctricos de hornos industriales
- b) Sistemas derivados que alimenten únicamente rectificadores de controles de velocidad variable
- c) Sistemas derivados aislados que son alimentados por transformadores cuyo voltaje primario es menor de 1000V, siempre que:

- El sistema solamente se use en control
- Solamente personal calificado tenga acceso a la instalación.
- Se tengan detectores de tierra en el sistema de control
- Se requiera continuidad del servicio.

d) Sistemas aislados en hospitales y en galvanoplastia ^(30: 517, 668)

e) Sistemas aterrizados mediante una alta impedancia que limita la corriente de falla a un valor bajo. Estos sistemas se permiten para sistemas en c.a. trifásicos de 480 a 1000 V, donde:

- Solamente personal calificado da servicio a las instalaciones.
- Se requiere continuidad del servicio.
- Se tienen detectores de tierra en el circuito.
- No existan cargas conectadas entre línea y neutro.

En práctica, los sistemas industriales en media tensión son normalmente aterrizados mediante una baja resistencia, es decir, se conecta una resistencia de 400 A en el neutro del transformador. Esta corriente máxima de falla no es muy dañina a los equipos, pero requiere relevadores de falla a tierra (50GS) rápidos.

1.5.1.3 Conductores a aterrizar

En los siguientes sistemas en c.a. se conectará a tierra:

- a) Una fase, dos hilos: El conductor de tierra
- b) Una fase, tres hilos: El neutro
- c) Sistemas polifásicos con un hilo común a todas las fases: El conductor común
- d) Sistemas polifásicos que tiene una fase aterrizada: Este conductor
- e) Sistemas polifásicos en general: Solamente una fase puede estar aterrizada. Este conductor es el llamado neutro y es de color blanco. Y se recomienda usar el color gris para distinguir el neutro de otro sistema. Usualmente el de un sistema con voltaje más alto ^(30: 200-6).

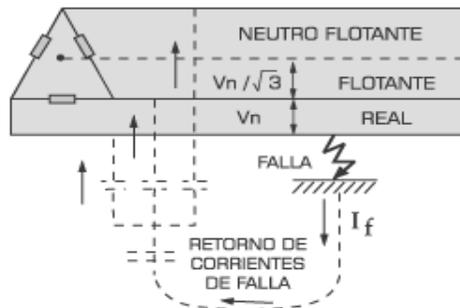
1.5.1.4 Influencia del suelo (tierra) en los sistemas eléctricos

Cualquiera que sea el régimen del neutro de los sistemas eléctricos, estos siempre estarán referidos directa o indirectamente a tierra; es decir, que el suelo siempre forma parte del funcionamiento de los sistemas eléctricos.

- a) En sistemas con neutro aislado, las tensiones (V_n) de los alimentadores está directamente referida al potencial de tierra, a través de sus capacitancias parásitas (X_c). Cuando se produce una falla de fase a tierra, a falta de un SPT en el lado de la fuente, la corriente (I_f) retorna

por el suelo al circuito, pasando a través de las capacitancias parásitas y aunque la magnitud de I_f es baja, ésta siempre será peligrosa.

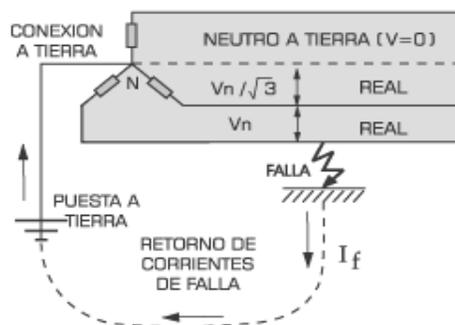
Fig. 21. Sistema en delta-estrella con neutro aislado.



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

- b) En sistemas con neutro puesto a tierra, la tensión (V_n) de los alimentadores está directamente referida al potencial de tierra mediante la conexión sólida del punto neutro (N) con el SPT. De ese modo, cuando se produce una falla de fase a tierra, la mayor parte de la corriente (I_f) retorna por el suelo directamente a la fuente, atravesando la Puesta a Tierra hasta el punto neutro, siendo muy peligrosa.

Fig. 22. Sistema en estrella con neutro puesto a tierra.



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

Los SPT de servicio particular, es decir, aquellas que se instalan en el lado de la utilización (doméstica, comercial, industrial), contribuyen a formar el circuito que canaliza las corrientes de falla evitando el peligro para las personas; por esto todos los reglamentos eléctricos en el mundo, disponen la obligatoriedad de contar con un SPT en todo tipo de instalación eléctrica que funcione con más de 50 V.

1.5.1.5 Lugar de puesta a tierra del sistema

- a) En sistemas en c.c. la tierra debe estar en la subestación rectificadora únicamente. El calibre del conductor de puesta a tierra no debe ser menor que el más grueso del sistema y nunca menor a calibre 8 AWG.

- b) Los sistemas de c.a. deben conectarse a tierra en cualquier punto accesible entre el secundario del transformador que suministra energía al sistema y el primer medio de desconexión o de sobrecarga ^(30: 250-23a). Además, debe existir en el neutro otra puesta a tierra en la acometida a cada edificio en un punto accesible en los medios de desconexión primarios ^(30: 250-24).

Este conductor de puesta a tierra del sistema no debe ser menor al requerido por la Tabla 250-95 del NEC, excepto el conductor que se conecta a varillas electrodos, o a electrodos de concreto, donde no es necesario que sea mayor que calibre 6 AWG en cobre o 4 AWG en aluminio.

Cuando no sea una acometida, se hace el cálculo sobre la sección de los conductores en paralelo. Asimismo, el puente de unión principal debe ser del mismo calibre obtenido según la misma tabla.

- c) En un sistema derivado separado que no está conectado a un sistema de distribución exterior, el conductor del electrodo, estará conectado al transformador, generador u otra fuente de energía o, al interruptor principal del sistema.

1.5.2 Equipos y canalizaciones que deben estar puestos a tierra

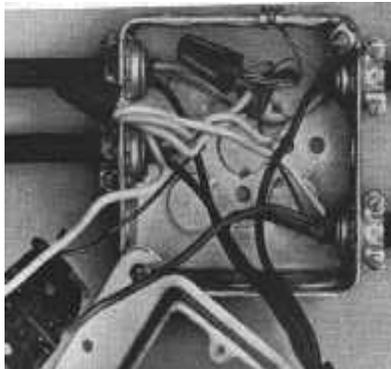
Los SPT de equipos, por su importancia como medio de protección están normalizados a escala mundial (Por ejemplo en México, la NOM-001-SEDE-1999).

1.5.2.1 Canalizaciones metálicas

- a) Las canalizaciones metálicas para los conductores y el equipo de conexión deben ser puestos a tierra
- b) Las canalizaciones metálicas para conductores que no sean de acometida deben ser puestas a tierra
- c) No necesitan ser puestas a tierra las cubiertas metálicas utilizadas para proteger conjuntos de cables contra daños materiales.

En general, todas las canalizaciones metálicas deben estar aterrizadas.

Fig. 23. Cajas metálicas



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

1.5.2.2 Equipo fijo en general

Las partes conductivas de los equipos que necesiten ponerse a tierra, deberán ser conectadas a tierra por uno de los métodos indicados a continuación ^(31: 250 – 42):

- a) Por cualquiera de los conductores de protección especificados de acuerdo a la tabla NEC 250-95.
- b) Por un conductor de protección contenido en la misma canalización cable, o cordón o que estén colocados junto con los conductores del circuito de otra manera. Este conductor puede ser desnudo, aislado o cubierto. El conductor cubierto o aislado deberá tener un revestimiento de color amarillo, verde o verde/amarillo.

Solamente para circuitos de corriente continua, el conductor de protección puede instalarse por separado de los conductores del circuito.

Bajo cualquiera de las siguientes condiciones, las partes metálicas que no conduzcan electricidad, que estén expuestas y puedan quedar energizadas, deben ser puestas a tierra:

- a) Donde el equipo está localizado a una altura menor a 2.4 m y a 1.5 m horizontalmente de objetos aterrizados y al alcance de una persona que puede hacer contacto con alguna superficie u objeto aterrizado.
- b) Si el equipo está en un lugar húmedo y no está aislado, o está en contacto con partes metálicas.
- c) Si el equipo está en un lugar peligroso o, donde el equipo eléctrico es alimentado por cables con cubierta metálica.

d) Si el equipo opera con alguna terminal a más de 150 V a tierra, excepto en:

- Cubiertas de Interruptores automáticos que no sean el interruptor principal y, que sean accesibles a personas calificadas únicamente (30:250-42 Exc. 1)
- Estructuras metálicas de aparatos calentadores, exentos mediante permiso especial y si están permanente y efectivamente aisladas de tierra (30: 250-42 Exc. 2)
- Carcazas de transformadores y capacitores de distribución montados en postes de madera a una altura mayor de 2.4 m sobre nivel del piso (30: 250-42 Exc. 3)
- Equipos protegidos por doble aislamiento y marcados de esa manera (30: 250-42 Exc. 4)

1.5.2.3 Equipo fijo específico (30: 43)

Todas las partes metálicas no conductoras de corriente de las siguientes clases de equipos, no importando voltajes, deben ser puestas a tierra:

- a) Armazones de motores (30: 430-142)

- b) Gabinetes de controles de motores, excepto los que van unidos a equipos portátiles no aterrizados
- c) Equipos eléctricos de elevadores y grúas
- d) Equipos eléctricos en talleres, teatros, y estudios de cine, excepto luminarias colgantes en circuitos de no más de 150 V a tierra
- e) Equipos de proyección de cine
- f) Luminarias, anuncios luminosos y equipos asociados
- g) Generadores y motores
- h) Armazones de tableros de distribución y estructuras de soporte, exceptuando las estructuras de tableros de corriente directa aislados efectivamente
- i) Equipo alimentado por circuitos de control remoto de clase 1, 2 y 3 y circuitos de sistemas contra incendios ^(30: 250)
- j) Luminarias ^(30: 410-17 a 410-21)
- k) Bombas de agua, incluyendo las de motor sumergible
- l) Capacitores ^(30: 460-10)
- m) Estructuras metálicas de pozos con bomba sumergible

1.5.2.4 Equipos no eléctricos

Las siguientes partes metálicas de equipos no eléctricos serán puestas a tierra ^(30: 250-44):

- a) Estructuras y vías de grúas operadas eléctricamente
- b) La estructura metálica de elevadores movidos no eléctricamente, a las que están sujetos conductores eléctricos
- c) Los cables de acero de los elevadores eléctricos
- d) Partes metálicas de subestaciones de voltajes de más de 1 KV entre conductores
- e) Casas móviles y vehículos de recreo ^(30: 250 y 251)
- f) Instalaciones de ventilación

1.5.2.5 Equipos conectados por cordón y clavija

Exceptuando los aparatos doble aislados o, conectados mediante un transformador de aislamiento con secundario a no más de 50 V, todas las partes metálicas que puedan llegar a estar energizadas de equipos conectados mediante cordón, deben ser puestas a tierra ^(30: 250 -45):

- a) En lugares clasificados peligrosos ^(30: 500 – 517)
- b) Cuando operan esos equipos a más de 150 V a tierra, excepto los motores resguardados y los armazones metálicos de aparatos calentados eléctricamente, en cuyo caso deberán aislarse permanente y efectivamente de tierra
- c) En casas habitación:
- Refrigeradores, congeladores y aires acondicionados
 - Lavadoras, secadoras, lavaplatos, y equipos eléctricos de acuarios
 - Herramientas manuales eléctricas
 - Lámparas
- d) En otros lugares, no residenciales:
- Refrigeradores, congeladores, y aire acondicionado
 - Lavadoras, secadoras, lavaplatos, computadoras, y equipos eléctricos
 - Herramientas manuales portátiles
 - Los aparatos motorizados como: podadoras limpiadoras de pisos, etc.
 - Herramientas que se usen en ambientes húmedos o mojados o por personas que trabajan dentro de tanques metálicos
 - Lámparas portátiles

1.5.2.6 Instalaciones de comunicaciones y canalizaciones para sistemas de cómputo

Cuando en una edificación se instale sistemas de cómputo, sea cual fuere el uso que se le dé a la edificación, deberá colocarse canalizaciones y cajas independientes para el sistema de cómputo. (EM. 030).

Fig. 24. Se deben colocar canalizaciones y cajas independientes para las computadoras



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

Todas las partes metálicas de las cajas de canalización deberán estar puestas a tierra.

1.5.2.7 Instalaciones provisionales

Los requisitos mencionados arriba también deben cumplirse para todas las instalaciones provisionales ^(30: 305-5).

1.5.2.8 Líneas

Se debe poner a tierra:

- a) Toda cerca metálica que se cruce con líneas suministradoras, a uno y otro lado del cruce, a una distancia sobre el eje de la cerca no mayor a 45m ^(30: 2103-6).
- b) Las estructuras metálicas, incluyendo postes de alumbrado, las canalizaciones metálicas, los marcos, tanques y soportes del equipo de líneas. ^(30: 2201-8b).

1.5.2.9 Puesta a tierra de equipos conectados mediante cordón

Las partes metálicas de equipos conectados mediante cordón y que deben estar aterrizadas, se conectan de una de las siguientes maneras:

- a) Por medio de un tomacorriente "polarizado"
- b) Por medio de la conexión fija del cordón a un conductor de puesta a tierra
- c) Por medio de un cable, aislado o desnudo, protegido contra daño mecánico

1.5.2.10 Partes metálicas de equipos fijos consideradas aterrizadas

Se consideran aterrizados satisfactoriamente los equipos fijos, como cajas, gabinetes y conectores, cuando:

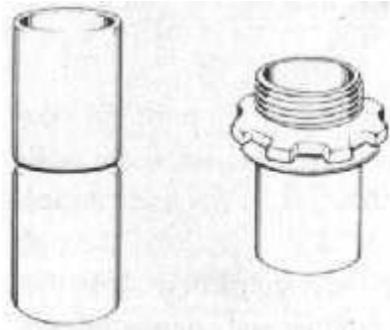
- a) Están metálicamente conectados a una pantalla aterrizada de un cable o, a un gabinete aterrizado.
- b) Están aterrizados mediante un cable desnudo o de color verde que está bien conectado a tierra.
- c) El equipo en corriente directa está en contacto directo con la estructura aterrizada metálica de un edificio.

1.5.2.11 Continuidad eléctrica del circuito de tierra

La continuidad eléctrica de los equipos debe asegurarse por alguno de los siguientes métodos:

- a) Puente de unión al conductor de tierra ^(30: 250-74)
- b) Mediante conectores roscadas en tubería rígida y eléctrica
- c) Mediante conectores no roscados usados como accesorios de la tubería rígida y la eléctrica

Fig. 25. Esquemas de un conector no roscado y uno roscado



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

d) Mediante puentes de unión a gabinetes

Se deben usar puentes de unión cuando sean necesarios para garantizar la continuidad eléctrica y la capacidad para conducir con seguridad cualquier corriente de falla probable que pueda producirse.

Fig. 26. Puente de unión o conector



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

1.5.2.12 Circuitos que no se deben aterrizar

- a) Los circuitos de grúas eléctricas operando en lugares con presencia de fibras combustibles ⁽³⁰⁻³⁸³⁾
- b) Circuitos aislados propios de quirófanos de hospitales ⁽³⁰⁻⁵¹⁷⁾

1.5.2.13 Consideraciones para un buen diseño de sistema de puesta a tierra de equipos eléctricos

El trayecto a tierra desde circuitos, equipos y cubiertas conductoras debe:

- a) Ser permanente y continuo
- b) Tener suficiente capacidad para conducir con seguridad cualquier corriente de falla probable que pueda circular en él
- c) Tener una impedancia lo suficientemente baja para limitar la tensión a tierra y facilitar el funcionamiento de los dispositivos de protección del circuito

Un sistema de puesta a tierra bien diseñado, considera:

- a) La conexión de la varilla de tierra
- b) Conectar a tierra el tubo conduit metálico del conductor del SPT ^(30: 250-92b)

- c) Emplear las charolas y, las tuberías metálicas roscadas como conductores de puesta a tierra
- d) Usar los interruptores automáticos con detector de falla a tierra en los garajes, cocinas, y obras en construcción ^(30: 210-8, 215-9 y 305-6)
- e) El cableado del conductor del SPT junto con los cables de líneas y del neutro del mismo circuito por dentro de la misma canalización metálica.

1.6 Valores aceptables de resistencia de puesta a tierra

1.6.1 Resistencia de electrodos artificiales

La resistencia a tierra de un electrodo deberá ser a lo sumo de 25 Ω con acometidas en baja tensión, en las condiciones más desfavorables (época seca). Cuando sea mayor, se debe conectar dos o más electrodos en paralelo. Se recomienda que los electrodos sean probados periódicamente con el fin de determinar su resistencia. ^(30: 250-84).

1.6.2 Resistencia del SPT en subestaciones

La resistencia eléctrica total del SPT debe conservarse en un valor (incluyendo todos los elementos que forman el sistema) menor a 25 Ω para subestaciones hasta 250 KVA y 34.5 KV, 10 Ω en subestaciones mayores de 250 KVA y hasta 34.5 KV y de 5 Ω en subestaciones que operen con tensiones mayores a 34.5 KV ^(30: 2403-2c).

1.6.3 Resistencia del SPT en locales especiales

Los locales de uso especial, deben tener un SPT con una resistencia inferior a 5 Ω .

En el caso de Instalaciones de Asistencia Médica que cuenten con quirófano, salas de recuperación, salas de cuidados intensivos y salas de partos, la resistencia de puesta a tierra deberá ser inferior a 3 Ω y los quirófanos, salas de cuidados intensivos y salas de partos tendrán circuitos derivados independientes y desacoplados eléctricamente del resto de las instalaciones para evitar los efectos de las fallas a tierra. ^(31, Tomo V Capítulo 6.0:)

Fig. 27. En hospitales, la resistencia del SPT será menor de 3 Ω



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

1.6.4 Instalación eléctrica para construcciones riesgosas, locales para explosivos (31- Rubro VI, EM. 090)

En construcciones destinadas a almacenar productos de alto riesgo, por ejemplo explosivos se deben tomar en cuenta las siguientes regulaciones para realizar la instalación eléctrica:

- a) Los conductores deben calcularse para 60% de la corriente nominal a 30° C
- b) El SPT debe tener una resistencia inferior a 5 Ω
- c) Los conductores de la tierra de seguridad tendrán (en el camino más largo) una resistencia total inferior a 0.025 Ω

Fig. 28. En instalaciones de alto riesgo, la resistencia del SPT debe ser menor



de 5Ω

Fuente Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

2 METROLOGÍA

La metrología es la ciencia que trata sobre todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones y constituye el medio de confirmación de la calidad del producto obtenido en un proceso industrial por lo que está permanentemente ligada a la normalización.

La metrología se clasifica en:

- Metrología científica
- Metrología industrial
- Metrología legal

La metrología científica se relaciona con mediciones de muy alta precisión y exactitud y con el mantenimiento y desarrollo de patrones de medición, así como el desarrollo de nuevas técnicas e instrumentos de medición.

La metrología industrial permite comprobar la calidad de los productos mediante la verificación y confirmación de la calibración, y de los instrumentos de medición y de control, empleados en procesos industriales.

La metrología legal estudia las normas y leyes emitidas por un país o establecidas mediante acuerdos internacionales, que normalizan la aplicación de unidades de medida, métodos de medición e instrumentos de medición. La metrología legal también estudia los aspectos técnicos que deben abarcar las normas nacionales e internacionales de medición.

Puesto que la investigación realizada en este trabajo tiene que ver con los temas que estudia la metrología, se considera importante explicar algunos vocablos y conceptos importantes sobre esta ciencia, los cuales serán de utilidad cuando en los próximos capítulos se trate sobre instrumentos y técnicas de medición utilizados para medir resistividad y resistencia en un SPT, así como en el análisis de los resultados obtenidos en las mediciones de campo.

2.1 Vocablos y conceptos importantes relacionados con la metrología

2.1.1 Magnitud

Es un atributo de los cuerpos, sustancias y fenómenos, que puede ser distinguido de forma cualitativa y determinados cuantitativamente. Como ejemplos de magnitud se puede citar: la longitud, el tiempo, la resistencia, la corriente, etc.

Para que haya consistencia entre las diferentes magnitudes, estas se agrupan para formar lo que se llama **sistema de magnitudes**. Un sistema de magnitudes está formado por magnitudes base y magnitudes derivadas. **Las magnitudes base** son aquellas que por convención, se aceptan como fundamentalmente independientes dentro de un sistema. **Las magnitudes derivadas** de un sistema, se definen en función de las magnitudes independientes. Por ejemplo, en un sistema en el que la longitud, la masa y el tiempo son magnitudes base, la velocidad es una magnitud derivada, pues está definida en función de la longitud sobre el tiempo.

Una vez tratado el tema de las magnitudes base y las magnitudes derivadas, se puede desarrollar lo relacionado con **la dimensión de una magnitud**, la cual se define como la expresión que describe una magnitud derivada en términos de las magnitudes base del sistema. Por ejemplo, la dimensión de la velocidad es l/t (longitud/tiempo). Hay que agregar que existen magnitudes adimensionales o de magnitud 1.

Una magnitud posee también **un valor**, el cual es una expresión cuantitativa que por lo general se expresa como una unidad de medición multiplicada por un número. Por ejemplo, al decir que la velocidad de un vehículo es 80 Km/h, “80” representa el valor de la magnitud velocidad.

2.1.2 Unidad de medida

Es una magnitud particular, definida y adoptada por convención para compararla cuantitativamente con magnitudes de la misma naturaleza. Por convención se asigna a cada unidad de medida un nombre y un símbolo. Por ejemplo, la unidad de medida de la resistencia eléctrica se le denomina “ohm” y su símbolo es Ω .

Para un sistema de magnitudes, el sistema de unidades es el conjunto de unidades base y unidades derivadas definido de acuerdo a las reglas determinadas para el sistema de magnitudes.

2.1.3 Medición

Es un conjunto de operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud, en otras palabras, es la comparación del valor de una magnitud con respecto a otra tomada como referencia. Toda medición tiene una base científica llamada el principio de la medición. **El método de medición** es una secuencia ordenada y lógica de operaciones, que se describen de forma general. Es de hacer notar, que para medir una misma magnitud existen varios métodos, como se verá en el capítulo 4, en el caso de la medición de la resistencia y la resistividad. Asociado con el método, está **el proceso de medición**, el cual está formado por una serie de operaciones descritas de forma específica para hacer mediciones de acuerdo con el método seleccionado.

Al analizar lo relacionado con las mediciones, se dice que la magnitud particular sujeta a medición se conoce como **mensurado**. Cuando se mide un mensurado hay magnitudes que no se desean medir pero que sin embargo hay que tenerlas en cuenta y de ser posible controlarlas para que no afecten la medición. Estas magnitudes se les conoce como **magnitudes de influencia**. Por ejemplo al medir la resistencia de un SPT, el mensurado es la resistencia eléctrica del sistema; la temperatura del ambiente, la humedad del terreno y su composición química, el largo del electrodo, etc., son las magnitudes de influencia, pues aunque no interesa conocer su valor, afectan el resultado de la medición.

El resultado de una medición es el valor que se da a un mensurado y que se obtiene por medición. El valor de una magnitud proporcionado por un instrumento se le llama **indicación**.

2.1.4 Exactitud

Viene dada por un número que indica la cercanía entre el resultado de una medición y el valor convencionalmente verdadero de la magnitud medida. Este número especifica la diferencia entre el valor medido y el valor convencionalmente verdadero de la magnitud y se considera como un concepto cualitativo que tiene que ver con el equipo y con el método de medición cuando las magnitudes de influencia están controladas y la magnitud del mensurado es constante.

2.1.5 Repetibilidad

Es la proximidad de la concordancia entre los resultados de las mediciones sucesivas del mismo mensurado, realizadas bajo las mismas condiciones de medición. La repetibilidad se puede expresar en términos de las características de dispersión de los resultados. A mayor dispersión, menor repetibilidad. La precisión depende de la persona que efectúa la medición cuando las magnitudes de influencia y el mensurado son constantes.

2.1.6 Reproducibilidad

Es la precisión bajo condiciones variables de medición, es decir, la obtención de resultados muy próximos cuando ellos se obtienen con el mismo método, en idénticas condiciones de prueba, en laboratorios diferentes, con diferentes operadores y diferente equipo. Se representa cuantitativamente mediante sus características de dispersión.

Para que una expresión de reproducibilidad sea válida es necesario especificar las condiciones que variaron (principio de medición, observador, instrumento de medición, patrón de referencia, lugar, condiciones de uso tiempo).

2.1.7 Incertidumbre

Es un parámetro (una desviación estándar por ejemplo) que se asocia con el resultado de una medición que es caracterizada por la dispersión de valores que se pueden atribuir al mensurando. La incertidumbre es una estimación que caracteriza un intervalo de valores en el que se sitúa con una alta probabilidad, el valor verdadero de la magnitud medida.

La incertidumbre de una medición comprende, muchos componentes que se pueden evaluar mediante distribuciones estadísticas de series de mediciones y distribuciones de probabilidad. Se comprende que el resultado de la medición es el mejor estimado del valor del mensurando y que todos los componentes de la incertidumbre incluyendo aquellos que surgen de efectos sistemáticos, tales como componentes asociados a las correcciones y a los patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

2.1.8 Error de una medición

El error absoluto es el resultado de una medición menos el valor verdadero del mensurando. El error se produce cuando una inexactitud en el proceso de medición altera el resultado, lo que origina una diferencia entre el valor obtenido y el valor convencionalmente verdadero de una magnitud.

El error viene dado por:

$$\Delta = X_i - X \quad (2.1)$$

donde:

Δ = error

X_i = resultado obtenido en la medición

X = valor convencionalmente verdadero

El error absoluto es el modulo del error. El error absoluto con el signo cambiado se le llama corrección, es decir:

$$-\Delta = X - X_i \quad (2.2)$$

El error relativo viene dado por:

$$\delta = \frac{X_i - X}{X} \quad (2.3)$$

El **valor verdadero** de una magnitud, en realidad no puede determinarse (por ahora), pues para ello se necesitaría realizar una medición perfecta, lo cual en la práctica no ocurre, aún bajo las normas más estrictas de control de las magnitudes de influencia. Por esto se utiliza el concepto del **valor convencionalmente verdadero**, por lo cual no es posible conocer en forma exacta el valor verdadero del error.

En general, los errores se dividen en:

- Errores gruesos o graves
- Errores sistemáticos
- Errores aleatorios

2.1.8.1 Error grueso o grave

Es un error debido principalmente a fallas del operador, tales como: mala lectura del instrumento de medición, elección de la escala inapropiada, ajuste incorrecto del instrumento, aplicación no apropiada, registro incorrecto de los resultados de la medición, etc. Este tipo de error se presenta por ignorancia o descuido. Los errores de este tipo se detectan con facilidad midiendo el mensurando más de una vez y por un operador distinto.

2.1.8.2 Error sistemático

Se define como la media de un número infinito de mediciones de un mensurando realizada bajo condiciones de repetibilidad menos el valor verdadero del mensurando. Entre las causas conocidas de los errores sistemáticos están las fallas del instrumento y los efectos ambientales, sin embargo también hay causas desconocidas aún que dan origen a este tipo de errores. Los errores sistemáticos pueden ser: instrumentales y ambientales.

Los errores sistemáticos instrumentales son ocasionados por fallas en los instrumentos tales como falta de calibración, desgaste de las piezas o partes defectuosas, etc. Cuando el error es originado por una respuesta muy lenta del instrumento al cambio de magnitud del mensurando se produce un **error sistemático dinámico**. Si el error se produce porque el equipo de medición no está diseñado para medir el valor de una magnitud (ya sea porque este valor es muy grande o muy pequeño) se produce un **error sistemático estático**.

Los errores ambientales son ocasionados por magnitudes de influencia presentes en el ambiente donde se realiza la medición, por ejemplo, la temperatura, la humedad, el campo eléctrico, etc.

2.1.8.3 Error aleatorio

Este error es el resultado de una medición menos la media que resultaría de un número infinito de mediciones del mismo mensurando realizadas bajo condiciones de repetibilidad.

El error aleatorio se debe a causas desconocidas y es el error presente cuando los errores sistemáticos han sido considerados; en mediciones de alta exactitud los errores aleatorios son importantes, aunque no sean muy grandes. Este error no se puede conocer ni corregir por ningún método de control conocido y su tratamiento solo se puede hacer mediante el análisis estadístico, no para conocerlo exactamente, sino para hacer un estimado de él.

El error aleatorio es un evento independiente que no guarda relación alguna con la posibilidad de la aparición de cualquiera de los demás tipos de errores.

Al hablar del **error absoluto**, este será el resultado del error aleatorio sumado con el error sistemático, considerando que no se cometerán errores gruesos:

$$\Delta = \Delta_a + \Delta_s \quad (2.4)$$

donde:

Δ = error absoluto

Δ_a = error aleatorio

Δ_s = error sistemático

2.1.8.4 Tolerancia

Es el máximo error permitido que se encuentra en una medición. Puesto que en la actualidad, ninguna medición es absolutamente precisa, se establece un margen dentro del cual varía el valor de la medición. La tolerancia se especifica en patrones de referencia e instrumentos de medición.

2.2 Instrumentos de medición y sus características

2.2.1 Patrones de referencia

El patrón de referencia es una medida que se utiliza para reproducir uno o más valores conocidos de una magnitud determinada, tal es el caso de una masa patrón, un bloque patrón, etc.

2.2.2 Transductor de medición

En forma general se define como un dispositivo que proporciona una magnitud de salida, la cual está relacionada como una señal de entrada. Por lo general, los transductores se utilizan para transformar un fenómeno de entrada, tal como sonido, calor, presión, fuerza, acidez, etc., en una señal eléctrica proporcional, que puede ser fácilmente medida, mediante los instrumentos apropiados.

2.2.3 Cadena de medición

Es una serie de elementos que forman la trayectoria desde la entrada hasta la salida de la señal de medición, en un instrumento o sistema de medición.

2.2.4 Sistema de medición

Es un conjunto de instrumentos de medición y otros equipos acoplados para realizar mediciones específicas, por ejemplo, el equipo utilizado para medir la cantidad y la calidad de la potencia eléctrica suministrada.

2.2.5 Tipos de instrumentos

2.2.5.1 Instrumento indicador

Este tipo de instrumento muestra una indicación analógica o digital. Estos instrumentos de medición tienen la capacidad de mostrar los valores de varias magnitudes simultáneamente.

En los instrumentos de indicación analógica, la parte en que se despliega el valor de la señal de salida está formada por un índice y una escala.

El índice es una parte del instrumento que puede ser fija o móvil. Su posición con respecto a las marcas de la escala permite conocer el valor del mensurando. El índice puede ser de varias clases por ejemplo: aguja, punto luminoso, superficie de un líquido, etc.

La escala de un instrumento de medición está formada por un conjunto ordenado de marcas, con una numeración asociada. A cada marca se le llama **marca de la escala**.

Los **instrumentos de indicación digital** presentan la señal de salida mediante números, de allí su nombre.

2.2.5.2 Instrumento registrador

Se le llama así, porque este tipo de instrumento proporciona un registro de la indicación mediante una línea continua o discontinua (analógico) o en forma digital. Un instrumento registrador puede presentar una indicación y registrar los valores de varias magnitudes.

2.2.5.3 Instrumento integrador

Estos instrumentos determinan el valor de una señal de entrada en función de otra y pueden dar una indicación y un registro de la misma. Un ejemplo de este tipo de instrumento es el contador de energía eléctrica, el cual mide la energía eléctrica consumida en función de la corriente que pasa por sus circuitos por unidad de tiempo.

2.2.5.4 Sensor o detector

Es un dispositivo o sustancia que indica la presencia de un fenómeno sin que sea necesario que proporcione una indicación de la señal de entrada. Este dispositivo está sometido directamente a la acción del mensurando y forma parte de una cadena de medición.

2.2.6 Ajuste

Es la operación que consiste en preparar un instrumento de medición para que al usarlo, funcione adecuadamente. El ajuste puede ser automático, semiautomático o manual. El ajuste usual, se realiza utilizando solamente los medios a disposición del usuario.

2.2.7 Calibrado

Consiste en fijar las posiciones de las marcas de la escala de un instrumento de medición, en función de los valores correspondientes del mensurando.

2.2.8 Alcance nominal

Es el intervalo de la escala obtenida por una posición dada de los controles de un instrumento de medición. Se expresa en términos de sus límites inferior y superior, por ejemplo: 100 Ω a 1,000 Ω .

2.2.9 Intervalo de medición

Es el módulo de la diferencia entre los dos límites de un alcance nominal; también se le llama amplitud. Por ejemplo, el intervalo de medición para un alcance nominal entre 100 Ω a 1,000 Ω es 990 Ω .

2.2.10 Valor nominal

Este es un valor redondeado o aproximado de una característica de un instrumento de medición que proporciona una guía para su uso.

2.2.11 Característica de respuesta

Es la relación entre una señal de entrada y la respuesta correspondiente a la salida, dentro de condiciones definidas.

2.2.12 Tiempo de respuesta

Se le llama así al intervalo de tiempo que abarca desde el instante en que una señal de entrada es sometida a un cambio brusco especificado, hasta el instante en el cual la señal de salida alcanza un valor estable y sostenido, dentro de límites especificados.

2.2.13 Exactitud

Con relación a un instrumento de medición, la exactitud es la habilidad que este tiene para hacer mediciones con pequeña incertidumbre. La exactitud es una cualidad que varía con cada instrumento.

2.2.14 Precisión o repetibilidad

Se define como la aptitud del instrumento para proporcionar indicaciones próximas entre sí por aplicaciones repetidas del mismo mensurando bajo las mismas condiciones de medición. Estas condiciones incluyen: reducción al mínimo de las variaciones debidas al observador, el mismo procedimiento de medición, el mismo observador, el mismo equipo de medición utilizado bajo las mismas condiciones, el mismo lugar y repetición en un período corto de tiempo.

2.2.15 Sensibilidad

La sensibilidad de un instrumento de medición es el cambio en la señal de salida dividido entre el correspondiente cambio de la señal de entrada. La sensibilidad puede depender del valor de la señal de entrada.

2.2.16 Resolución

En un instrumento indicador o registrador, la resolución es la diferencia más pequeña entre las indicaciones de un dispositivo indicador que puede ser distinguido significativamente.

2.2.17 Estabilidad

Es la capacidad que tiene el instrumento para mantener constante en el tiempo, sus características metrológicas. Cuando la estabilidad se considere en función de otra magnitud diferente del tiempo, esta debe ser mencionada claramente.

2.2.18 Discreción

Es la capacidad que tiene el instrumento de medición para no alterar el valor del mensurando. Un voltímetro que produce efecto de carga en un circuito, es un ejemplo de un instrumento que no es discreto, mientras que una balanza es un ejemplo de un instrumento discreto para la medición de la masa.

2.2.19 Error de un instrumento de medición

Es la diferencia entre el valor indicado por el instrumento y el valor convencionalmente verdadero de la magnitud de entrada correspondiente. Los errores máximos tolerados en un instrumento de medición, son los valores extremos de error permisibles, de acuerdo con las especificaciones del instrumento.

El error en el punto de control, es un error que se da en una indicación del valor del mensurando específica, la cual es elegida para la verificación del instrumento.

2.2.20 Especificación de un instrumento de medición

Las especificaciones técnicas de un instrumento, son una descripción escrita de algunos parámetros de su comportamiento, que no necesariamente coincide con lo que sucede en la práctica

3. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA PARA MEDIR LA RESISTENCIA DE UN SPT Y LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

En su forma más simple, la medición de la resistividad aparente consiste en la inyección de corriente en el terreno a través de un par de electrodos A y B, y en la medida de la diferencia de tensión entre dos electrodos detectores M y N. El generador más sencillo para la inyección de corriente en el terreno consiste en una batería de pilas secas conectadas en serie. Para medir la diferencia de tensión entre los electrodos M y N se utiliza un voltímetro electrónico de gran impedancia de entrada, capaz de medir tensiones comprendidas entre poco más de un voltio y fracciones de milivoltio. Además, el voltímetro debe incorporar un dispositivo independiente que permita compensar las tensiones que aparecen entre los electrodos de medida en ausencia de la corriente de emisión cuando se emplean electrodos polarizables, o cuando la cancelación de potenciales de contacto entre electrodos no polarizables no es total.

Ahora bien, ¿realmente es necesario un instrumento especial para medir la resistencia de un SPT? Sí, ya que en una medición de este tipo la instrumentación especializada es muy importante para obtener una lectura apropiada del valor de la resistencia del SPT. Sin embargo, mucha gente piensa que la resistencia de puesta a tierra es una resistencia común y corriente que puede medirse con cualquier ohmetro, lo cual es un error.

Muchos tipos de instrumentos tales como los multímetros y los medidores de aislamiento pueden medir resistencia y es fácil sentirse tentado a utilizar uno de tales instrumentos para medir la resistencia de puesta a tierra. Sin duda se obtendrá una indicación, pero ¿una indicación de qué?

El problema al utilizar estos instrumentos para medir la resistencia de puesta a tierra consiste en que estos no fueron diseñados para tal fin, pues el electrodo bajo prueba está enterrado y la tierra al no ser un circuito específicamente diseñado, es una parte crítica en la medición ya que en ésta, existen magnitudes de influencia que afectan la indicación del instrumento.

Al medir resistencia de puesta a tierra, los multímetros y los medidores de aislamiento son afectados por voltajes erráticos que existen en la tierra. Estos instrumentos darán entonces una indicación de la resistencia en serie en un circuito formado por dos puntos que conectados forman una malla por lo cual la indicación obtenida no representa la magnitud de la resistencia del SPT.

Ahora bien, no todos los instrumentos de medición de resistencia a tierra trabajan de la misma manera. Existen diferencias muy marcadas en el tipo de corriente empleada.

A manera de ilustrar estas diferencias, aparatos como el *Vibroground* y el *Megger* de tierras, emplean corriente alterna para la medición pero a diferentes frecuencias y los voltajes en circuito abierto son respectivamente de 120 y 22 voltios.

Cuando se calibran estos instrumentos contra resistencias patrón, ambos dan la misma lectura. En campo, las lecturas pueden variar por la impedancia del terreno a esas distintas frecuencias.

Las ventajas de utilizar instrumentos que generan corriente alterna en vez de continua son: evitar la tensión de polarización de los electrodos y las corrientes naturales que circulan por el interior de la tierra (corrientes telúricas).

En el mercado también existen aparatos de medición de tipo gancho, los cuales tienen dos mayores limitaciones. La primera es que dependen de que las conexiones del sistema de tierras estén bien hechas para obtener buenos resultados, porque cualquier resistencia en serie afecta la lectura y, la segunda es que en electrodos de mallas industriales donde por inducción electromagnética se pueden obtener más de 2 amperios en los conductores de puesta a tierra, el aparato no puede ser usado. Por otra parte, este tipo de aparato es muy útil donde se toman lecturas con frecuencia a los sistemas de tierras, ya que puede ser empleado en lugares donde se requiere tomar lecturas con los equipos energizados permanentemente, o con electrodos inaccesibles.

Las electrodos de los instrumentos de medición pueden ser colocadas en todas direcciones y en una infinidad de distancias entre ellos. Aunque es el mismo punto de medida, las lecturas no son idénticas; a veces ni en terrenos vírgenes debido a la presencia de corrientes de agua o de capas de distinta resistividad.

En los terrenos industriales es aún mayor la diferencia debido a la presencia de objetos metálicos enterrados como tuberías, varillas de construcción, rieles, canalizaciones eléctricas, etc.

3.1. Componentes esenciales de un instrumento

3.1.1. Fuente de potencia

Debido a que la corriente que circula por el circuito de medida debe atravesar resistencias que pueden ser de varios cientos o miles de ohmios, los voltajes usados en los equipos deben ser bastante altos. Estos voltajes pueden variar desde 50 a 500 voltios.

Estos voltajes deben ser producidos por unidades contenidas en el mismo aparato o de lo contrario deben ser livianos y fáciles de transportar, además deben ser fácilmente conectables al circuito de medición.

Estos voltajes estos voltajes son preferibles alternos y de una frecuencia de 60 a 70 Hz, capaz de liberar una corriente para la medida del circuito requerido.

3.1.2. Métodos para eliminar corrientes de error

Las corrientes de error pueden ser producidas por el mismo instrumento y por cualquier aparato o sistema vecino. Para que no afecten la medición estas corrientes deben ser eliminadas por un rectificador que se encuentra en el mismo instrumento. Este rectificador rechaza cualquier corriente de diferente frecuencia a la de medida del circuito.

3.1.3. Sistemas de medición

Los instrumentos utilizados para medir resistencia y resistividad, utilizan internamente alguno de los siguientes sistemas de medición:

- El sistema ohmetro o voltamperímetro
- El sistema comparador de resistencia
- El sistema de balance nulo
- El sistema combinado

3.2. Sistemas de medición

3.2.1. Sistema de ohmetro o voltamperímetro

Se analiza el circuito equivalente que se muestra en la gráfica siguiente.

Fig. 29. Circuito básico del sistema de ohmetro o voltamperímetro

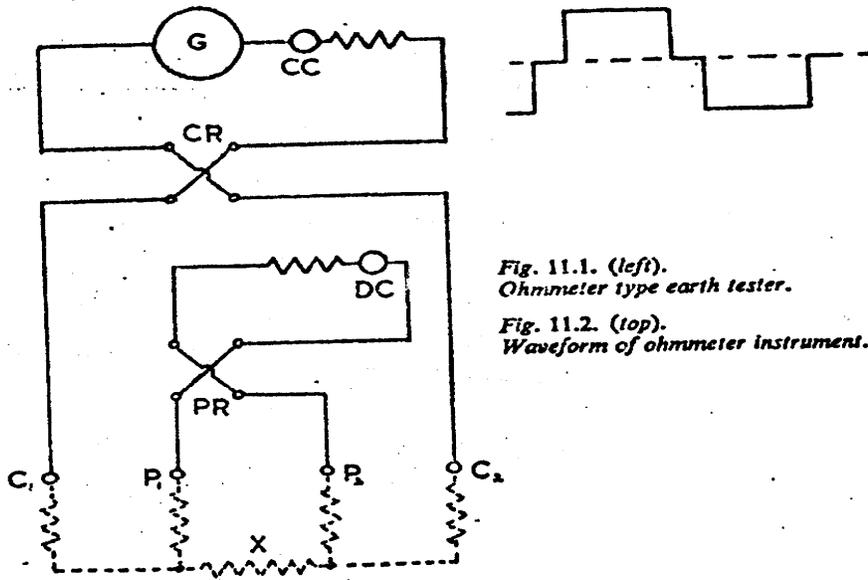


Fig. 11.1. (left).
Ohmmeter type earth tester.

Fig. 11.2. (top).
Waveform of ohmmeter instrument.

Fuente: *Instruments for earth-resistance measurements*. 209.

3.2.2. Sistema comparador de resistencias

Tanto en X como en R circula una corriente I; G mide la corriente que circula por él, en el momento se hace circular una corriente

$$I_0 = \frac{I^*(R+X)}{P_1 + P_2 + X} \quad (3.1)$$

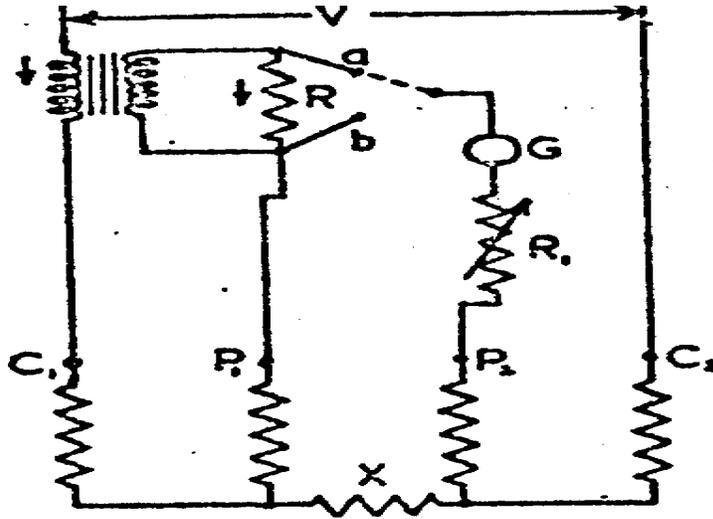
luego se pasa G a la posición b donde se mide la corriente i

$$i = \frac{I^* X}{P_1 + P_2 + X} \quad (3.2)$$

luego dividimos $i/I_0 = X/(X+R)$

$$\frac{i}{I_0} = \frac{X}{X+R} \quad (3.3)$$

Fig. 30. Circuito básico del sistema comparador de resistencias

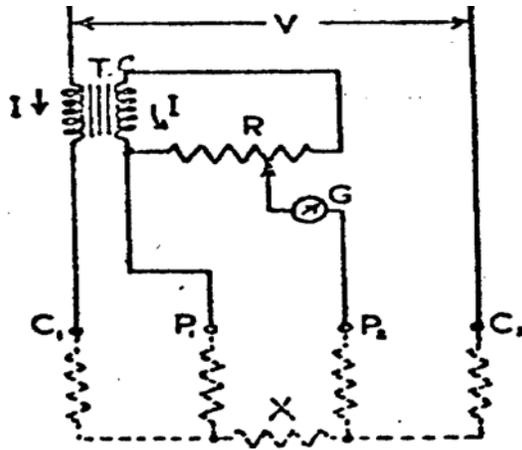


Fuente: *Instruments for earth-resistance measurements*. 211.

3.2.3. Sistema de balance nulo

El proceso consiste en balancear el voltaje a través de R , éste es indicado en el galvanómetro G , hasta que la corriente que circula por el galvanómetro sea cero. Por lo general, R es un potenciómetro o un banco de resistencias. Al ser cero la corriente que circula por el galvanómetro tenemos que $R=X$.

Fig. 31. Circuito Básico del sistema de balance nulo

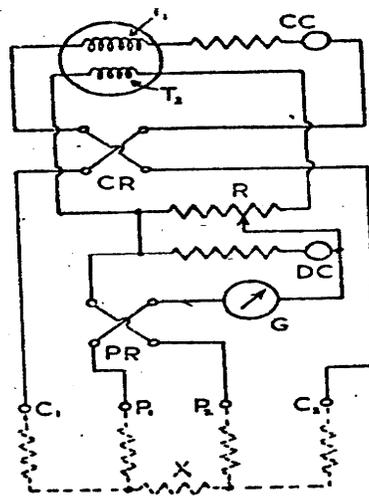


Fuente: *Instruments for earth-resistance measurements*. 214.

3.2.4. Sistema combinado

Este sistema se llama así porque se añade al sistema de voltamperímetro, el sistema de balance nulo para hacerlo más sensible.

Fig. 32. Circuito básico del sistema combinado



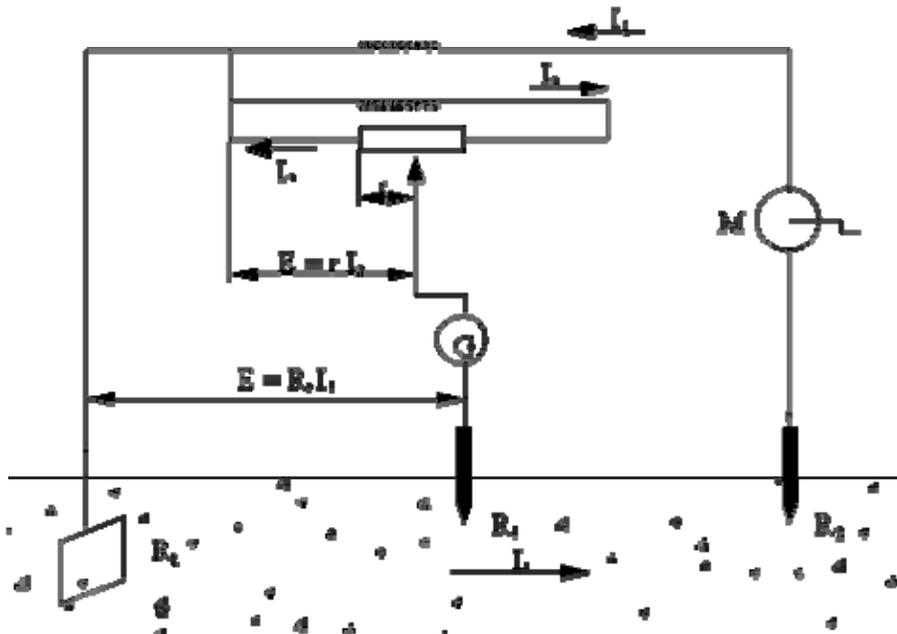
Fuente: *Instruments for earth-resistance measurements*. 215.

3.3. Telurómetro

Este aparato se basa en el método de compensación y funciona con un generador magnético de C.A, que lleva un transformador en serie de relación exacta 1:1, es decir, que la corriente del primario es siempre igual a la del secundario.

Según se muestra en la figura, disponiendo de dos pequeños electrodos clavados en el suelo, como tomas de tierra auxiliares (R_1 , R_2), además de la toma de tierra que se quiere medir (R_t), ya se pueden establecer las ecuaciones que resuelven el circuito eléctrico.

Fig. 33. Esquema de funcionamiento de un telurómetro.



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

Dando vueltas a la manivela del magneto y ajustando al mismo tiempo el potenciómetro de manera que por el galvanómetro no pase corriente, se logra que $V = r I_2$ y $V = R_t I_1$ sean iguales; por otra parte, las corrientes también serán iguales, por lo que se tiene que

$$r * I_2 = R_t I_1 = R_t I_2 \quad (3.4)$$

y por tanto:

$$r = R_t \quad (3.5)$$

es decir, la resistencia que marque el potenciómetro será igual a la resistencia de la toma de tierra.

La particularidad de este método consiste en que la medición, se hace independientemente de las tomas de tierra auxiliares que se realizan R_1 y R_2 , aunque es aconsejable que R_2 no sea muy grande, pues de ella depende I_1 , y esta no conviene que sea muy pequeña.

Estas tres tomas de tierra deberán estar separadas unas de otras unos 10 m. para evitar la influencia entre ellas. También es importante resaltar la conveniencia de hacer estas mediciones a frecuencias distintas a la industrial, para evitar las posibles interferencias con otras corrientes que no pertenezcan al aparato. Por lo general las frecuencias que utilizan los telurómetros son relativamente altas, del orden de 500 a 1.200 Hz.

El telurómetro descrito corresponde a un modelo clásico de hace años; en la actualidad, basados en este principio, se construyen modelos que sustituyen el magneto por un generador de pilas y la lectura de las mediciones se realiza, en algunos modelos, sobre un display digital. A continuación se presenta el siguiente ejemplo:

3.3.1. Telurómetro T-4V (Digital)

El telurómetro tipo T-4V es un instrumento portátil de trabajo, concebido para realizar mediciones de resistencia de tierra y resistividad de los suelos. Está especialmente diseñado para su adaptación a mediciones en condiciones difíciles: presencia de tensiones parásitas, corrientes telúricas elevadas, valores importantes de las resistencias de las tomas auxiliares, etc. Pueden seleccionarse tres fondos de escala a 20, 200 y 2000 Ω , correspondientes a corrientes de medición de 10, 1 y 0.1 mA.

Fig. 34. Telurómetro digital mod. T-4V.



Fuente: <http://elektra.udea.edu.co/~tierras/index.html>.

Tabla III. Características técnicas del telurómetro T-4V

Alimentación	
Pilas alcalinas	8x1.5V (LR6)
Autonomía con pilas	1000 medidas de 15s
Campos de medida	
Rango 1	(20 Ω) 0.00 – 19.99 Ω
Rango 2	(200 Ω) 19.0 – 199.9 Ω
Rango 3	(2000 Ω) 199 – 1999 Ω
Corrientes de medición	
Rango 1/2/3	10, 1, 0.1 mA
Histéresis de campo	+/- 50 pts en torno a 1900 pts +/- 2.5%
Tiempo de respuesta (para obtener una medición estable)	6s
Temperatura de referencia	23 °C +/- 3°C
Temperatura de trabajo	-10/55 °C
Humedad relativa (sin condensación)	20/90%

Fuente: <http://elektra.udea.edu.co/~tierras/index.html>. 2002.

El equipo, montado en caja ligera de policarbonato, antichoque y estanca IP 54, está completado con:

- Un sólo pulsador de medición
- Un doble sistema de conmutación automática de escala y de corriente de medición
- Una amplia pantalla LCD de 7 segmentos, 3 1 / 2 dígitos, altura 18 mm
- Tres indicadores luminosos para advertir anomalías
- La alimentación del equipo se ha previsto con 6 pilas alcalinas de 1,5 V tipo LR6 que proporcionan una autonomía de unas 1000 medidas de 15

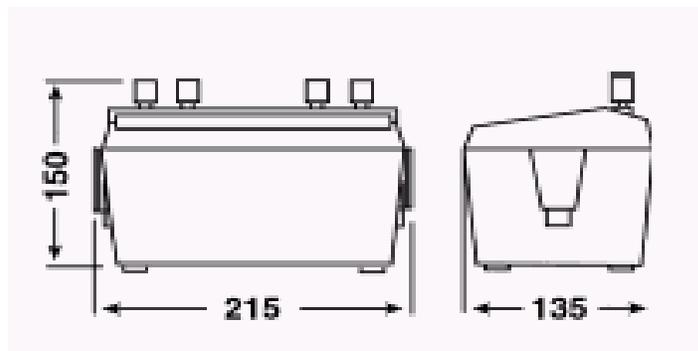
segundos de duración. La banda de tensión admisible oscila entre 7 y 9,5 V

Tabla IV. Características mecánicas del telurómetro T-4V

Vibraciones: El instrumento soporta vibraciones de una aceleración de 10 a máx., sobre un rango de frecuencia de 10 a 55 Hz, de acuerdo con la norma CEI 68.2.6	
Choques: Según norma CEI 68.2.27, 50g durante 11ms, proporcional en tres ejes.	
Caídas: La caja soporta la caída desde 1m de altura, conforme a la norma CEI 68.2.32, sin sufrir ninguna degradación mecánica o funcional.	
Dimensiones	Ver figura
Peso	1.5Kg
Código	7 70 119

Fuente: <http://elektra.udea.edu.co/~tierras/index.html>. 2002.

Fig. 35. Las dimensiones del equipo están dadas en milímetros.



Fuente: <http://elektra.udea.edu.co/~tierras/index.html>.

3.4. Megger

El Geophysical Megger es otro instrumento que trabaja con corriente alterna. Lleva un generador de manivela y, trabaja con frecuencias más bajas, lo que permite una mayor profundidad de penetración. Dependiendo de la velocidad de rotación de la manivela la frecuencia puede variar entre 10 y 20 Hz. Los valores a

fondo de escala entre los que puede trabajar el aparato van desde $0,3 \Omega$ a 30Ω , con una precisión de $\pm 1 \%$ del valor del fondo de la escala empleada.

Al conectar sus terminales de corriente (C_1 y C_2) con un electrodo de prueba y con el electrodo que se va a medir, el Megger establece un circuito a través de la tierra por el cual circula una corriente alterna de prueba de forma cuadrada cuya frecuencia es distinta de cualquier armónica generada por el sistema de potencia. Esta señal es utilizada por el medidor para establecer una medición. Similarmente, el medidor de tierra posee un par de terminales de potencial (P_1 , P_2); una de ellas está conectada por un cable a un electrodo con el fin de medir la diferencia de potencial en el punto donde está colocado dicho electrodo.

Los óhmetros de tierra marca Megger, utilizan un instrumento de bobinas cruzadas que opera como cocientímetro, por lo cual teniendo el voltaje y la corriente, calculan la resistencia de tierra aplicando la ley de Ohm.

También hay equipos que utilizan generadores electrónicos de alta frecuencia para efectuar mediciones de puesta a tierra en torres de alta tensión sin desconectar el hilo de guardia, considerando que a esas frecuencias dicho hilo presenta una reactancia inductiva suficientemente elevada como para considerarlo un circuito abierto.

3.4.1. Principio de funcionamiento del Megger modelo 21159

Este instrumento (fig. 38. d) consiste de un indicador calibrado en ohms y mega ohms y un generador con manivela y un transformador con una serie de resistencias y rectificadores.

3.4.1.1. Indicador

El indicador es del tipo de bobinas cruzadas, permanentemente magnetizadas. Cuando la corriente y el voltaje son aplicados al circuito indicador, la aguja de indicación se defleca. El grado de deflexión depende de la resistencia de contacto de los componentes del circuito y de la resistencia que se está midiendo.

3.4.1.2. Generador

El generador de corriente alterna consiste en un simple devanado en el estator y un imán permanente en el rotor. La corriente es rectificada mediante un rectificador de onda completa. El rotor trabaja con un cojinete permanentemente lubricado.

3.4.1.3. Manivela

La manivela es parte de un mecanismo de engranajes que sirve para mover el rotor del generador. Puesto que la lubricación del mecanismo se hace en la fabrica, este no necesita lubricación adicional.

Fig. 36. Algunos modelos de medidores de resistencia de tierra marca Megger



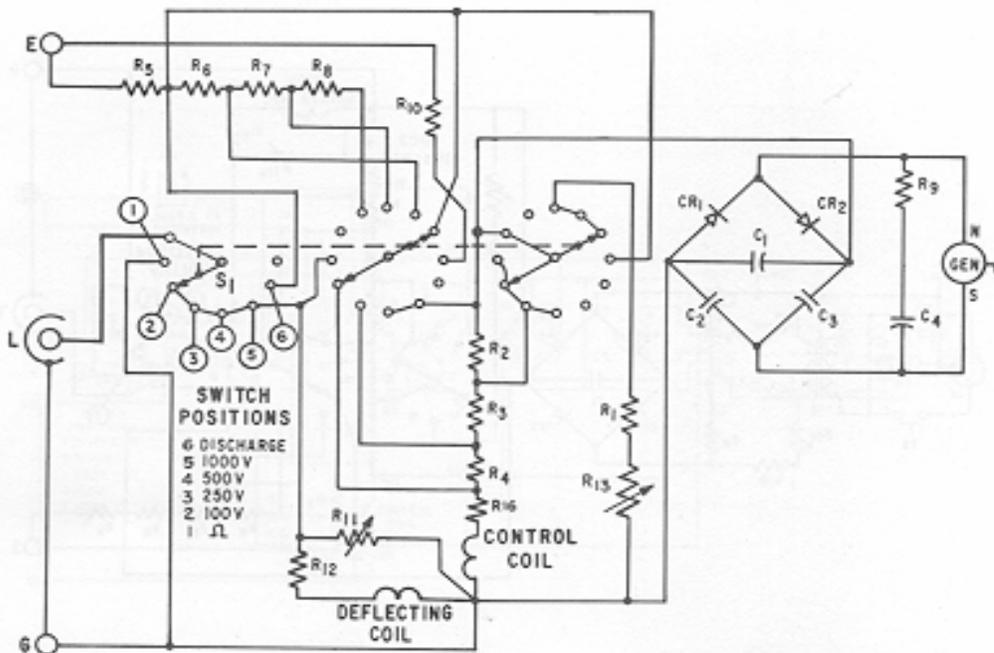
Fuente: Megger. 2002.

Fig. 37. Accesorios incluidos con los medidores marca Megger



Fuente: Megger. 2002.

Fig. 38. Diagrama del circuito del Megger de tierras modelo 21159



Fuente: James G Biddle Co. **Manual 21-50Jb.**

Tabla V. Características técnicas del Megger 21159

Temperatura de operación: 5 a 45°C			
Voltaje en circuito abierto	Rango		Exactitud
a 160 RPM, velocidad mínima de la manivela: 1000V a 1050V dc 500V a 550V dc 250V a 275V dc 100V a 110V dc	0 a 20000 M ζ a 1kV 0 a 20000 ζ	El cambio del voltaje mientras la velocidad de la manivela varía entre 160 a 240 RPM es +/- 3%	+/- 0.030" (0.76 mm)
Longitud de la escala: 2.375" aprox. (60.3 mm)			

Fuente: James G Biddle Co. **Manual 21-50Jb.**

3.5. Vibroground

El vibroground posee una batería como unidad de poder, la cual da energía a un vibrador síncrono autónomo. El equipo tiene la capacidad de medir la resistividad así como la resistencia real en sistemas de puesta a tierra.

La exactitud de la lectura no es afectada por la resistencia de los cables ni de los electrodos de prueba. Además, las corrientes vagabundas de dc o ac que pueden haber en el suelo no hacen que el equipo disminuya en su exactitud. El vibroground tiene cuatro rangos de medición: de 0 a 10 Ω , 0 a 100 Ω , 0 a 1 K Ω y 0 a 10 K Ω .

3.5.1. Aplicaciones

- Determinación de la resistividad del terreno por el método de los cuatro electrodos. El rango de medición de este instrumento hace posible mediciones exactas de la resistividad del terreno desde 0 a 1915 $K\Omega \cdot m$ a 3 o más metros de profundidad.
- Medición de la resistencia de puesta a tierra por el método de los tres electrodos. También mide los efectos de polarización y la resistencia del ánodo.
- Mide la resistencia de circuitos en general por el método de dos electrodos.
- Este medidor viene con el juego de cables y cuatro electrodos.

Fig. 39. Vibroground



Fuente: *Advanced Test Equipment*. 2000.

3.6. Geotest

3.6.1. Medidor de resistencia de tierra y resistividad geotest ht2016

Es un instrumento portátil para la medición de la resistividad del terreno (ρ), y de la resistencia de tierra con el sistema de 4, 3 y 2 terminales.

Características técnicas:

- Visualizador LCD con indicación de 3½ dígitos
- Escalas: 0.1-125.6 Kw; 0.01-1999 W
- Cambio de escala automática
- Resolución mínima 0.01Wm en resistividad, 0,01W en resistencia de tierra
- Visualización directa del valor "r" indicando la distancia entre picas
- Alimentación a pilas
- Indicación del estado de las pilas
- Precisión: $\pm 2\%$ + 2 dígitos

- CAT III, grado de polución 2
- Capacidad de la memoria aprox. 1000 posiciones
- Salida RS232 para impresora y PC
- Certificado de calibración
- Construido bajo normas EN 61010-1 y EN 61557
- Auto apagado

Fig. 40. Geotest HT2016. Instrumento multifunción para la medida de resistencia de tierra, diferenciales y corriente de cortocircuito



Fuente: <http://elektra.udea.edu.co/~tierras/index.html>. 2002.

Tabla VI. Características técnicas del Geotest HT 2016.

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA		
Rango (Ω)	Resolución (Ω)	Exactitud
0.01 – 19.99	0.01	62%

20 - 199.9 200 - 1999	0.1 1	
MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO		
Rango (K Ω *m)	Resolución (K Ω *m)	Exactitud
0.0006 – 0.1256 0.125 – 1.256 1.25 – 19.99 20 – 199.9	0.0001 0.001 0.01 0.1	6 2 %
Frecuencia de prueba Corriente de prueba Voltaje de circuito abierto Forma de onda del voltaje de prueba	125 Hz/75 Hz/41.66 Hz 6 1 Hz < 10 mA < 80 V senoidal	

Fuente: <http://elektra.udea.edu.co/~tierras/index.html>. 2002.

3.7. Otros instrumentos de medición

3.7.1. El tellohm (Mash and Thompson)

En este instrumento la corriente es suministrada por cinco pilas de 1,5 V y un vibrador la transforma en corriente alterna de 110 Hz. Esta corriente pasa a los electrodos inyectores a través de un transformador, pudiendo obtenerse un máximo de 150 V eficaces. La detección es síncrona con la corriente inyectada. El instrumento da directamente la resistencia del suelo entre los electrodos detectores. El campo de medición del instrumento comprende de 0,3 Ω a 10,000 Ω a fondo de escala, con una precisión de ± 1 % del valor de fondo de la escala empleada. Los mismos autores comentan que a profundidades mayores a 30 m es recomendable emplear un instrumento con mayor potencia de salida.

3.7.2. El terrameter (ABEM)

Este instrumento utiliza una baja frecuencia (4 Hz), por lo que puede emplearse para mayores profundidades de investigación que el Tellohm. Se basa en un oscilador electrónico transistorizado y es más manejable que el Megger. Su potencia máxima es 6 W y puede medir resistencias comprendidas entre 0,01 Ω y 10,000 W. Un modelo nuevo, el Terrameter SAS 300 C, proporciona corrientes de hasta 20 mA (160 V_p máximo) con períodos de la señal desde 3,6 s hasta 14,4 s. La impedancia de entrada del detector es mayor que 10 M Ω y el margen de tensiones de 0 V a 500, con una resolución de 1 mV y una exactitud del 2% + resolución.

Si trabaja en modo impedancia, la resolución es de 0,05 $\mu\Omega$ (a 20 mA) y la exactitud del 2% + resolución (a 1 MW). Para incrementar las prestaciones se puede conectar a la salida de los terminales inyectores el Terrameter SAS 2000 Booster, el cual proporciona hasta 500 mA y 400 V de pico, con una potencia máxima de 40 W.

3.7.3. Instrumento de verificación multifunción speedtest ht 2018

Es un instrumento multifunción para la medida de los diferenciales, la resistencia de tierra de bucle y la presunta corriente de cortocircuito. SPEEDTEST permite la verificación de los tiempos y de la corriente de disparo de cualquier tipo de diferencial (A, AC, y selectivos), con la posibilidad de comparar los tiempos de disparo detectados con los exigidos por las normativas vigentes, puede realizar la prueba en modo manual o automático con valoración final de los resultados detectados. Otra prueba fundamental que el

SPEEDTEST realiza es la medida de la resistencia de tierra de bucle desde la toma de corriente con o sin la intervención del diferencial y la medida de la presunta corriente de cortocircuito. Permite realizar las verificaciones necesarias en las instalaciones eléctricas para la seguridad y la certificación, utilizando un sólo instrumento manejable y ligero.

- Incluye certificado de calibración (ISO9000)
- Salida serie RS232 para PC o impresora
- 350 posiciones de memoria.
- Sobretensión CAT.III
- Construido bajo normas EN 61010 y EN 61557
- Auto apagado

Tabla VII. Características técnicas del Speedtest HT 2018.

TIEMPO		
Rango de medidas	Resolución	Exactitud
$\frac{1}{2}I_{\Delta N}$, $I_{\Delta N}$ 0-999	1	6(2% de la lectura + 2 dígitos)
$2I_{\Delta N}$ 0-200 general		
0-250 selectivo		
$5I_{\Delta N}$ 0-50 general		
0-160 selectivo		
VOLTAJE DE CONTACTO V_T		
Rango de voltaje fase a tierra	100 - 250 V, 50 -60 Hz	
Rango (V)	Resolución (V)	Exactitud

0-2V _t	0.1	-0% +(2% de la lectura + 2 dígitos)
V _t		25 o 50 V
RESISTENCIA DE TIERRA R_E		
Rango (Ω)	Resolución (Ω)	Exactitud
1-1999	1	6(5% de la lectura + 2 dígitos)
Corriente de prueba	0.5I _N durante la medición de voltaje	
	15mA durante la medición de resistencia	

Fuente: <http://elektra.udea.edu.co/~tierras/index.html>. 2002.

3.7.4. Macrotest Ht 5030

Es un instrumento multifunción, que registra anomalías de tensión y picos de corriente. Es un instrumento electrónico para verificaciones en esquemas eléctricos del tipo TT, TN o IT, con tensiones de servicio de 380/220V. Con Pinza HT97 (desde 1mA hasta 100 A), Kit de tierras y alimentador de red. Entre sus características se pueden mencionar:

- Medición de continuidad en conductores equipotenciales de protección (200mA)
- Medición de la resistencia de aislamiento (100, 250, 500 y 1000 V_{CC})
- Medición del tiempo y la corriente real de disparo de los diferenciales, en modo manual o automático, del tipo A, AC o selectivos y comparación con los tiempos establecidos en la norma
- Medición del voltaje de contacto

- Medición de la resistencia de puesta a tierra con y sin intervención del diferencial
- Medición de la resistencia de tierra con picas
- Medición de la resistividad del terreno (ρ)
- Medición de la presunta corriente de cortocircuito
- Medición de voltaje y frecuencia
- Medición del sentido cíclico de las fases (RST)
- Visualizador numérico digital / gráfico e histográfico
- Salida RS232 para PC
- Certificado de calibración
- Construido bajo normas EN61010 y EN61557
- Auto apagado

Fig. 41. Macrotest HT 5030. Instrumento multifunción, registra disturbios de voltaje y picos de corriente y mide la resistencia de puesta a tierra



Fuente: <http://elektra.udea.edu.co/~tierras/index.html>. 2002.

Tabla VIII. Características técnicas del Macrotest HT 5030

Rango (Ω)	Resolución (Ω)	Exactitud (Incluye resistencia de calibración)
0.01 – 19.99	0.01	+/- (2% de lectura + 2 dgts.)

Corriente de prueba	> 200 mA dc
Voltaje de circuito abierto	> 4.5V

Fuente: <http://elektra.udea.edu.co/~tierras/index.html>. 2002.

3.7.5. Equipo con pinzas para medir la resistencia de un SPT

Los medidores de resistencia de tierra modelos 3710 y 3730 son muy útiles donde se toman lecturas frecuentes a los sistemas de tierras, ya que puede ser empleado en lugares con los equipos energizados permanentemente, o con electrodos inaccesibles, ya que por su diseño, pueden conectarse aún alrededor del cable que conecta al electrodo con el resto de la instalación eléctrica. Además es posible medir la continuidad de los circuitos y verificar el estado de las conexiones y medir corriente.

El equipo de medición de tipo gancho, tiene dos grandes limitaciones:

- La exactitud de la medición depende de que las conexiones del SPT estén bien hechas, porque cualquier resistencia en serie afecta la lectura.
- En electrodos de mallas, donde por inducción electromagnética se pueden obtener más de 2 A en los conductores del SPT, el aparato no puede ser usado.



Fig. 42. Medidores Clamp-on modelos

de inducción marca 3710 y 3730.

Fuente: AEMC.

Tabla IX. Características técnicas de los medidores de inducción Clamp-on modelos 3710 y 3730

Resistencia de tierra			
Rango de medida	Rango	Resolución	Exactitud
Auto rango 1.0 a 1200 ζ	1.0 a 50.0 ζ	0.1 ζ	(1.5% + 0.1 ζ)
	50.0 a 100.0 ζ	0.5 ζ	(2.0% + 0.5 ζ)
	100 a 200 ζ	1 ζ	(3.0% + 1 ζ)
	200 a 400 ζ	5 ζ	(6.0% + 5 ζ)
	400 a 600 ζ	10 ζ	(10% + 10 ζ)
	600 a 1200 ζ	50 ζ	Aprox. 25%
Corriente de tierra o de fuga			
Auto rango 1 mA a 30.00 A rms	1 a 300 mA	1mA	(2.5% + 2 mA)
	0.300 A a 3.000 A	0.001 A	(2.5% + 2 mA)
	3.00 A a 30.00 A	0.01 A	(2.5% + 20 mA)

Fuente: **Clamp-on. Ground resistance tester models 3710/3730, manual.**

3.7.5.1. Principio de operación

Típicamente, la distribución de un sistema de tierra puede ser representada por el circuito de la figura 43. Si un voltaje V , es aplicado a un electrodo cualquiera, cuya resistencia de tierra R_x , se desea medir y a través del cual circula una corriente I , entonces, la resistencia del sistema viene dada por

$$\frac{V}{I} = R_x + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (3.6)$$

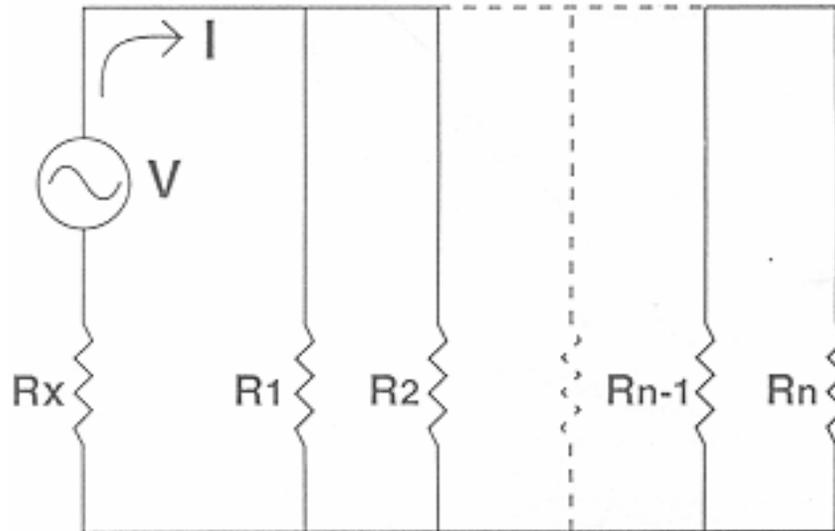
donde usualmente

$$R_x \gg \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (3.7)$$

por consiguiente se establece que $V/I = R_x$. Si la corriente es medida cuando el voltaje se mantiene constante, entonces la resistencia de tierra del electrodo puede ser encontrada.

Una señal es enviada a un transformador de corriente a través de un amplificador de potencia, mediante un oscilador que genera un voltaje constante con una frecuencia de 1689 kHz. La corriente resultante es medida entonces por un CT. Un filtro activo se usa para amortiguar la corriente de tierra a frecuencia industrial del ruido de alta frecuencia.

Fig. 43. Circuito equivalente que muestra la distribución de un SPT.



Fuente: *Clamp-on. Ground resistance tester models 3710/3730, manual.*

3.7.6. Gtr-2 equipo para medición de resistividad de un terreno muy grande

3.7.6.1. Preparación del instrumento

Antes de hacer alguna medición el aparato debe ser revisado cortocircuitando M y N, el display me debe mostrar que dichas entradas se encuentran en cortocircuito.

3.7.6.2. Componentes del equipo

- Dos electrodos de cobre (potencia)
- Dos electrodos de acero (corriente)

Una batería 50-600V
Una batería de 12V (la del GTR-2)
Dos carretes de 500m (AB)
Dos carretes de 100m (MN)

3.7.6.3. Adquisición de datos

Esto es lo que aparece en la pantalla al utilizarlo:

$dV = 12.34\text{mV}$	$Vb = 6.25\text{V}$
$I = 0.415\text{ A}$	$CT = 0.485$
$PS = 10.20\text{mV}$	$CN = 16$
$Res = 37.17\zeta^*\text{m}$	$K = 12.500$

donde:

dV : diferencia de potencial entre los electrodos M y N

I: corriente entre A y B

PS: potencial espontáneo

Res: resistividad aparente calculada

Vb: voltaje de salida del GTR-2

CT: tiempo de cada ciclo

CN: numero ciclo promedio para medir

K: factor que depende de la geometría

3.7.6.4. Especificación del teclado

Este es un parámetro que se puede variar, al pulsar este botón y agregar el nuevo valor o indicando las longitudes A-B y M-N el GTR-2 hace el cálculo de dicho parámetro.



Este botón permite tener varios ciclos de medida los cuales varían cada vez que se pulse el botón así: 1-2-4-8-16-32 medidas sucesivas dependiendo cada una del TC, Cuando haya determinado el ciclo que se desea, se oprime ENTER.



Este tiempo se puede variar así: 0.96 - 1.28 - 2.24 - 3.2 - 5.12 segundos, cuando se tenga el tiempo deseado, se oprime ENTER. Cuando la distancia A B es muy corta basta con 2 o 4 ciclos y con 0.96 o 1.28 para el tiempo de cada ciclo.



Cuando se oprime este botón disminuye en uno CN y CT



Con este se pueden salvar datos, además se tiene la opción de transferir datos a un PC.



Con este botón se pueden ajustar las medidas de voltaje y activar automáticamente el B/L (la luz interna de la pantalla del GTR-20).



Esta es la luz del pantalla, la cual se usa cuando hay mediciones en lugares oscuros o mediciones nocturnas.



Con este botón se definen los parámetros para transferir la información al computador (el número de *bits*).

Este equipo puede trabajar tanto con el método de Wenner como el de Schlumberger.

3.7.7. Oden A

3.7.7.1. Aplicaciones

El ODEN A puede utilizarse en numerosas aplicaciones en las que se requiere alta intensidad:

- Comprobación de inyección de corriente primaria
- Comprobación de interruptores
- Comprobación de transformadores de corriente
- Rendimientos caloríficos

- Comprobación de la integridad de dispositivos de seguridad de tierra tales como: juntas, interruptores y seccionadores. Los dispositivos de seguridad de tierra deben ensayarse a una corriente determinada, tarea para la que el ODEN A es el más indicado.
- Comprobación de la integridad de redes de tierra. Una manera de comprobar redes de tierra es mediante la inyección de corriente entre una referencia a tierra y la tierra que se vaya a comprobar y, a continuación, midiendo la caída de potencia y el porcentaje de flujo de intensidad en la red de tierra. La unidad de intensidad X que se incluye con el Oden A se ha diseñado para este tipo de aplicaciones.

3.7.8. El instrumento de Shepard

Como otros métodos semejantes de dos puntos, permiten efectuar una estimación rápida del valor de la resistividad de los suelos naturales, además de ser fácilmente transportable y permitir mediciones en volúmenes reducidos de suelos, como por ejemplo en el fondo de excavaciones.

El aparato consta de dos electrodos, uno más pequeño que el otro, que se conectan a sendas pértigas aislantes. El borne positivo de una batería se conecta a través de un miliamperímetro al electrodo más pequeño y el borne negativo al otro electrodo. El instrumento puede ser calibrado para expresar las mediciones directamente en $\Omega \cdot \text{cm}$ al voltaje nominal de la batería.

4. MÉTODOS UTILIZADOS PARA MEDIR LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

4.1. Medición de resistencia de puesta a tierra

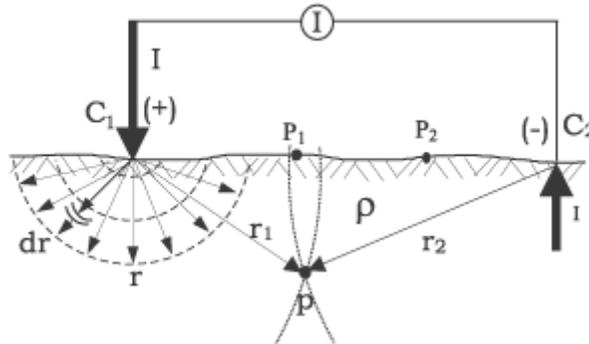
4.1.1. Método del 62% o de caída de potencial

4.1.1.1. Principio de caída de potencial

Al inyectar una corriente I , en el punto C_1 y cerrar el circuito en C_2 , se pueden determinar:

- La expresión del potencial absoluto en un punto p , que se induce desde C_1 y C_2
- El potencial total en un punto cualquiera p , que pertenece a una superficie equipotencial y que intercepta la superficie del suelo en P_1

Fig. 44. Circuito cerrado de corriente en el suelo para la medida de los parámetros



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

Los potenciales en un punto p del suelo, inducidos desde C_1 y C_2 serán:

$$V_{p_1} = \frac{\rho I}{2\pi r_1} \quad (4.1)$$

$$V_{p_2} = \frac{\rho I}{2\pi r_2} \quad (4.2)$$

El potencial total V_p en dicho punto p estará dado por:

$$V_p = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.3)$$

El principio de la caída de potencial también es válido para dos puntos cualesquiera del suelo, tales como P_1 con distancias r_1, r_2 , y P_2 con distancias R_1, R_2 , donde la diferencia de potencial entre ambos será V_s . Para medir los parámetros eléctricos asociados al suelo, con instrumentos convencionales se tiene:

$$V_s = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} F(r_n) \quad (4.4)$$

Al conocer I, V_s o la resistencia $R = V_s / I$, que se mide con un telurómetro, se puede encontrar la resistividad del terreno ρ . Si se conoce la resistividad del suelo, se puede encontrar la resistencia de dispersión R .

$$\rho = \frac{2\pi P}{\phi(\rho_v)} \quad (4.5)$$

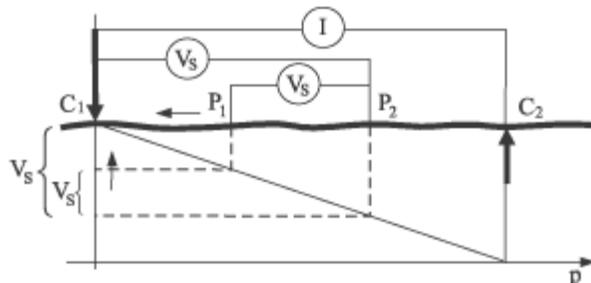
$$R = \frac{\rho}{2\pi} F(r_n) \quad (4.6)$$

4.1.1.2. Aplicación del principio de medidas

El conocer la corriente I , es suficiente para determinar la diferencia de potencial V_s entre dos puntos intermedios P_1 y P_2 cuyas distancias respecto de C_1 y C_2 sean conocidas.

- Una fuente, inyecta en C_1 una corriente I al suelo
- Los puntos de contacto entre el suelo y los circuitos de medida de corriente y potencial, se logran clavando electrodos de medida
- La diferencia de potencial V_s , se obtiene midiendo entre dos puntos del suelo

Fig. 45. Esquema de medidas de corriente y potencial para encontrar resistividad y resistencia de puesta a tierra



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

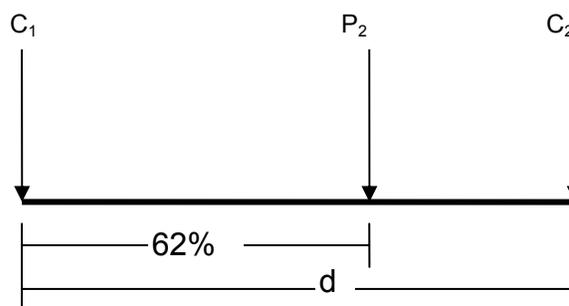
Las resistencias de cada uno de los electrodos auxiliares no presentan requisitos tan estrictos como en otros métodos, si bien se recomienda que el electrodo de corriente tenga una resistencia lo suficientemente baja como para permitir un adecuado paso de la corriente.

4.1.1.3. Medición de resistencia de un electrodo por método de caída de potencial

La mayoría de los instrumentos empleados en la medición de resistencia a tierra, se basan en el método de caída de potencial. Y si es aplicado correctamente da los resultados más confiables.

El método de la caída de potencial o del 62%, consiste en inyectar una corriente de medición I que pasa por el terreno a través del electrodo de puesta a tierra que se desea medir (C_1) y por un electrodo auxiliar de corriente, ubicado en un punto suficientemente alejado (C_2) para que tenga un potencial de cero V . En estas condiciones se clava un segundo electrodo auxiliar de tensión (P), ubicado entre el electrodo bajo ensayo y el electrodo auxiliar de corriente, midiéndose la caída de tensión V que aparece entre la toma de tierra a medir y el electrodo auxiliar de tensión.

Fig. 46. Medición de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo por el método de caída de potencial



Para medir la tensión se puede utilizar un potenciómetro o un voltímetro de alta impedancia interna, mientras que para medir la corriente se utiliza un amperímetro conectado directamente o a través de un TI tipo pinza, que facilita el trabajo al controlar instalaciones existentes. También se puede utilizar un telurómetro, el cual opera inyectando una corriente con frecuencia de 500 Hz por el electrodo C_2 y registrando la caída de tensión en el electrodo P. Internamente, en virtud de la Ley de Ohm, se halla la resistencia alrededor del electrodo del SPT (C_1).

$$R = \frac{V_s}{I} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad \frac{r}{d} < \frac{1}{20} \quad (4.7)$$

donde:

R = Resistencia a tierra

V = Voltaje leído entre el electrodo C_1 y el P

I = Corriente de prueba inyectada por el instrumento

r = Radio hemisférico equivalente del SPT

d = Distancia entre C_1 y C_2

ρ = Resistividad del terreno

Como se puede ver, este método limita la distancia mínima (d), entre C_1 y C_2 , en función al largo del electrodo del SPT o al radio hemisférico equivalente (r) cuando se trate de una malla.

En teoría, la influencia del electrodo del SPT se extiende hasta el infinito; sin embargo, se debe considerar que tal influencia varía inversamente con la distancia siguiendo una ley exponencial, pues la sección ofrecida a las trayectorias de corriente aumenta al alejarse del electrodo. En la práctica la influencia del electrodo del SPT se concentra en sus alrededores y se torna despreciable a distancias mayores a los 50 m. en el caso de tomas de áreas reducidas o de simples electrodos.

En una toma de tierra de área extensa el método requiere que por lo menos exista un espaciamiento entre C_1 y C_2 de 15 m, aunque en la práctica el espacio entre C_1 y C_2 es lo más grande posible. Además, el electrodo de potencial se debe ir alejando de la toma bajo ensayo en forma escalonada, registrando el valor medido en cada escalón. Al graficar los valores obtenidos en función de la distancia entre la toma y el electrodo de tensión se obtiene una curva que tiende a nivelarse en un determinado valor, que representa el valor más probable de la resistencia (impedancia) de la toma de tierra.

La gráfica mostrara un incremento gradual de resistencia a tierra mientras P está en la zona cercana a C_1 . Cuando P sale de esa zona pero no ha entrado en la zona de C_2 , la gráfica mostrará una meseta en los valores. Este aplanamiento obtenido se ha demostrado teóricamente que se logra cuando P está localizado al 62% de la distancia entre C_1 y C_2 . Esta es la razón por la que también se le llama a este método el "de 62%". Pruebas realizadas demuestran que la variación de las lecturas obtenidas al 50% y al 70% de la distancia es menor al 5%, que es la precisión de la mayoría de los instrumentos más comunes. De ahí que las lecturas que se toman al 60% puedan dar una medida promedio aceptable de la resistencia a tierra del electrodo incluyendo la resistencia del conductor de conexión al electrodo bajo prueba.

Este método depende en gran medida de enterrar los electrodos en una zona alejada de objetos conductores. Si la curva en la gráfica, no presenta un tramo paralelo, quiere decir que la distancia escogida no es suficiente. La solución puede ser una mayor distancia entre electrodos, pero, en algunos casos, la localización de los electrodos en línea recta es imposible por la falta de espacio u otros factores. Sin embargo, si se coloca el electrodo de prueba P en ángulos hasta de 90 grados da lecturas consistentes con las que se obtendrían en línea recta, aunque en la gráfica los valores de resistencia después de distancias mayores al 70% no suben con igual rapidez, debido a la lejanía del electrodo C₂.

Cuando se aplica este método se debe tomar en cuenta que pueden existir tensiones espurias provocadas por corrientes vagabundas en el terreno, capaces de alterar la medida. Por ello, al interrumpir la corriente se debe verificar que la lectura del voltímetro sea nula o despreciable. Si no lo es, el método no es aplicable.

Para medir la resistencia de puesta a tierra por el método de la caída de potencial, el equipo se debe operar de la siguiente manera:

1. Se deben cortocircuitar los bornes C₁ y P₁ con la ayuda de la barra que se provee para este fin.
2. Verificar que los bornes C₂ y P₂ no estén en cortocircuito.

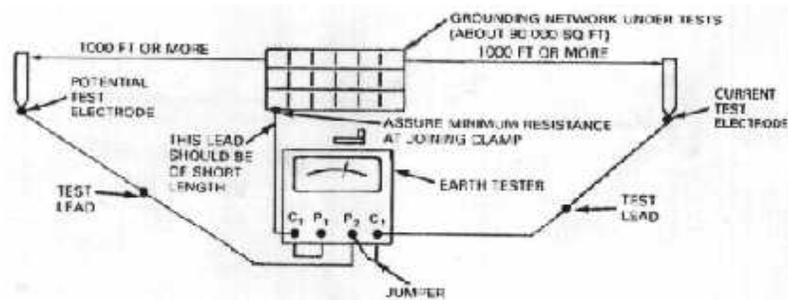
3. Clavar (completamente si es posible) el electrodo auxiliar de corriente C_2 a una distancia "d" con relación a la toma de tierra C_1 .
4. Clavar el electrodo de potencial P_1 al 62% de la distancia entre C_1 y C_2 partiendo de C_1 (los piquetes deben estar alineados).
5. En el caso de instrumentos digitales que generan corriente por medio de baterías: pulsar el botón de medida durante 6 segundos aproximadamente hasta que se establezca la medida correcta. Para instrumentos con manivela: hacerla girar a velocidad constante hasta que se estabilizó la medida correcta.
6. Verificar el buen contacto de los cables de prueba del equipo con los bornes del instrumento y con sus electrodos respectivos.
7. Cuando el instrumento cuente con indicadores luminosos, hay que asegurarse de que estos estén correctamente encendidos.
8. Finalmente, si se desea elaborar una gráfica de los valores de resistencia entre los electrodos de corriente, clavar el electrodo de potencial P_2 en otra posición a lo largo de la recta entre C_1 y C_2 y repetir los pasos del 4 al 6 para obtener una nueva lectura.

4.1.1.4. Medición de la resistencia de mallas de tierra

El método de la caída de potencial es adecuado para casi todos los tipos de mediciones de resistencia de puesta a tierra. En el caso de una malla, puede aparecer una componente reactiva apreciable cuando la resistencia es menor que $0,5 \Omega$, por lo que el resultado obtenido con este método es el de la impedancia. Cabe señalar que para los casos en que la resistencia es menor que $0,2 \Omega$, la influencia de la componente reactiva puede volverse crítica, siendo recomendable realizar ensayos a diferentes frecuencias para separar las componentes activas y reactivas.

Para medir mallas a tierra con éste método, se deben colocar los electrodos auxiliares a mayor distancia. Una regla práctica es comenzar con una distancia del electrodo C_2 a la toma de tierra C_1 , igual a la longitud de la diagonal mayor de la malla, o su equivalente en sistemas de área no rectangular. En el caso de los grandes sistemas de electrodos o mallas a tierra esta regla requiere de cables muy largos para conectar las puntas de potencial y de corriente.

Fig. 47. Medición de la resistencia de puesta a tierra de una malla por el método de caída de potencial



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html.

4.1.2. Método directo o de los dos puntos

Este método involucra únicamente el electrodo bajo prueba y un punto de referencia, en buen contacto con la tierra y por ello, con resistencia de valor cercana a cero ζ . De ahí que el valor obtenido sea aproximadamente la resistencia del sistema pequeño más la resistencia de los cables de prueba.

El método directo es muy práctico para ensayos en los que la exactitud no es importante; sin embargo, tiene varias limitaciones, entre ellas:

- La elección del punto de referencia, puesto que en muchos casos las tuberías aparentemente metálicas en toda su extensión, tienen partes de PVC y, en otros casos, el electrodo está dentro de la zona de influencia de la referencia.
- El valor de resistencia que se obtiene de esta manera está sujeto a grandes errores cuando se usa para medir resistencias pequeñas.

Fig. 48. Medición de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo por el método de dos puntos



4.1.3. Método de la pendiente ⁽⁴⁹⁾

Este método se emplea cuando el suelo no es homogéneo.

4.1.3.1. Procedimiento

1. Se elige una varilla externa de la malla para conectar de ahí radialmente el aparato

2. A una distancia C de por lo menos 2 veces la distancia diagonal de la malla, se clava el electrodo de corriente
3. A distancias 0.2C, 0.4C, 0.6C se clava el electrodo de potencial
4. Tomar las lecturas de resistencia de cada electrodo de potencial. Respectivamente esos valores son R_1 , R_2 , R_3
5. Se calcula el valor de

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} \quad (4.8)$$

En donde μ representa el cambio de pendiente en la gráfica de resistencia a tierra contra distancia. Si μ es mayor a 1.6, la distancia C debe incrementarse.

6. Encontrar el valor de D_p/C con el valor de μ

Para $0.4 < \mu < 0.89$

$$D_p / C = 0.7098 - 0.1626\mu \quad (4.9)$$

Para $0.9 < \mu < 1.19$

$$D_p / C = 0.7436 - 0.2030\mu \quad (4.10)$$

Para $1.2 < \mu < 1.59$

$$D_p / C = 0.9159 - 0.3490\mu \quad (4.11)$$

7. Se entierra un electrodo de prueba a la distancia $(D_p/C) * C$, medida desde la malla

8. Tomar el valor de resistencia usando el electrodo de potencial de prueba. Esa es la resistencia real
9. Regresar al paso 2 y repetir como comprobación el proceso para una distancia C más grande. Si el valor obtenido del paso 7 es menor apreciablemente, la distancia C debe incrementarse aún más.

4.1.4. Método directo o de los dos puntos

El método de medición con el puente de Nippold requiere la instalación de dos tomas de tierra auxiliares, cuyas resistencias de dispersión a tierra designaremos como R_2 y R_3 , mientras que la resistencia de la toma bajo ensayo se denominará R_1 .

En estas condiciones, se miden las resistencias R_{1-2} , R_{2-3} y R_{1-3} comprendidas entre cada par de tomas, utilizando preferentemente un puente de corriente alterna. Como $R_{1-2} = R_1 + R_2$, $R_{2-3} = R_2 + R_3$ y $R_{1-3} = R_1 + R_3$; resulta:

$$R_1 = \frac{R_{1-2} + R_{1-3} - R_{2-3}}{2} \quad (4.12)$$

Las resistencias de cada uno de los electrodos auxiliares deben ser del mismo orden que la resistencia que se espera medir. Si las dos tomas

auxiliares son de mayor resistencia que la toma de tierra bajo ensayo, los errores en las mediciones individuales serán significativamente aumentados en el resultado final obtenido con la ecuación anterior. Para tal caso se recomienda colocar los electrodos a una gran distancia entre sí⁽²³⁾.

Para las tomas de tierra de áreas extensas, las que presumiblemente tienen bajos valores de resistencia, se recomienda que las distancias entre electrodos sean del orden de la mayor diagonal del área a medir.

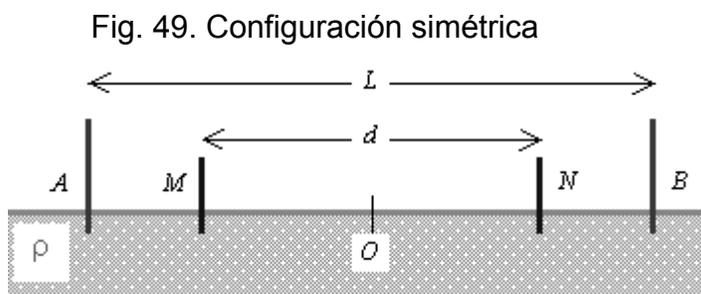
Este método resulta dificultoso para instalaciones de puesta a tierra de grandes subestaciones y centrales generadoras, donde resulta preferible el método de la caída de tensión.

4.2. Medición de resistividad del terreno

De acuerdo con el principio de caída de potencial, todo esquema de medidas desde la superficie del suelo, implica la inyección de una corriente (I), que penetrando a cierta profundidad, circulará entre dos puntos del suelo de Resistividad (ρ), creando un espectro de superficies equipotenciales en la que es posible establecer una diferencia de potencial (V_s) entre otros puntos diferentes, cuya ubicación es determinante para la medida de la resistividad del suelo estratificado.

La mayoría de técnicas de medida de la resistividad del terreno son variaciones de la configuración simétrica. Dichas variaciones han sido introducidas para eliminar o reducir ciertas dificultades propias de cada método; particularmente cuando se tienen grandes distancias entre electrodos.

En la configuración simétrica, cuatro electrodos están ubicados a lo largo de una línea recta, simétricamente de un punto O . Los electrodos de corriente A y B , se encuentran en los extremos y los de potencial M y N en el interior, como se muestra en la figura 49.



Fuente: www.paas.unal.edu.co/investigaciones/tierras/mediciones.htm

Los arreglos geométricos de medición más comunes son Wenner, Wenner- Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Polo Dipolo.

4.2.1. Medida de la resistividad eléctrica

La figura 49 muestra el principio de medida de la resistividad del suelo: se inyecta una corriente I entre el par de electrodos AB y se mide la tensión

ΔV entre el par de electrodos MN. Si el medio es homogéneo de resistividad ρ , la diferencia de tensión es:

$$\Delta V = \frac{I}{2} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right] \quad (4.13)$$

donde AM, AN, BM, BN son las distancias entre electrodos. La resistividad viene dada por la expresión.

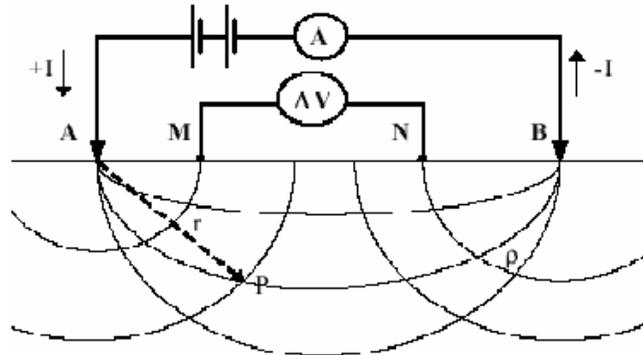
$$\rho = g * \frac{\Delta V}{I} \quad (4.14)$$

donde:

$$g = 2 * \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (4.15)$$

es un factor geométrico que depende exclusivamente de la disposición de los electrodos ⁽³²⁻¹⁵⁾.

Fig. 50. Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad del suelo.



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm.

Dos dispositivos con cuatro electrodos lineales en los que intercambiamos los electrodos de inyección y detección presentan unos coeficientes de dispositivo

$$g_1 = 2^* \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (4.16)$$

$$g_2 = 2^* \left[\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right]^{-1} \quad (4.17)$$

Dado que las distancias cumplen $AM = MA$, $AN = NA$, etc., se obtiene que $g_1 = g_2$. Luego si el medio es homogéneo, para una misma corriente de inyección las diferencias de potencial leídas ΔV_1 y ΔV_2 serán iguales. Por tanto, la resistividad medida ρ será independiente de la posición de los electrodos de inyección y detección cuando estos se intercambian. Esta propiedad se conoce con el nombre de *principio de reciprocidad*, que se cumple también para medios heterogéneos ⁽³²⁻¹⁷⁾.

No obstante, en la práctica no es conveniente colocar los electrodos M y N tan separados como suelen estar los A y B, pues al ser grande la distancia entre los primeros, la medida se vería afectada por las corrientes telúricas, parásitos industriales, etc., cuyo efecto aumenta proporcionalmente con la distancia entre M y N. Los cálculos anteriores se basan en la consideración de que el suelo es homogéneo e isótropo.

Cuando el medio no es homogéneo, se obtiene la *resistividad aparente*, ρ_a , y su valor depende, además del factor geométrico g , y de las resistividades de los diferentes materiales. A partir de la interpretación de las resistividades aparentes medidas en un terreno se podrán extraer conclusiones.

4.2.1.1. Condiciones para la medición de la resistividad del suelo

Cuando el área está próxima a instalaciones eléctricas subterráneas o aéreas, especialmente de alta tensión, se optará por un alejamiento de 50 m; complementariamente se aplicarán las siguientes condiciones:

4.2.1.2. Para la seguridad del operador que mide cerca de instalaciones eléctricas energizadas

- Los operadores de medidas deben utilizar guantes y zapatos aislantes
- No medir bajo lluvia, neblina densa o hr > 80% cerca de líneas eléctricas o subestaciones
- No medir cuando hay tormentas y rayos aguas arriba o aguas abajo de la líneas eléctricas

4.2.1.3. Para asegurar la representatividad de las medidas de campo

- Considerar la estación climática del sitio
- Verano (costa), estiaje (sierra, selva); aplicar valor directamente el resultado
- Invierno (costa), lluvias (sierra, selva); aplicar el resultado corregido
- Evitar medir en suelos recién humedecidos por riego o lluvia, o en suelos removidos
- Anticipadamente verificar el instrumento y los accesorios de medida

- Calibración con resistencia patrón
- Prueba de aislamiento de los conductores
- Prueba de conducción de los terminales
- Prueba de ajuste de los conectores

Para asegurar la precisión de las medidas

- Evitar la superposición de los circuitos de medida (I) y (Vs)
- Asegurar buen contacto entre los electrodos clavados y el suelo
- Evitar paralelismo con líneas eléctricas aéreas y subterráneas
- Evitar proximidad con objetos conductores de superficie y subterráneos
- Evitar la influencia directa de los circuitos de alta tensión
- Medir en horas de ausencia o mínimas corrientes erráticas o geomagnéticas
- Levantar los puentes de unión de los bornes C_1/P_1 y C_2/P_2
- Colocar los cuatro electrodos en línea, vigilando que la distancia de separación entre ellos sea la correcta
- Clavar los electrodos una distancia $b = (1/20)*a$

- Pulsar el botón de medida según la recomendación anterior
- La resistividad la dará la fórmula $\rho = 2\pi Ra$

Donde:

ρ = resistividad del terreno

R = dato de medida que da el equipo

a = separación de electrodos

4.2.2. Tipos de prospecciones geoelectricas

Antes de describir los diferentes métodos para la medición de la resistividad es necesario definir qué es una prospección geoelectrica, para qué sirve y las clases de prospecciones que pueden ser utilizadas.

La finalidad de una prospección geoelectrica es conocer la forma, composición y dimensiones de estructuras o cuerpos inmersos en el subsuelo a partir de medidas en la superficie. Las prospecciones geoelectricas que se realizan se dividen generalmente en dos tipos:

- Sondeo eléctrico vertical (S.E.V).
- Calicatas eléctricas (C.E).

4.2.2.1. Sondeo eléctrico vertical

La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV) es averiguar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Se utiliza sobre todo para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelo estratificado.

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores AB. Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye. Para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad $AB/2$ y el 70.6% por encima de una profundidad $AB^{(32-20)}$. Sin embargo, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el SEV, ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, sin anularse nunca. Podría pensarse que la profundidad de penetración es proporcional a AB pero esto sólo es válido para un subsuelo homogéneo. El efecto de una capa en los potenciales o campos observados en superficie no depende únicamente de la densidad de corriente que la atraviesa.

Apparao⁽²⁻⁷⁴⁹⁾ indica que la profundidad de investigación viene determinada por la posición de los electrodos inyectores y detectores, y no sólo por la penetración o distribución de la corriente. Definiendo L como la distancia entre los dos electrodos extremos (sin considerar los situados en el infinito), los mismos autores determinan la profundidad de investigación de

diversos dispositivos en un suelo homogéneo, siendo para el dispositivo polo-polo de 0.35L, para Schlumberger de 0.125L y para Wenner de 0.11L.

Un valor más útil puede ser la profundidad a la cual la mitad de la señal medida en la superficie es debida a la porción de suelo superior a esa profundidad y la otra mitad de la señal a la porción de suelo inferior.

Las profundidades de investigación efectiva para los dispositivos Wenner, Schlumberger y doble dipolo son respectivamente de 0,17L, 0,19L y 0,25L (para este último la profundidad de investigación característica es de 0,195L); es decir, ligeramente mayores que utilizando la definición.

Experimentalmente, a partir de los dispositivos que se verán más adelante, el SEV consiste en aumentar progresivamente la distancia entre los electrodos manteniendo un punto central fijo (punto de sondeo P).

El SEV es adecuado para trabajar a poca profundidad sobre topografías suaves como complemento de las calicatas eléctricas, con el objetivo de decidir la profundidad a la cual realizar el perfil de resistividades.

4.2.2.2. Calicatas eléctricas

La finalidad de las calicatas eléctricas (CE) es obtener un perfil de las variaciones laterales de resistividad del subsuelo fijada una profundidad de investigación. La zona explorada en el calicateo eléctrico se extiende desde la superficie hasta una profundidad más o menos constante, que depende de la separación entre electrodos y de la distribución de resistividades bajo ellos⁽³²⁻²³⁾.

Experimentalmente, la CE consiste en trasladar los cuatro electrodos del dispositivo a lo largo de un recorrido, manteniendo su separación, obteniéndose un perfil de resistividades aparentes a lo largo del recorrido.

En general, no puede afirmarse que tal o cual tipo de calicata eléctrica sea superior a los demás. Para cada problema concreto, cada uno de estos tipos presenta ventajas e inconvenientes.

En una curva de resistividad aparente se produce una discontinuidad cada vez que un electrodo pasa sobre un cambio lateral de resistividad, por lo que resulta que cuanto mayor sea el número de electrodos movidos más ancha y complicada se hace la anomalía en la curva de resistividad aparente, lo cual hace más difícil la interpretación. Por esta razón, es recomendable la calicata Schlumberger con los electrodos A y B fijos o la dipolar con los dipolos bien separados (equivalente a mover solo dos electrodos).

La diferencia de potencial V_{MN} representa la integral del gradiente de potencial entre los electrodos M y N. Por tanto, cuanto más separados estén los electrodos M y N tanto más suavizada será la curva de la resistividad aparente, lo que provocará que objetos pequeños y cercanos se confundan en uno solo. Cuanto más pequeña sea la distancia MN se tiene mayor

resolución y amplitud de cambio de resistividad aparente debido a un objeto, por lo cual, la calicata Schlumberger tiene mayor resolución que la Wenner.

La realización de calicatas en trayectorias paralelas permite trazar la cartografía de resistividades aparentes de un terreno a profundidad constante representada por curvas de isorresistividad.

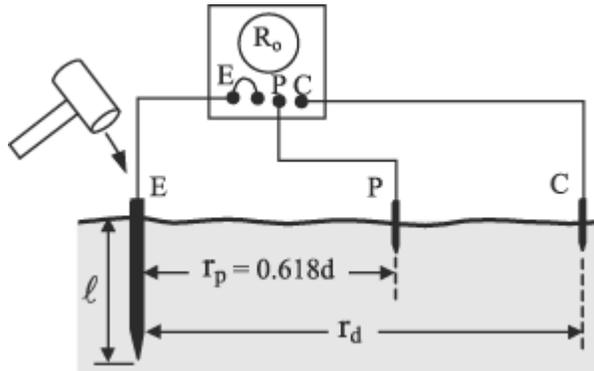
4.2.3. Método directo o simplificado

Este método se basa en la utilización del método de caída de potencial, descrito anteriormente, para encontrar la resistencia de puesta a tierra de un electrodo. Como se recordará, al conocer I , V_s o R , se puede encontrar la resistividad del terreno ρ .

$$R = \frac{V_s}{I} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (4.18)$$

$$\rho = 2\pi r R \quad (4.19)$$

Fig. 51. Disposición de los circuitos de medida método simplificado con electrodo piloto



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

Se debe tener mucho cuidado en que el electrodo de medida C_2 del circuito de corriente, tenga la mínima resistencia de contacto con el suelo, si es posible mediante un tratamiento local; el electrodo del circuito de potencial P, puede ser clavado a 0.2m de profundidad humedeciendo el agujero guía en suelo seco.

Las mediciones de resistividad siempre deben hacer en suelo natural, sin cobertura de hierba fresca o humedad de riego reciente, ni instalaciones subterráneas próximas; los electrodos de prueba del equipo pueden tener direcciones diferentes, formando un ángulo cualquiera menor de 90° .

En este método solamente se necesita una medición para encontrarla resistividad ρ , pero si se desea una mayor consistencia se puede hacer una segunda medida ρ_2 intercambiando la dirección y las distancias; los resultados así obtenidos serán definitivos si su diferencia es menor al 10%, la resistividad equivalente ρ_{eq} se halla haciendo el promedio.

$$\rho_{eq} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \quad (4.20)$$

donde:

$$\rho_1 = 2\pi rR \quad (4.21)$$

$$\rho_2 = 2\pi rR \quad (4.22)$$

Si la diferencia supera el 10%, se escogerán otras direcciones diferentes y se repetirán las mediciones.

Este método tiene la ventaja de ser sencillo y directo, por no existir procesamiento, pero tiene limitaciones prácticas en suelos estratificados, dado que para longitudes diferentes del electrodo, se obtienen resistividades diferentes; asimismo en estratos gruesos de alta resistividad, se generan valores con grandes errores; su mejor aplicación se obtiene en suelos arcillosos de baja resistividad (suelos cultivables).

Se debe tener especial cuidado en lograr la mínima resistencia de contacto para los electrodos de medida, especialmente el del circuito de corriente C_2 .

4.2.4. Método Wenner o de los cuatro electrodos.

En 1915, el Dr. Frank Wenner del *U.S. Bureau of Standards* desarrolló la teoría de este método de prueba, el cual resulta ser el mejor para medir la resistividad promedio de volúmenes extensos de suelos naturales.

El doctor encontró que, si la distancia enterrada B es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos A, se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$\rho = 2\pi aR \quad (4.23)$$

donde:

ρ : Resistividad promedio a la profundidad (A) en $\Omega \cdot m$

a : Distancia entre electrodos en metros

b : Profundidad de enterramiento del electrodo en metros

R : Lectura del telurómetro en Ω

NOTA: Se recomienda usar una relación de $A > 20B$ ó la ecuación completa⁽⁴⁹⁾:

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad (4.24)$$

La profundidad de la medición de resistividad en un terreno es de por lo menos 3 metros^(30: 250-81a). Además conviene tomar en cuenta lo siguiente:

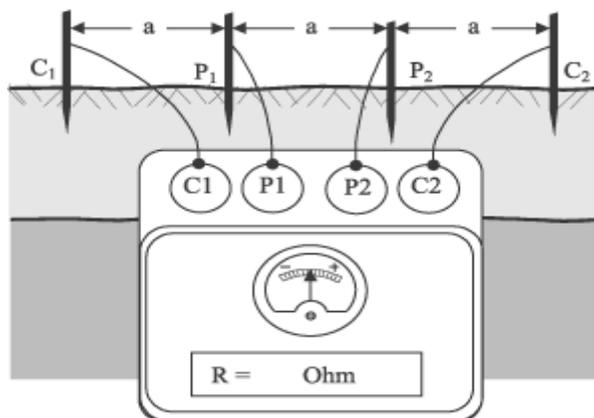
- Para el diseño de SPT de ca, el método de Wenner es el que permite obtener una mejor consistencia de los valores medidos y un procesamiento más sencillo de los mismos.
- Será necesario llevar a cabo por lo menos una «Serie» de Medidas (simple o fina), con varios puntos sobre una trayectoria rectilínea que pasa por el área en el que se hace la exploración.
- Cada distancia de medidas A , conduce a un valor aparente de la resistividad aparente ρ_a obtenida, que no es representativa ni define al suelo ni a ninguno de sus estratos.
- Se requiere cumplir con el procesamiento por comparación con una característica patrón de la serie de medidas exploratorias de campo, este es representado gráficamente, por una curva de puntos con abscisa A y ordenada ρ_a , que se grafica en escala log-log.

- El resultado del procesamiento ya sea analítico (numérico) o gráfico permite obtener el perfil estratificado del suelo en por lo menos un modelo de dos estratos, con resistividades, ρ_1 superficial, ρ_2 subyacente y h_1 espesor de ρ_1 .

4.2.4.1. Procedimiento de medición

En el método de Wenner se clavan en el suelo 4 electrodos pequeños, dispuestos en línea recta, con la misma distancia A entre ellos y a una profundidad B que no supere $1/10$ de A (preferentemente $1/20$ de A), así, cada electrodo podrá parecer un punto con respecto a las distancias involucradas en la medida con la finalidad de no introducir mayores errores. Entonces, se inyecta una corriente de medición I que pasa por el terreno a través de los dos electrodos extremos y simultáneamente se mide la caída de tensión V entre los dos electrodos interiores, utilizando un potenciómetro, un voltímetro de alta impedancia interna o un telurómetro.

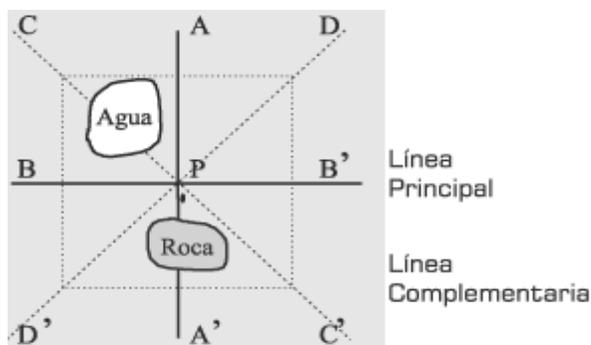
Fig. 52. Medidas Wenner de la resistividad aparente del suelo con un telurómetro



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

- Por caja eje se hacen pasar dos líneas de medida ortogonales (AA', BB'); según la importancia del SPT se adopta la respectiva serie de distancias de medida aplicable.
- Se ejecutan las series de medidas en ambas líneas y los puntos se grafican en papel Log-Log. Las curvas obtenidas deberán ser casi coincidentes o muy próximas.

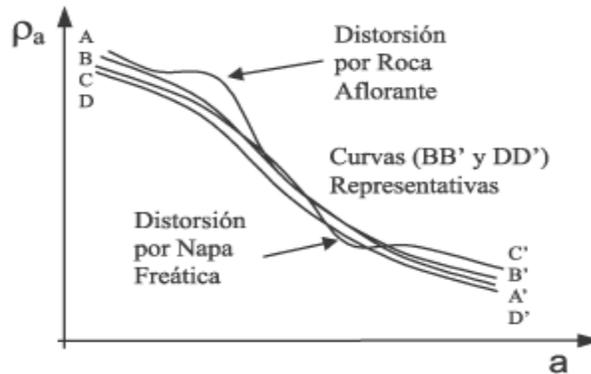
Fig. 53. Líneas de medida de resistividad aparente (AA', BB') principal, (CC', DD') complementarios



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

- En caso de diferencias parciales o en tramos, se ejecutarán y graficarán nuevas medidas. Las líneas respectivas (CC', DD'), estarán a 45° de las dos primeras junto a las cuales se grafican.
- Las curvas más próximas serán consideradas representativas (figura 4.11) y se promediarán punto por punto de medida, según la distancia A de la serie Wenner.

Fig. 54. Curvas de puntos correspondientes a cuatro líneas de medida Wenner



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

- Los puntos promedio de la curva así obtenida son los que se destinan al procesamiento para la determinación de las resistividades de diseño.

Los resultados obtenidos son representativos para una profundidad media A . El número de puntos de medida (serie de puntos) a ser realizados sobre una directriz (tabla 10), para una profundidad promedio de 8 m será mínimo 4 que corresponden a la serie simple, y dependiendo de la resolución que se desee lograr para la curva, se podrán agregar otros puntos intermedios y extremos series (fina 1, fina 2); el procesamiento se hace como mínimo para suelo de dos estratos con los siguientes parámetros.

- La Resistividad Superficial (ρ_1)
- La Resistividad Subyacente (ρ_2)

- El Espesor del Estrato $\rho_1(h_1)$

Tabla X. Series de distancias de medida WENNER para una profundidad media de 8 m

Series	Distancia (a) de Medida WENNER						
Simple	-	1.0	2.0	-	4.0	8.0	-
Fina 1	0.75	1.5	3.0	4.0	6.0	8.0	12.0
Fina 2	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	12.0

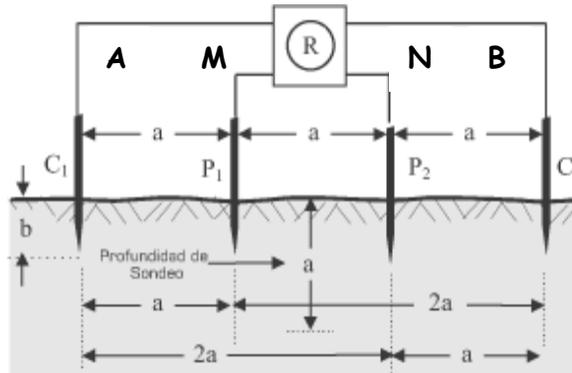
Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

En los emplazamientos donde el terreno presenta diferentes valores de resistividad en función de la profundidad, la experiencia indica que el valor más adecuado para el diseño del dispensor a tierra es el que se obtiene a una profundidad mayor.

4.2.4.2. Dispositivo Wenner

Los electrodos se disponen equidistantes sobre una línea en el orden AMNB.

Fig. 55. Disposición de los circuitos de medida dispositivo Wenner.



Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

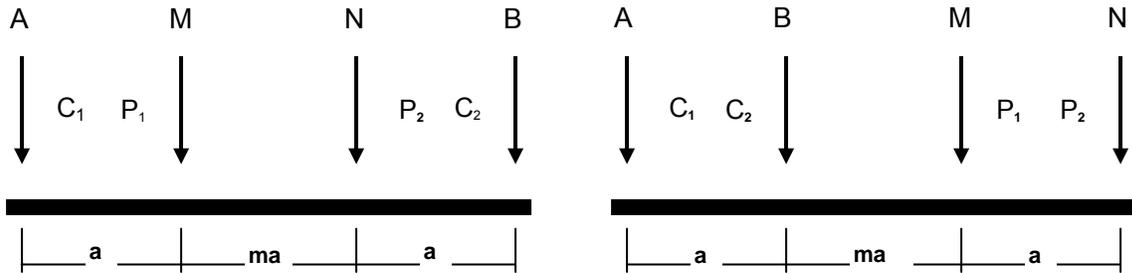
El factor geométrico del dispositivo se deduce de:

$$g = 2 * A \quad (4.25)$$

4.2.4.3. Dispositivos Wenner a, b

La figura 56 muestra la disposición de electrodos en los dispositivos *Wenner a* y *b*, donde m es un número real positivo. Un caso particular del dispositivo *A-Wenner* son los dispositivos *Wenner* ($m = 1$) y *Schlumberger* ($m \ll 1$). El dispositivo doble dipolo es un caso particular del *B-Wenner* cuando $m \gg 1$.

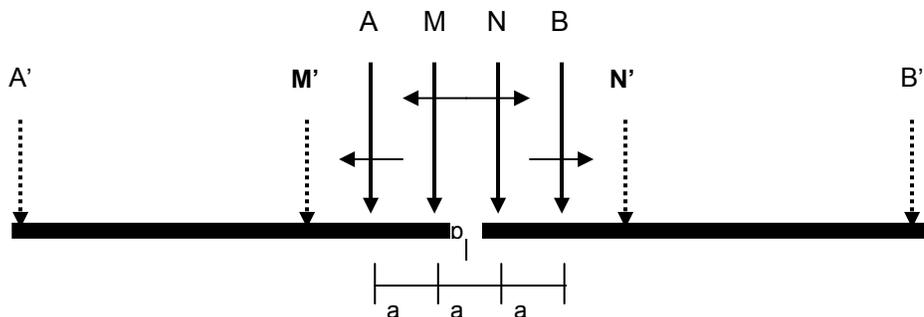
Fig. 56. Dispositivos a a-Wenner (izquierda) y b b-Wenner (derecha)

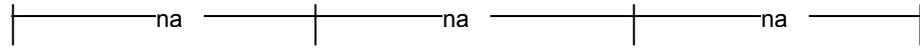


4.2.4.4. Sondeo Wenner

Dado el dispositivo Wenner AMNB con separación interelectródica A , el sondeo consiste en el aumento progresivo del valor de A manteniendo un punto central fijo P . Para la representación de los datos se muestra en ordenadas el valor de la resistividad aparente medida, ρ_a , en $\Omega \cdot m$, y en abscisas el valor de A en metros para cada paso.

Fig. 57. Sondeo Wenner. La distancia interelectródica pasa de a (AMNB) a na (A'M'N'B')

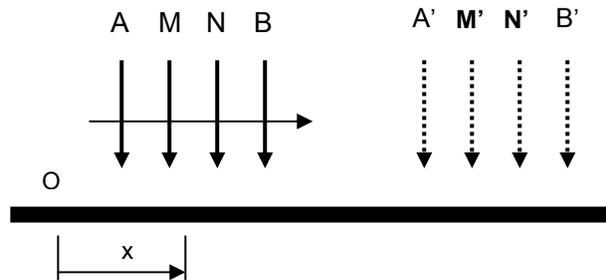




4.2.4.5. Calicata Wenner

Partiendo de sus respectivos dispositivos base, esta calicata consiste en desplazar los cuatro electrodos AMNB a la vez manteniendo sus separaciones interelectrónicas a lo largo de un recorrido. Se representa la distancia del origen, O, al centro de los electrodos MN en abscisas y en ordenadas el valor de $\rho_a(\zeta^*m)$ para cada distancia x .

Fig. 58. Calicata Wenner. Los cuatro electrodos se desplazan a la vez manteniendo sus separaciones



4.2.4.6. Ventajas y limitaciones del método

El método Wenner está normalizado (ASTM: G-57), y tiene la ventaja de ser sencillo y más preciso para fines de uso eléctrico que otros métodos basados en el mismo principio. Debido al poco acceso a instrumentos de alta sensibilidad, este método es ideal para despliegues cortos (pequeña

profundidad) tales como los que se necesitan para puestas a tierra y las variaciones laterales en este caso no le afectan; se aplica a todo tipo de suelos.

Cuando la distancia de medidas es corta $A < 1\text{m}$, puede conllevar desviaciones dependientes de la delgada cobertura superior del suelo que a veces suele ser diferente que el estrato superficial ρ_1 ; por ello, cuando se hace una serie de medidas simple de 4 puntos, no se debe incluir distancias $A < 1\text{m}$, y cuando la serie los incluye (series Fina 1 y Fina 2), aquellos que resulten absurdos deberán ser desestimados.

Este método tiene el inconveniente, sobre el Schlumberger, que todos los electrodos han de modificarse en cada medida. El dispositivo Wenner y el Polo-Polo (2-Array), son los que tienen menos requerimiento de energía para una determinada dimensión del campo eléctrico; por tanto, en condiciones de contacto galvánico difícil es preferible a los otros (Polo-Dipolo, Dipolo-Dipolo, Gradiente, Schlumberger, etc.).

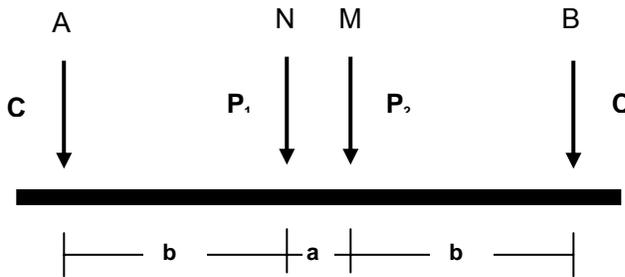
4.2.5. Método de Schlumberger

4.2.5.1. Dispositivo Schlumberger

Se trata de una composición simétrica de los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos detectores MN es

mucho menor que la de los inyectores AB (Figura 4.16). En la práctica, $AB > 5MN$

Fig. 59. Dispositivo Schlumberger



El coeficiente del dispositivo en este caso es:

$$g = \frac{b \cdot (b + a)}{a} \quad (4.26)$$

Si definimos $L = b + a/2$, el factor geométrico se puede expresar como:

$$g = \left(\frac{L^2}{a} - \frac{a}{4} \right) \quad (4.27)$$

Si la distancia a que separa los electrodos M y N tiende a cero el factor geométrico queda:

$$g = \left(\frac{L^2}{a} \right) \quad (4.28)$$

que tiende a infinito. Sin embargo, la resistividad aparente es finita ya que ΔV en (59) decrece al mismo tiempo que a . Tendremos pues:

$$\rho_a = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{L^2 \Delta V}{aI} = \frac{L^2}{I} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{a} = \frac{L^2 E}{I} \quad (4.29)$$

donde E es el campo eléctrico.

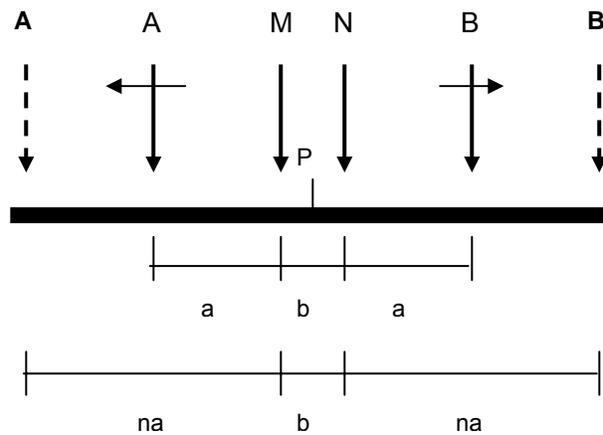
La idea del dispositivo Schlumberger consiste, pues, en utilizar una distancia $MN = a$ muy corta, de tal modo que pueda tomarse como válida la ecuación anterior. Los desarrollos teóricos se establecen suponiendo que lo que se mide realmente es el campo E , el cual en la práctica se toma igual a $\Delta V/a$. Trabajar con el campo eléctrico tiene ventajas teóricas al trabajar con expresiones analíticas; sin embargo, tiene el inconveniente que la tensión diferencial medida disminuye linealmente con la separación a y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia L .

Además, la precisión de las mediciones geoelectricas de campo está muy limitada por heterogeneidades irrelevantes del terreno (ruido geológico). En ciertos casos, el electrodo B se lleva a gran distancia de los demás de modo que no influya sobre el valor de ΔV observado. Se tiene entonces el dispositivo denominado *Schlumberger asimétrico*, o *semi-Schlumberger*.

4.2.5.2. Sondeo Schlumberger

Dado el dispositivo Schlumberger AMNB con $AB \gg MN$, el sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos inyectoros A y B dejando los electrodos detectores M y N fijos en torno a un punto central fijo P (Figura 61). La representación de este sondeo muestra en ordenadas ρ_a ($\Omega \cdot m$) y en abscisas la distancia $AB/2$ (m). En este sondeo el efecto de las heterogeneidades irrelevantes es menor pues sólo se mueven el par de electrodos inyectoros A y B.

Fig. 60. Sondeo Schlumberger. Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras M y N están fijos

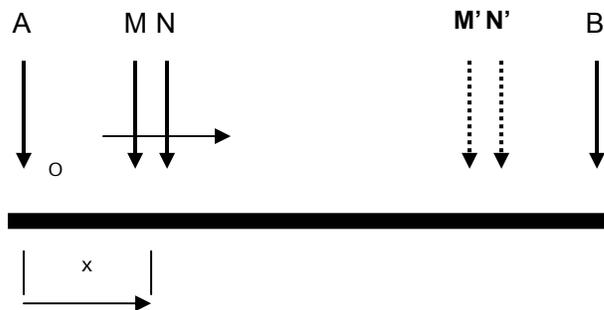


4.2.5.3. Calicata Schlumberger

En este tipo de calicata podemos citar dos variantes: la primera, sería similar a la calicata Wenner, desplazando lateralmente los cuatros electrodos del dispositivo Schlumberger a la vez. La segunda consiste en desplazar los electrodos detectores M y N entre A y B, los cuales están fijos y a una gran distancia de los electrodos detectores (Figura 61). La profundidad de

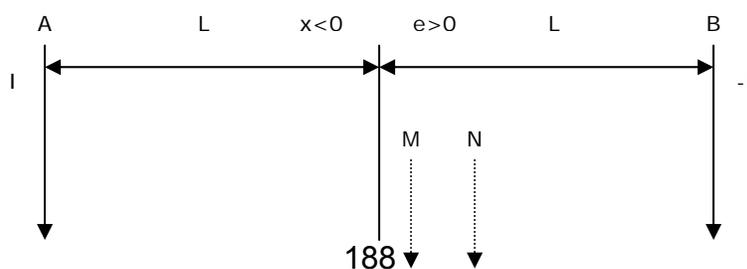
penetración de la medida no es constante puesto que no es una verdadera calicata, siendo máxima cuando los electrodos MN se hallan en el centro del segmento AB.

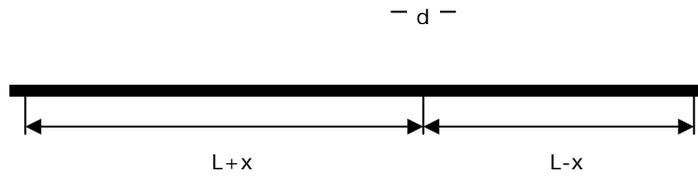
Fig. 61. Calicata Schlumberger (segunda variante). Los electrodos M y N se mueven de A hasta B manteniendo su separación



La figura 62 muestra las distancias entre electrodos, donde se escoge el origen en el punto medio entre los electrodos inyector.

Fig. 62. Dispositivo de cuatro electrodos. La corriente se inyecta por los electrodos externos y la diferencia de potencial se mide entre los electrodos M y N





El factor geométrico es en este caso es:

$$g(x) = 2^* \left(\frac{1}{L + (x - \frac{d}{2})} - \frac{1}{L - (x - \frac{d}{2})} - \frac{1}{L + (x + \frac{d}{2})} + \frac{1}{L - (x + \frac{d}{2})} \right)^{-1} \quad (4.32)$$

Si la medida es de campo eléctrico, es decir si d tiende a cero, la resistividad aparente es.

$$\rho_a(x) = \frac{(L^2 - x^2)^2 E_x}{(L^2 + x^2) I} \quad (4.33)$$

Si la distancia entre los electrodos inyectores es muy grande respecto a la otras distancias, es decir, si $L \gg x, d$, la resistividad aparente es:

$$\rho_a(x) = \frac{L^2 \Delta V(x)}{I d} \quad (4.34)$$

Si en este último caso la distancia d tiende a cero (medida del campo eléctrico) tenemos que:

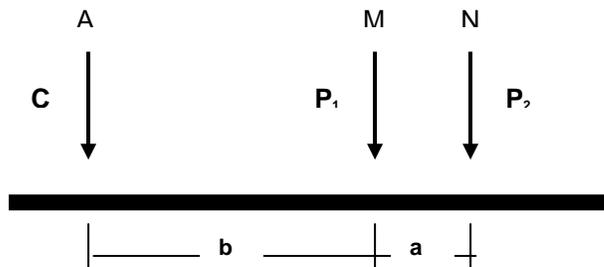
$$\rho_a(x) \cong \frac{L^2 E_x}{I} \quad (4.35)$$

4.2.6. Método polo-dipolo

4.2.6.1. Dispositivo polo-dipolo

En este dispositivo el electrodo B se lleva a una gran distancia (teóricamente en el infinito) de los otros tres (Figura 63).

Fig. 63. Dispositivo polo-dipolo



El factor geométrico del dispositivo en este caso es:

$$g = 2 * \frac{b * (b + a)}{a} \quad (4.36)$$

Cuando $a \ll b$ este dispositivo es equivalente al *semi-Schlumberger*. Una variación del dispositivo *polo-dipolo* se obtiene moviendo uno de los electrodos de potencial, por ejemplo N, a un punto distante (teóricamente al infinito). En este caso el factor geométrico es:

$$g = 2 \cdot b \quad (4.37)$$

que coincide con la expresión del dispositivo *Wenner*, por lo que también recibe el nombre de dispositivo *half-Wenner*.

4.2.6.2. Calicata polo-dipolo

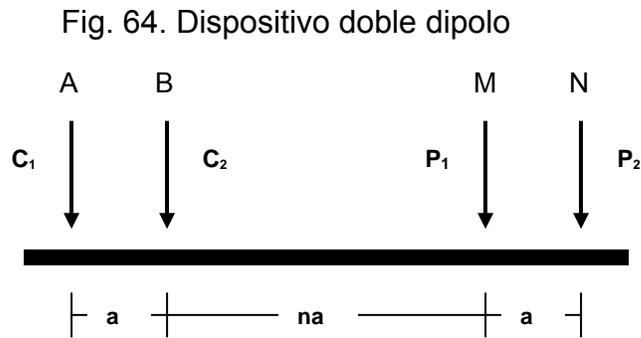
La calicata polo-dipolo consiste en desplazar los tres electrodos AMN a la vez, manteniendo sus separaciones interelectrónicas, a lo largo de un recorrido. Se representa la distancia de un origen escogido al centro de los electrodos MN en abscisas y el valor de la resistividad aparente medida ($\Omega \cdot m$) para cada distancia x en ordenadas.

En la calicata polo-polo se desplazan los electrodos AM y la resistividad aparente se representa respecto al punto medio entre A y M.

4.2.7. Método del doble dipolo

4.2.7.1. Dispositivo doble dipolo (axil)

En este dispositivo los electrodos se disponen sobre una línea en el orden ABMN formando así un doble dipolo (Figura 64). En Estados Unidos este dispositivo se denomina a veces *dispositivo dipolo-dipolo* y tiene diversas variantes⁽³²⁻⁴⁸⁾.



El factor geométrico del dispositivo en este caso es:

$$g = -n * (n + 1) * (n + 2) * a \quad (4.38)$$

Este dispositivo se implementa normalmente con $n \gg 1$ (entonces AB y MN se comportan como un dipolo de corriente y de tensión respectivamente), aunque muchos autores utilizan este dispositivo incluso con $n = 1$. El factor geométrico cuando $n \gg 1$ se puede expresar como:

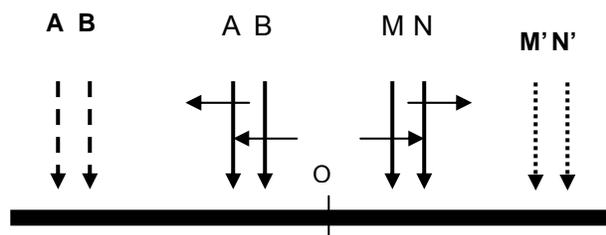
$$g = -n^3 a \quad (4.39)$$

El inconveniente es que el campo dipolar decrece con el cubo de la distancia entre los dipolos de corriente y tensión, por lo que necesita detectores más sensibles que los otros dispositivos.

4.2.7.2. Sondeo dipolar

Dado el dispositivo doble dipolo ABMN, el sondeo consiste en la separación creciente de los centros de los dipolos respecto a un punto fijo origen P (Figura 65). La representación de este sondeo muestra en ordenadas ρ_a ($\zeta \cdot m$) y en abscisas la separación de los centros de los dipolos en metros.

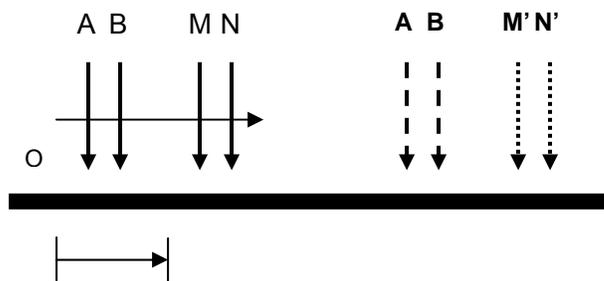
Fig. 65. Sondeo dipolar. Los dipolos se mantienen, aumentando la separación entre ellos



4.2.7.3. Calicata dipolar

Esta calicata basada en el dispositivo dipolar consiste en desplazar los cuatro electrodos ABMN a la vez, manteniendo sus separaciones interelectrónicas, a lo largo de un recorrido (figura 66). Se representa la distancia del origen, O, al punto medio entre los dos dipolos en abscisas y en ordenadas el valor de la resistividad aparente medida ($\zeta \cdot m$) para cada distancia x (m).

Fig. 66. Calicata dipolar. Se desplaza el dispositivo dipolar manteniendo las separaciones

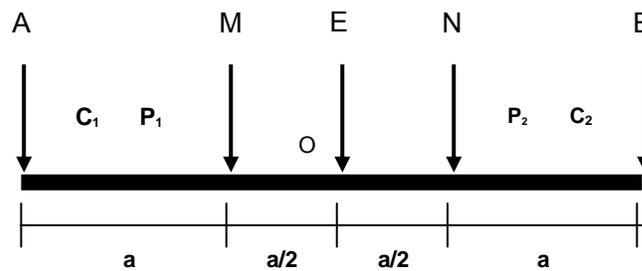


Cada tipo de calicata responde a las heterogeneidades laterales con diferente resolución e intensidad de cambio, por lo que a la hora de interpretar las curvas de resistividad aparente hay que tener en cuenta el dispositivo eléctrico utilizado.

4.2.8. Método Lee

Este método se parece al Wenner, con la diferencia de que en el Lee se sitúa un electrodo de medida E , en el punto de estación O , las lecturas se hacen entre el central y uno de los laterales (ver figura 67).

Fig. 67. Configuración de los electrodos para la medición de resistividad mediante el método de Lee



El factor geométrico es:

$$g = 6\pi a. \quad (4.40)$$

4.2.9. Otros métodos para medir resistividad del terreno

4.2.9.1. Medición de la resistividad utilizando muestras de suelo

La estimación de la resistividad del terreno a partir de la medición de la resistividad de una muestra extraída del mismo, se puede realizar empleando el método de los cuatro puntos en una caja prismática pequeña de sección transversal cuadrada, en la que se introduce el material extraído de la probeta respectiva.

Como es de esperar, el valor de resistividad que se obtiene de esta manera resulta menos exacto que el que se obtendría en el terreno real; pero en algunas ocasiones es el único camino posible.

5. PRUEBAS DE CAMPO

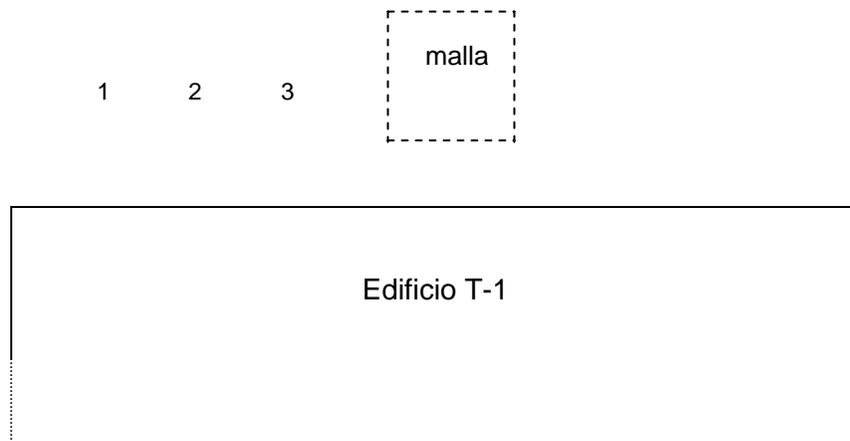
5.1. Medición de resistencia de puesta a tierra de un solo electrodo

Al ensayar los métodos de medición de resistencia de un solo electrodo se midió la resistencia de cuatro electrodos diferentes. En los cuadros que aparecen más adelante se muestran los resultados obtenidos en la aplicación de estos métodos.

Los electrodos en los cuales se midió la resistencia de puesta a tierra se encuentran en diferentes puntos del área que ocupa la Facultad de Ingeniería. Uno de estos electrodos se encuentra en el jardín ubicado entre el edificio de aulas T-3 y el edificio de laboratorios T-5. Otro de los electrodos, se encuentra en la parte de atrás del edificio de oficinas T-4.

Por último, afuera del edificio T-1, en el lado norte hay sembrados varios electrodos, tal como se muestra en la figura 68; en tres de estos electrodos se aplicaron los métodos para medir resistencia de tierra. A cada uno de estos se le identifica con los números del uno al tres.

Fig. 68. Forma en la que están colocados los electrodos afuera del edificio T-1, lado norte



5.1.1. Procedimiento utilizado en la aplicación del método del 62% o de caída de potencial

Al realizar la medición de resistencia de puesta a tierra de un electrodo, se utilizó el siguiente procedimiento:

1. Los bornes C_1 y P_1 del Megger de tierras fueron cortocircuitados mediante el puente que se provee para este fin.
2. Se verificó que los bornes P_2 y C_2 no estén en cortocircuito.

3. Se clavó el electrodo auxiliar de corriente C_2 a una distancia "d" con relación a la toma de tierra C_1 , que en el primer caso es equivalente a 25 m, y en el segundo caso, a 36.5 m.
4. El electrodo de potencial P_2 fue clavado a intervalos de 3 m partiendo desde C_1 hasta C_2 .
5. Se verificó que los lagartos de los cables de medición estuvieran en buen contacto con el electrodo y con el borne respectivo del Megger.
6. Se hizo girar la manivela del instrumento a velocidad constante hasta que se estabilizó la medida correcta.
7. Finalmente, se clavó P_2 en una nueva posición (3 m adelante del punto donde se clavó previamente) a lo largo de la recta entre C_1 y C_2 y se repitieron los pasos del 5 al 6 para tomar una nueva lectura.

El procedimiento descrito anteriormente fue utilizado para medir la resistencia del electrodo 1 en dos direcciones diferentes. Los resultados de estas mediciones son mostrados en la tabla XI.

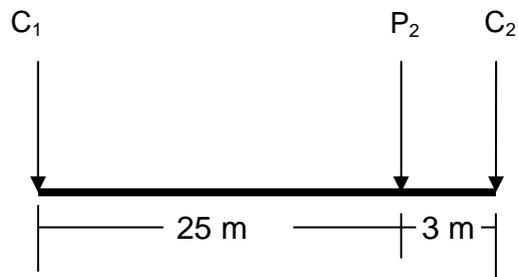
Tabla XI. Medición de la resistencia de un electrodo puesto a tierra por el método de caída de potencial

Dirección este - oeste		Dirección norte – sur	
Distancia entre C ₁ y C ₂ = 25 m		Distancia entre C ₁ y C ₂ = 36.5 m	
Distancia (m)	Lectura (Ω)	Distancia (m)	Lectura (Ω)
3	26	3	28
6	28	6	26
9	28.5	9	26
12	28	12	28
15	30	15	27
18	30	18	26
-	-	21	30
-	-	24	30
62% = 15.5	30	62% = 22.63	30

Tabla XII. Resultados de las mediciones hechas al aplicar el método de caída de potencial

Lugar donde se realizó la medición	Entre el T3 y el T5	SPT del T4	Lado norte del T1, electrodo 2	Lado norte del T1, electrodo 3
Distancia entre C₁ y C₂	15 m	27 m	24 m	19 m
Distancia al 62%	9.3 m	16.75 m	14.88 m	11.78 m
Lectura	14 Ω	20 Ω	21 Ω	23 Ω

Fig. 69. Configuración utilizada para medir resistencia por el método de caída de potencial



5.1.2. Procedimiento utilizado en la aplicación del método directo o de los dos puntos

En el método directo:

1. Se cortocircuitó los bornes C₁ y P₁, así como C₂ y P₂ del Megger
2. Se clavó el electrodo auxiliar de corriente C₂ a una distancia arbitraria d, en el primer caso d = 25 m y para el segundo caso d = 36.5 m
3. El electrodo a medir se conectó mediante un cable al borne C₁ del instrumento

4. El electrodo auxiliar de corriente se conectó al borne C_2
5. La manivela del instrumento se giró a velocidad constante hasta que el indicador del instrumento se estabilizó en la medida correcta

Tabla XIII. Medición de la resistencia de un mismo electrodo puesto a tierra por el método directo

Dirección este – oeste	Dirección norte – sur
Distancia entre C_1 y $C_2 = 25$ m	Distancia entre C_1 y $C_2 = 36.5$ m
$R = 150 \Omega$	$R = 150 \Omega$

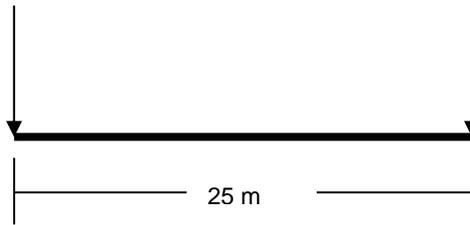
Tabla XIV. Resultados de las mediciones hechas al aplicar el método directo

Lugar donde se realizó la medición	Lectura
Entre el T5 y el T3	100 Ω
SPT del T4	85 Ω
Lado norte del T1, electrodo 1	150 Ω
Lado norte del T1, electrodo 1	150 Ω
Lado norte del T1, electrodo 2	120 Ω
Lado norte del T1, electrodo 3	110 Ω

Fig. 70. Configuración utilizada para medir resistencia de un electrodo puesto a tierra por el método directo.

C_1

C_2



5.1.3. Procedimiento utilizado en la aplicación del método de los tres puntos o puente nippold

El procedimiento para realizar las mediciones de resistencia mediante el puente Nippold fue el siguiente:

1. Se cortocircuitó los bornes C_1 y P_1 , así como también los bornes C_2 y P_2 del Megger.
2. Se clavaron dos electrodos auxiliares (a una distancia arbitraria d , lo suficientemente grande como para evitar errores por corrientes vagabundas en el suelo) los cuales se designaron como R_2 y R_3 .
3. Al electrodo a medir se le denominó R_1 y se conectó mediante un cable al borne C_1 del instrumento.
4. El electrodo auxiliar de corriente R_2 se conectó al borne C_2 .
5. La manivela del instrumento se giró a velocidad constante hasta que se estabilizó el indicador del instrumento en la lectura correcta, obteniéndose así el valor de la resistencia R_{1-2} .

6. Para obtener la resistencia R_{2-3} , se colocó los cables C_1 y C_2 en los electrodos R_2 y R_3 , operándose el instrumento como previamente se había hecho.
7. La resistencia R_{1-3} se obtuvo al colocar los cables de medición C_1 y C_2 en los electrodos R_1 y R_3 y medir.
8. Puesto que $R_{1-2} = R_1 + R_2$, $R_{2-3} = R_2 + R_3$ y $R_{1-3} = R_1 + R_3$; tenemos:

$$R_1 = \frac{R_{1-2} + R_{1-3} - R_{2-3}}{2} \quad (5.1)$$

Tabla XV. Medición de la resistencia de un electrodo puesto a tierra por el método del puente Nippold.

Dirección este - oeste		Dirección norte - sur	
R_{1-2}	150 Ω	R_{1-2}	150 Ω
R_{2-3}	140 Ω	R_{2-3}	170 Ω
R_{1-3}	40 Ω	R_{1-3}	70 Ω
R_1	25 Ω	R_1	25 Ω

Tabla XVI. Resultados de las mediciones hechas al aplicar el método del puente Nippold.

	R_{12} (Ω)	d_{12} (m)	R_{23} (Ω)	d_{23} (m)	R_{13} (Ω)	d_{13} (m)	R_1 (Ω)
Entre el T5 y el T3	150	9	225	6	100	15	12.5
SPT del T4	180	9	240	18	85	27	17.5
Lado norte	150	25	140	5	40	20	25

del T1, electrodo 1							
Lado norte del T1, electrodo 1	150	36.5	170	7	70	30	25
Lado norte del T1, electrodo 2	40	9	115	15	120	24	22.5
Lado norte del T1, electrodo 3	40	7	110	19	120	12	25

Para obtener R_1 con los datos tomados en la dirección este – oeste tenemos

$$R_1 = \frac{R_{1-2} + R_{1-3} - R_{2-3}}{2} = \frac{150 + 40 - 140}{2} = 25 \quad (5.2)$$

Para obtener R_1 con los datos tomados en la dirección norte – sur se introducen los datos obtenidos en la ecuación 4.1, lo que da:

$$R_1 = \frac{R_{1-2} + R_{1-3} - R_{2-3}}{2} = \frac{150 + 70 - 170}{2} = 25 \quad (5.3)$$

Fig. 71. Configuración utilizada para medir resistencia de un electrodo puesto a tierra por el método del puente de Nippold

C_1

C_2



Fig. 72. Forma en que se realizaron las mediciones con el método del puente Nippold para el electrodo 1

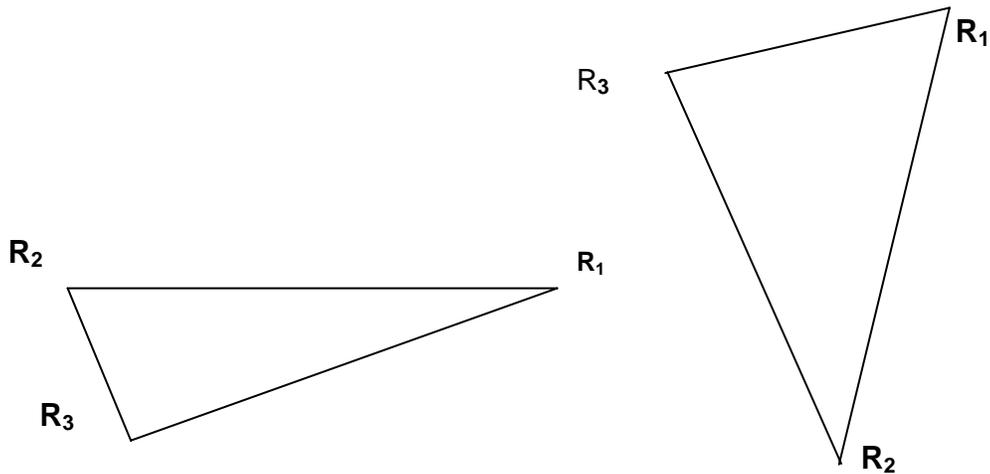


Fig. 73. Forma en que se realizaron las mediciones con el método del puente Nippold para los demás electrodos



5.2. Medición de la resistencia de puesta a tierra de una malla

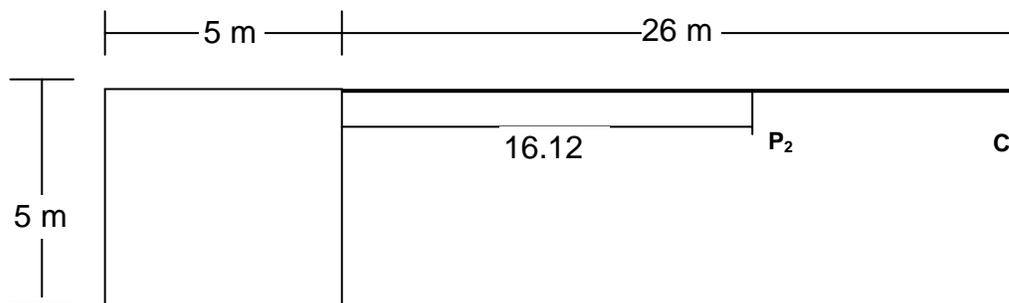
5.2.1. Procedimiento utilizado en la aplicación del método del 62% o de caída de potencial

El procedimiento para medir la resistencia de una malla por el método de caída de potencial es similar al procedimiento utilizado para medir la resistencia de una varilla por el mismo método. Sin embargo, hay que resaltar que por razones prácticas debe elegirse un electrodo externo de la malla para conectar el electrodo de corriente C_1 .

Tabla XVII. Medición de la resistencia de una malla de tierra por el método de caída de potencial

Dirección norte – sur	
Distancia entre C_1 y $C_2 = 26. m$	
Distancia (m)	Lectura (ζ)
3	4
6	5
9	4.5
12	7
15	6
18	6
21	7
62% = 16.12	6

Fig. 74. Planta de la configuración utilizada para medir la malla de tierra por el método de caída de potencial



5.2.2. Procedimiento utilizado en la aplicación del método de la pendiente

1. Se escogió un electrodo externo de la malla para conectar de ahí radialmente el aparato.
2. Se verificó que los bornes C_1 y P_1 del Megger estuvieran cortocircuitados mientras que C_2 y P_2 estuvieran en circuito abierto.
3. Se escogió una distancia C , equivalente a 13.3 m (2 veces la distancia diagonal de la malla) para clavar el electrodo de corriente, C_2 .
4. El electrodo P_2 se clavó en los puntos $0.2C$ (2.7 m), $0.4C$ (5.4 m), $0.6C$ (8.1 m) para obtener las respectivas lecturas de resistencia R_1, R_2, R_3 .
5. Se calculó el valor del cambio de pendiente en la gráfica de resistencia de tierra vrs. distancia.

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} \quad (5.4)$$

6. Con el valor de μ se encontró el valor D_p/C .

Para $0.4 < \mu < 0.89$

$$D_p / C = 0.7098 - 0.1626\mu \quad (5.5)$$

Para $0.9 < \mu < 1.19$

$$D_p / C = 0.7436 - 0.2030\mu \quad (5.6)$$

Para $1.2 < \mu < 1.59$

$$D_p / C = 0.9159 - 0.3490\mu \quad (5.7)$$

7. Se enterró el electrodo de potencial P_2 a la distancia $(D_p/C) * C$, medida desde la malla.
8. Con estas condiciones se tomó el valor de resistencia con el Megger.
9. Para verificar el resultado obtenido se realizó una nueva medición regresando al paso 3 y repitiendo el proceso para una distancia $C = 26$ m.

Tabla XVIII. Medición de la resistencia de una malla de tierra por el método de la pendiente

C = 13.3 m		C = 26 m	
Distancia (m)	Lectura (Ω)	Distancia (m)	Lectura (Ω)
0.2C = 2.7	$R_1 = 5$	0.2C = 2.7	$R_1 = 6$
0.4C = 5.4	$R_2 = 6$	0.4C = 5.4	$R_2 = 6.5$
0.6C = 8.1	$R_3 = 7$	0.6C = 8.1	$R_3 = 7$
μ	1	μ	1
D_p/C	0.5406	D_p/C	0.5406
$(D_p/C)*C = 7.1m$	7Ω	$(D_p/C)*C = 14m$	7Ω

Para $C = 13.3$ m

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} = \frac{7 - 6}{6 - 5} = 1 \quad (5.8)$$

puesto que $\mu = 1$, se tiene que

$$D_p / C = 0.7436 - 0.2030\mu = 0.7436 - 0.2030 * 1 = 0.5406 \quad (5.9)$$

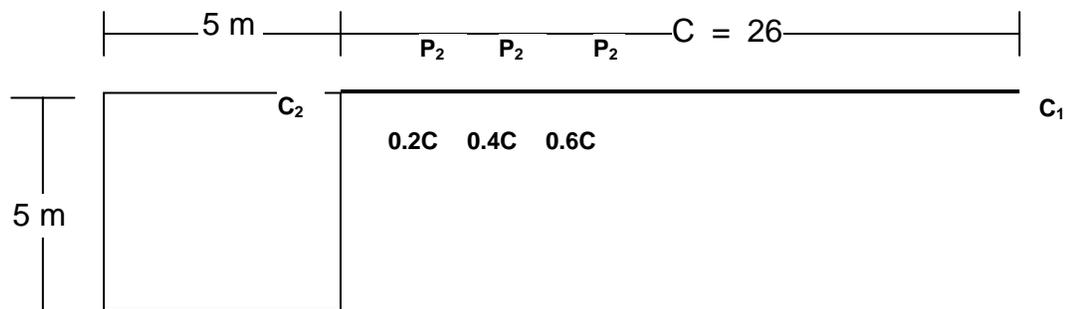
Para $C = 26$ m

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} = \frac{7 - 6.5}{6.5 - 6} = 1 \quad (5.10)$$

puesto que $\mu = 1$, se tiene que

$$D_p / C = 0.7436 - 0.2030\mu = 0.7436 - 0.2030 * 1 = 0.5406 \quad (5.11)$$

Fig. 75. Planta de la configuración utilizada para medir la malla de tierra por el método de la pendiente



5.3. Medición de la resistividad

Para medir la resistividad del terreno se utilizó calicatas en cada uno de los métodos.

5.3.1. Procedimiento utilizado en la aplicación del método Wenner

Para medir la resistividad por el método de Wenner se siguió el siguiente procedimiento:

- Se clavaron cuatro electrodos, separados por una distancia "a" (3 m) y a una profundidad $b = a/20 = 15$ cm.
- Por medio de los electrodos extremos se inyectó corriente, mientras que en los electrodos intermedios se midió potencial, utilizando el megger.
- El terreno se dividió mediante dos líneas ortogonales sobre las cuales se hizo pasar el arreglo de electrodos.
- Para asegurar la medición de resistividad del terreno se hizo pasar dos líneas a 45° de las primeras sobre las cuales también se hizo pasar el arreglo de electrodos.

Tabla XIX. Medición de la resistividad por el método de Wenner

Dirección norte – sur	Dirección este - oeste	Dirección noreste - suroeste	Dirección noroeste - sureste
430	480	460	480
440	460	460	460
440	440	480	450
440	460	480	450
430	480	460	470
440	480	450	460
460	-	460	-
440	-	460	-
430	-	460	-
$\rho_m = 439$	$\rho_m = 467$	$\rho_m = 463$	$\rho_m = 462$

Los resultados de las operaciones efectuadas para obtener los resultados mostrados en la tabla 5.6 y en las tablas siguientes se han manejado con tres cifras significativas.

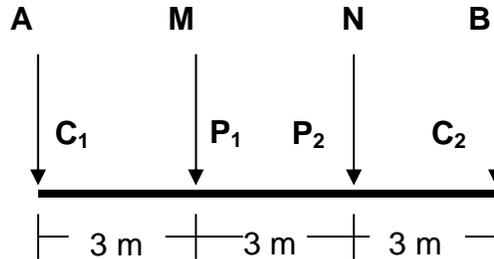
La resistividad por el método de Wenner, se determina por el promedio de las resistividades:

$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{439 + 467 + 463 + 462}{4} = 458 \Omega * m \quad (5.12)$$

El valor de la resistividad, obtenido por el método de Wenner, con una precisión de tres cifras significativas es:

$$\rho = 458 \Omega * m \quad (5.13)$$

Fig. 76. Arreglo utilizado para medir la resistividad por el método de Wenner



5.3.2. Procedimiento utilizado en la aplicación del método de Schlumberger

Al medir la resistividad mediante este método se utilizó un procedimiento parecido al anterior, con las siguientes variantes:

- El método exige que la separación AB, entre los electrodos de corriente C₁ y C₂ sea mayor que 5 veces la separación MN entre los electrodos de potencial P₁ y P₂, por lo que se escogió que AB = 7m, mientras que MN = 1m.
- Para medir la resistividad, se desplazó el arreglo a lo largo de líneas rectas ortogonales, manteniendo la separación entre los electrodos del arreglo.
- Se midió la resistividad, moviendo el arreglo a lo largo de líneas a 45° de las primeras, a fin de tener una mayor resolución.

Tabla XX. Medición de la resistividad por el método de Schlumberger

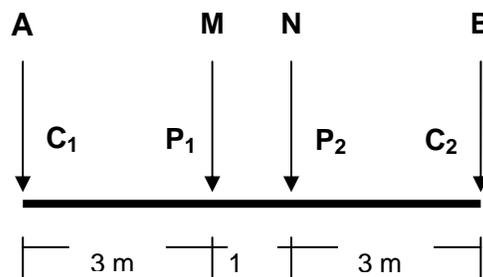
Dirección norte – sur	Dirección este - oeste	Dirección noreste - suroeste	Dirección noroeste - sureste
480	450	450	470
440	450	470	470
450	440	460	470
450	470	430	450
450	470	460	450
440	460	460	440
-	450	460	460
-	-	460	480
-	-	460	-
$\rho_m = 452$	$\rho_m = 456$	$\rho_m = 457$	$\rho_m = 461$

El valor obtenido para la resistividad, por el método de Schlumberger, viene dado por:

$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{452 + 456 + 457 + 461}{4} = 457 \Omega * m \quad (5.14)$$

$$\rho = 457 \Omega * m \quad (5.15)$$

Fig. 77. Arreglo utilizado para medir la resistividad por el método de Schlumberger



5.3.3. Procedimiento utilizado en la aplicación del método del polo-dipolo

En este método solamente se utilizan 3 electrodos ya que se considera que el electrodo C_2 (B) está en el infinito. Por tanto:

- Los electrodos se dispusieron en el orden C_1, P_1, P_2 (AMN)
- Se escogió una separación b entre C_1 y P_1 (AM) igual a 5 m
- La separación a entre P_1 y P_2 (MN) fue 1 m
- El esquema de mediciones fue similar al de los métodos anteriores

Tabla XXI. Medición de la resistividad por el método del polo-dipolo

Dirección norte – sur	Dirección este - oeste	Dirección noreste - suroeste	Dirección noroeste - sureste
480	480	490	490
480	460	490	490
470	490	490	490
460	480	480	460
480	450	480	450
470	460	480	460

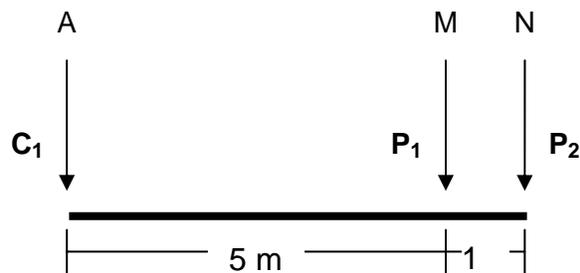
440	460	480	450
430	-	490	460
-	-	470	470
-	-	460	-
$\rho_m = 464$	$\rho_m = 469$	$\rho_m = 481$	$\rho_m = 469$

Al promediar los resultados obtenidos por el método del polo-dipolo, se obtuvo el siguiente valor de resistividad:

$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{464 + 469 + 481 + 469}{4} = 471 \Omega * m \quad (5.16)$$

$$\rho = 471 \Omega * m \quad (5.17)$$

Fig. 78. Arreglo utilizado para medir la resistividad por el método del polo – dipolo



5.3.4. Procedimiento utilizado en la aplicación del método del doble dipolo

En el método del doble dipolo se formaron dos dipolos de la siguiente manera:

- Los electrodos C_1 y C_2 fueron dispuestos para formar un dipolo de corriente a 1 m entre sí.
- Los electrodos P_1 y P_2 se colocaron a 1 m de distancia entre sí, para formar un dipolo de potencial.
- Debido a que se recomienda que la separación entre los dos dipolos sea grande, se escogió una distancia entre ellos de 6 m.
- El esquema en que se realizó la calicata dipolar fue similar al utilizado en la calicata de Wenner.

Tabla XXII. Medición de la resistividad por el método del doble dipolo

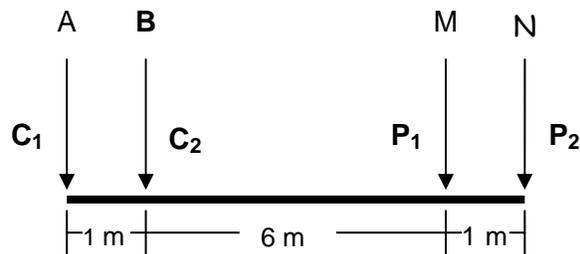
Dirección norte - sur	Dirección este - oeste	Dirección noreste - suroeste	Dirección noroeste - sureste
440	430	480	450
460	440	490	460
470	440	470	440
440	450	480	450
460	450	470	450
440	460	460	450
440	480	470	-
460	460	470	-
-	-	450	-
$\rho_m = 452$	$\rho_m = 451$	$\rho_m = 471$	$\rho_m = 450$

El valor que se obtuvo de la resistividad, por el método del doble dipolo fue el siguiente:

$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{452 + 451 + 471 + 450}{4} = 456 \Omega * m \quad (5.18)$$

$$\rho = 456 \Omega * m \quad (5.19)$$

Fig. 79. Arreglo utilizado para medir la resistividad por el método del doble dipolo



5.3.5. Procedimiento utilizado en la aplicación del método directo

El método directo es simplemente la aplicación del método de caída de potencial para encontrar la resistencia de un electrodo puesto a tierra. Al

obtener la lectura de la resistencia se aplica para obtener la resistividad del terreno, la ecuación:

$$\rho = 2\pi rR \quad (5.20)$$

donde:

r = profundidad de enterramiento de los electrodos

R = Lectura obtenida del valor de la resistencia

Los pasos seguidos para poner en práctica este método de medición, fueron los siguientes:

1. Se cortocircuitó los bornes C_1 y P_1 del Megger.
2. Se clavó a una profundidad aproximada de 20 cm el electrodo de corriente C_2 , a 6 m de C_1 .
3. El electrodo de potencial P_2 fue clavado a 3.6 m de C_2 .
4. Se verificó que se cumpliera la relación:

$$\frac{r}{d} < \frac{1}{20} = \frac{0.2}{6} < \frac{1}{20} \quad (5.21)$$

5. Se tomó la lectura de resistencia.

6. Posteriormente se realizaron calicatas (se movió la configuración de los electrodos a otro lugar) en línea recta hasta cubrir la extensión del terreno.

Tabla XXIII. Medición de la resistividad por el método directo

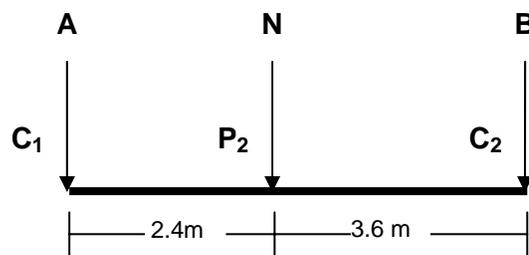
Dirección norte - sur		Dirección este - oeste		Dirección noreste - suroeste		Dirección noroeste - sureste	
R	ρ	R	ρ	R	ρ	R	ρ
360	450	380	477	380	477	370	465
350	440	380	477	370	465	370	465
340	427	370	465	360	450	350	440
340	427	370	465	360	450	360	450
350	440	350	440	360	450	360	450
350	440	370	465	370	465	370	465
360	450	380	477	380	477	370	465
-	-	-	-	380	477	390	490
-	$\rho_m = 439$	-	$\rho_m = 467$	-	$\rho_m = 464$	-	$\rho_m = 461$

Después de promediar los resultados mostrados en la tabla 5.10, se puede obtener el valor de la resistividad por el método directo, al promediar los resultados parciales obtenidos:

$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{439 + 467 + 464 + 461}{4} = 458 \Omega * m \quad (5.22)$$

$$\rho = 458 \Omega * m \quad (5.23)$$

Fig. 80. Arreglo utilizado para medir la resistividad por el método directo



6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el capítulo 5 se presentaron los resultados obtenidos en las pruebas de campo para la medición de resistencia y resistividad. En este capítulo se analizan los resultados obtenidos para de comparar la exactitud de los diferentes métodos ensayados durante este trabajo de tesis.

Se toman como bases para comparar los demás métodos, el método de caída de potencial, para la medición de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo y de una malla y el método de Wenner para la comparación con los métodos que miden la resistividad.

Los coeficientes que más adelante se presentan fueron encontrados de forma experimental. Como se indicó en el capítulo cuatro los ensayos de los métodos fueron desarrollados en el terreno que se encuentra entre el periférico de la universidad y el edificio T-1.

6.1. Medición de resistencia de puesta a tierra de un solo electrodo

Para la medición de resistencia de puesta a tierra de un solo electrodo, se ensayaron tres métodos:

- Método del 62% o de caída de potencial
- Método directo o de los dos puntos
- Método de los Tres Puntos o Puente Nippold

Para efectos de comparación se tomó como base el método de caída de potencial. Este es el método que ofrece los mejores resultados.

Debido a que el terreno es homogéneo, esto permitió que las dos lecturas que se tomaron con cada uno de los métodos coincidieran, sin embargo, se puede dar el caso que el SPT esté en un suelo no homogéneo, lo cual puede provocar variaciones al medir un mismo electrodo en diferentes direcciones debido a las diferencias en las capas que componen el suelo. También pueden provocar variaciones en las lecturas la presencia de corrientes erráticas en el terreno, e incluso las condiciones de luz y sombra, hora del día y la época del año que tienen que ver con la evaporación del agua. Incluso, el mismo instrumento puede provocar errores sistemáticos.

Cuando tal sea el caso se recomienda hacer las mediciones en la dirección en que las condiciones sean lo más homogéneas posibles.

Tabla XXIV. Resultados de resistencia del electrodo 1, obtenidos por tres métodos diferentes

Método	Resultados	
	dir. Este - Oeste	dir. Norte - Sur
Caída de potencial	30	30
Directo	150	150
Puente Nippold	25	25

Si se toma el método de caída de potencial como el método que ofrece los resultados más cercanos al valor verdadero de la resistencia de puesta a tierra entonces se necesita aplicar coeficientes de corrección a los resultados obtenidos por el método directo y el método del puente Nippold, para que los resultados sean similares a los obtenidos si se aplicara el método de caída de potencial.

Los coeficientes de corrección que se presentan a continuación, se han obtenido de forma experimental, es decir, mediante los resultados de las mediciones de campo realizadas. Así, estos coeficientes se obtienen de la siguiente ecuación:

$$c = \frac{R_{MR}}{R_{MP}} \quad (6.1)$$

donde:

c = Coeficiente de corrección parcial

R_{MR} = Resultado obtenido por el método de referencia

R_{MP} = Resultado obtenido a través del método de prueba

Así los coeficientes de corrección obtenidos en esta parte del estudio son los siguientes:

Método directo:

$$c = 0.2$$

Método del puente Nippold:

$$c = 1.2$$

Tabla XXV. Resultados obtenidos al medir la resistencia del electrodo 2, ubicado en la parte de afuera del edificio T-1, lado norte

Método	Resultados
Caída de potencial	23 Ω
Directo	120 Ω
Puente Nippold	25 Ω

Método directo:

$$c = 0.175$$

Método del puente Nippold:

$$c = 0.933$$

Tabla XXVI. Resultados obtenidos al medir la resistencia del electrodo ubicado entre los edificios T-3 y T-5

Método	Resultados
Caída de potencial	14 Ω
Directo	100 Ω
Puente Nippold	12.5 Ω

Método directo:

$$c = 0.14$$

Método del puente Nippold:

$$c = 1.12$$

Tabla XXVII. Resultados obtenidos al medir la resistencia del electrodo ubicado atrás del edificio T-4

Método	Resultados
Caída de potencial	23 Ω
Directo	120 Ω
Puente Nippold	25 Ω

Método directo:

$$c = 0.235$$

Método del puente Nippold:

$$c = 1.14$$

Como se observa, la comparación entre los resultados obtenidos al aplicar los métodos en lugares diferentes, proporciona factores de corrección parciales que difieren entre si, por lo que los factores de corrección finales que se dan, son valores medios de los obtenidos anteriormente para cada método.

El método directo aunque fácil de aplicar, es el más inexacto ya que en la lectura están incluidas la resistencia de los cables más la resistencia del sistema donde se conecta una de las puntas más la resistencia del electrodo bajo medición.

En las pruebas hechas para este trabajo de tesis, se obtuvo una lectura de resistencia cinco veces mayor que la obtenida al utilizar el método patrón, es decir el método de caída de potencial, por lo que *no se recomienda su uso* por causa de su extremado margen de error.

Sin embargo, si se va a utilizar el método directo se sugiere que para obtener un resultado más acorde con el valor verdadero de la resistencia, a la indicación obtenida se aplique el siguiente factor de corrección;

$$C_D = 0.1875 \quad (6.2)$$

El método del puente de Nippold, es otro método que permite la utilización de un medidor de dos terminales. A pesar que su aplicación es un poco más elaborada, por utilizar dos terminales auxiliares, este método es más exacto que el método directo.

Como se recordará, este método exige la medición de tres resistencias (entre el electrodo a medir y cada una de las tomas auxiliares y entre las dos tomas auxiliares) y un fácil procesamiento matemático para obtener la resistencia de puesta a tierra del electrodo que se está midiendo.

En la tabla XI se observa que a pesar de que el valor de resistencia obtenido mediante el puente Nippold, es cercano al resultado obtenido mediante el método de caída de potencial, hay un error de 16.7% que es una diferencia apreciable con el método de caída de potencial. Para obtener un valor más exacto se recomienda aplicar a la lectura obtenida, el siguiente factor de corrección:

$$C_N = 1.1 \quad (6.3)$$

Estos factores de corrección finales se obtuvieron al promediar todos los coeficientes parciales obtenidos para cada método ensayado en este estudio.

6.2. Medición de la resistencia de puesta a tierra de una malla

Para medir la resistencia de puesta a tierra de una malla se ensayó con dos métodos; éstos son los más apropiados para realizar este tipo de mediciones:

- El método de caída de potencial
- El método de la pendiente

El método directo y el método de puente Nippold, utilizados para medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo, no son apropiados para medir la resistencia de una malla, puesto que para realizar este tipo de mediciones se

necesitan grandes distancias, lo cual hace poco práctica su aplicación en lugares donde el área es pequeña y se necesita exactitud.

El método de la pendiente está diseñado para medir la resistencia de puesta a tierra de una malla, utilizando una distancia mínima menor a la requerida por el método de caída de potencial. Aun cuando requiere por lo menos cuatro mediciones y un procesamiento matemático mayor que el método de caída de potencial, es un método muy confiable y sus resultados tienen una exactitud grande.

En los resultados obtenidos en este trabajo, la diferencia entre el método de caída de potencial y el método de la pendiente fue un ohmio. Aparentemente el error es mínimo pero hay que tener en cuenta que el valor de resistencia obtenido por el método de caída de potencial es 6 Ω , por lo que una diferencia de un ohmio implica un error de 14%. Por esto se sugiere un factor de corrección para la lectura obtenida mediante el método de la pendiente. Este valor es:

$$C_p = 0.86 \quad (6.4)$$

Tabla XXVIII. Resultados de resistencia de una malla, obtenidos por dos métodos diferentes

Método	Resultados
---------------	-------------------

Caída de potencial	6 Ω	6 Ω
Pendiente	7 Ω	7 Ω

6.3. Medición de la resistividad

En el capítulo 5, solamente se presentaron los resultados obtenidos en las pruebas de los diferentes métodos ensayados para medir la resistividad, sin entrar a analizar el porqué de estos valores.

Tabla XXIX. Resultados de resistividad, obtenidos al ensayar cinco métodos diferentes

MÉTODO	RESULTADO ($\Omega \cdot m$)
Wenner	458
Schlumberger	457
Polo-Dipolo	471
Doble dipolo	456
Directo	458

Como se puede ver en los resultados de la tabla 29, el método de Wenner y el método directo coinciden en el resultado obtenido, por lo cual no es necesario utilizar factor de corrección alguno. Al comparar el método de

Schlumberger con el método de Wenner, se observa una pequeña diferencia de 0.22%, por lo que para mayor exactitud se sugiere el siguiente factor de corrección:

$$C_S = 1.0022 \quad (6.5)$$

Se puede concluir en que al aplicar en forma apropiada el método de Schlumberger se obtendrá un valor muy cercano al valor verdadero de la resistividad.

Al analizar el método de doble dipolo y comparar sus resultados con los obtenidos por el método Wenner se encuentra que entre estos hay un error de 0.44%. Si bien, el error es el doble del obtenido con el método de Schlumberger, aún así, el método del doble dipolo es un método muy exacto; sin embargo, para una mayor exactitud, se sugiere el siguiente factor de corrección:

$$C_{dd} = 1.0044 \quad (6.6)$$

Por otro lado, el método polo-dipolo ofrece un resultado cuya diferencia es de 3% respecto de los resultados obtenidos por el método Wenner, por lo que para mejorar la exactitud de los resultados obtenidos por este método se debe usar el siguiente factor:

$$C_{pd} = 0.97 \quad (6.7)$$

El método polo-dipolo recibe su nombre debido a que con los electrodos P_1 y P_2 se forma un dipolo de potencial mientras que el electrodo C_1 forma un polo de corriente. Es decir, al aplicar el método polo-dipolo solamente se utilizan tres electrodos, a lo cual se atribuye el mayor margen de error.