

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **PROYECTO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA NORMALIZADA PARA CENTROS DE TRANSFORMACIÓN EN EL SECTOR DEL NUEVO AEROPUERTO DE QUITO PARROQUIA DE TABABELA**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**RAÚL ALEJANDRO CHIRIBOGA GUARAS**  
raulchirimaster@yahoo.com

**DIRECTOR: LUIS TAPIA, MSC.**  
ltc51@hotmail.com

**Quito, Octubre de 2008**

## DECLARACIÓN

Yo, Raúl Alejandro Chiriboga Guaras declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Raúl A. Chiriboga G.**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Raúl Alejandro Chiriboga Guaras, bajo mi supervisión.

---

**Luis Tapia, Msc.**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo manifestar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que con su ayuda han hecho posible la realización de este trabajo y en particular al Ing. Luis Tapia, por su apoyo desinteresado y por la confianza brindada en el desarrollo de este proyecto, a los ingenieros Fausto Avilés y Mario Barba por la facilitación del equipo de medida, al Ing. Afonso Martins Superintendente Civil de AECON Andrade Gutiérrez, quien en representación de la constructora del nuevo aeropuerto internacional de Quito me brindó la ayuda necesaria y la infraestructura adecuada para realizar las mediciones de resistividad de campo; y, sobre todo a mi familia por su continuo apoyo.

## DEDICATORIA

*A Dios y a mi honorable familia, especialmente a mis padres, Segundo y Magdalena por el incansable esfuerzo que han realizado para mi desarrollo personal y académico, a mi hermano Ramón por su templanza y a mi Syl por su amor, los quiero mucho.*

*Raúl*

## CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
PRESENTACIÓN.....	xiv

### CAPÍTULO 1.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS.....	2
1.1.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.2. ALCANCE.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4. IMPORTANCIA.....	4

### CAPÍTULO 2.

2. CONCEPTOS GENERALES .....	5
2.1. CONSIDERACIONES BÁSICAS DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	5
2.1.1. DEFINICIÓN ELÉCTRICA DE RESISTIVIDAD.....	6
2.1.2. CARACTERÍSTICAS LINEAL Y NO LINEAL DE LA RESISTIVIDAD.....	6
2.1.3. RELACIÓN ENTRE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA.....	9
2.2. RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	11
2.2.1. ELEMENTOS QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	12
2.2.1.1. Naturaleza del terreno.....	12
2.2.1.2. Humedad.....	14
2.2.1.3. Temperatura del terreno .....	15
2.2.1.4. Salinidad del terreno .....	16
2.2.1.5. Estratigrafía del terreno.....	17
2.2.1.6. Variaciones estacionales y del medioambiente.....	18
2.2.1.7. Factores de naturaleza eléctrica.....	19
2.2.1.7.1. Gradiente de potencial .....	19
2.2.1.7.2. Magnitud de la corriente de defecto a tierra.....	19
2.2.1.7.3. Deterioro de los electrodos o del conjunto de puesta a tierra.....	19
2.2.1.8. Factores de naturaleza química.....	20
2.2.1.8.1. Efecto del PH.....	20
2.2.1.8.2. Potencial red-ox.....	21
2.2.1.9. Compactación.....	21
2.2.2. COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DEL SUELO.....	22
2.2.2.1. Características de los suelos.....	22
2.2.2.2. La conducción eléctrica del suelo.....	22
2.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.....	24
2.3.1. INTRODUCCIÓN.....	24

<b>2.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2.1. Puesta a tierra de los sistemas eléctricos.....</b>	<b>25</b>
2.3.2.1.1. <i>Sistemas de alambrados que requieren conexión a tierra.....</i>	25
2.3.2.1.2. <i>Sistemas de alambrados en c.a. que pueden no ser aterrizados sólidamente....</i>	26
2.3.2.1.3. <i>Conductor a aterrizar.....</i>	27
2.3.2.1.4. <i>Lugar de puesta a tierra del sistema.....</i>	27
2.3.2.1.5. <i>En un sistema derivado separado.....</i>	28
<b>2.3.2.2. Puesta a tierra de los equipos eléctricos.....</b>	<b>28</b>
2.3.2.2.1. <i>Equipos y canalizaciones que deben estar puestos a tierra.....</i>	28
2.3.2.2.2. <i>Puesta a tierra de equipos conectados mediante cordón.....</i>	31
2.3.2.2.3. <i>Partes metálicas de equipos fijos consideradas aterrizadas.....</i>	32
2.3.2.2.4. <i>Continuidad eléctrica del circuito de tierra.....</i>	32
2.3.2.2.5. <i>Circuitos que no se deben aterrizar.....</i>	32
2.3.2.2.6. <i>Consideraciones para un buen diseño de puesta a tierra de equipos eléctricos.....</i>	33
<b>2.3.2.3. Puesta a tierra en señales electrónicas.....</b>	<b>33</b>
2.3.2.3.1. <i>Transitorios.....</i>	33
2.3.2.3.2. <i>Interferencias causadas por armónicas.....</i>	34
2.3.2.3.3. <i>Interferencia en radiofrecuencia.....</i>	35
2.3.2.3.4. <i>Interferencia electromagnética.....</i>	35
2.3.2.3.5. <i>Protectores de cables de instrumentación y de comunicaciones.....</i>	35
2.3.2.3.6. <i>Modos de protección.....</i>	37
2.3.2.3.7. <i>Protección de PLCs.....</i>	38
<b>2.3.2.4. Puesta a tierra de equipos electrónicos.....</b>	<b>39</b>
2.3.2.4.1. <i>Esquema convencional.....</i>	39
2.3.2.4.2. <i>Esquema de tierra aislada.....</i>	40
2.3.2.4.3. <i>Esquema de tierra aislada total.....</i>	41
2.3.2.4.4. <i>Esquema de malla de referencia.....</i>	41
2.3.2.4.5. <i>Inferencias finales.....</i>	42
<b>2.3.2.5. Puesta a tierra de protección atmosférica .....</b>	<b>42</b>
2.3.2.5.1. <i>Sistemas de pararrayos.....</i>	43
2.3.2.5.2. <i>Zonas de protección.....</i>	43
<b>2.3.2.6. Puesta a tierra de protección electrostática.....</b>	<b>45</b>
2.3.2.6.1. <i>Medidas generales contra la electrostática.....</i>	45
2.3.2.6.2. <i>Protección de tanques.....</i>	46
<b>2.3.3. EFECTOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL ORGANISMO .....</b>	<b>47</b>
2.3.3.1. <b>Límites de corriente tolerables por el cuerpo humano.....</b>	<b>47</b>
<b>2.4. MATERIALES DE PUESTA A TIERRA.....</b>	<b>53</b>
<b>2.4.1. ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA.....</b>	<b>53</b>
2.4.1.1. <i>Tubería metálica de agua enterrada.....</i>	54
2.4.1.2. <i>Estructura metálica del edificio.....</i>	54
2.4.1.3. <i>Electrodos de concreto armado o UFER.....</i>	55
2.4.1.4. <i>Anillo de tierra.....</i>	56
<b>2.4.2. ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA ESPECIALMENTE CONSTRUÍDOS.....</b>	<b>56</b>
2.4.2.1. <i>Electrodos de varilla o pica y tubería.....</i>	57
2.4.2.1.1. <i>Picas convencionales Fe/Cu - Fe galvanizado.....</i>	58
2.4.2.1.2. <i>Electrodos de grafito rígido.....</i>	59
2.4.2.1.3. <i>Picas de Zinc.....</i>	60

2.4.2.1.4. <i>Electrodos de picrón</i> .....	61
<b>2.4.2.2. Electrodos de placa</b> .....	<b>62</b>
2.4.2.2.1. <i>Placas-estrella, planchas o similares</i> .....	62
<b>2.4.2.3. Estructuras metálicas enterradas</b> .....	<b>63</b>
<b>2.4.2.4. Ademe de pozos</b> .....	<b>63</b>
<b>2.4.3. ELECTRODOS PARA PUESTA A TIERRA EN RADIO FRECUENCIA</b> ...	<b>63</b>
<b>2.4.4. MALLAS</b> .....	<b>64</b>
<b>2.4.5. MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA A TIERRA</b> .....	<b>66</b>
2.4.5.1. <i>Varillas de mayor diámetro</i> .....	66
2.4.5.1. <i>Varillas más largas</i> .....	67
2.4.5.1. <i>Varillas en paralelo (Electrodos múltiples)</i> .....	67
<b>2.4.6. CONECTORES</b> .....	<b>69</b>
<b>2.4.7. REGISTROS</b> .....	<b>71</b>
<b>2.4.8. CONDUCTORES DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA</b> .....	<b>72</b>
<b>2.5. PROTECCIÓN CATÓDICA ANTE LA CORROSIÓN EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS</b> .....	<b>73</b>
<b>2.5.1. CAUSAS DE LA CORROSIÓN</b> .....	<b>75</b>
<b>2.5.1.1. heterogeneidad del metal</b> .....	<b>75</b>
2.5.1.1.1. <i>Pares galvánicos</i> .....	76
2.5.1.1.2. <i>Estructuras oxidadas y otras</i> .....	77
<b>2.5.1.2. Heterogeneidad del electrolito</b> .....	<b>77</b>
2.5.1.2.1. <i>Alineación diferencial</i> .....	77
2.5.1.2.2. <i>Pilas geológicas</i> .....	77
2.5.1.2.3. <i>Corrosión bacteriana</i> .....	78
<b>2.5.1.3. Acción de las corrientes vagabundas</b> .....	<b>78</b>
<b>2.5.2. TIPOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA</b> .....	<b>79</b>
2.5.2.1. <i>Ánodos galvánicos o de sacrificio</i> .....	79
2.5.2.2. <i>Corriente impresa</i> .....	79
<b>2.5.3. CRITERIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA</b> .....	<b>80</b>
<b>2.5.4. PERFIL DE POTENCIALES DE POLARIZACIÓN</b> .....	<b>81</b>
<b>2.5.5. FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA</b> .....	<b>81</b>
2.5.5.1. <i>Previsiones para el monitoreo</i> .....	82
2.5.5.2. <i>Interferencias con otros sistemas</i> .....	83
2.5.5.3. <i>Cruzamientos</i> .....	84
2.5.5.4. <i>Defectos en el recubrimiento anticorrosivo</i> .....	85
<b>2.6. MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b> .....	<b>85</b>
<b>2.6.1. MÉTODOS QUÍMICOS DE RELLENO</b> .....	<b>86</b>
 <b>CAPÍTULO 3.</b>	
<b>3. TÉCNICAS DE MEDICIÓN</b> .....	<b>89</b>
<b>3.1. ALCANCE DEL ANÁLISIS</b> .....	<b>89</b>
<b>3.2. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD</b> .....	<b>90</b>
<b>3.2.1. MÉTODOS DE MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DE LOS TERRENOS</b> ...	<b>90</b>
3.2.1.1. <i>Método de Wenner</i> .....	90
3.2.1.2. <i>Método de Schlumberger</i> .....	93
3.2.1.3. <i>Sistema simétrico</i> .....	94
3.2.1.4. <i>Método de los dos puntos</i> .....	95
3.2.1.5. <i>Método de Medición por muestras de suelos</i> .....	96
<b>3.2.2. INTERPRETACIÓN Y UTILIZACIÓN PRÁCTICA DE LAS MEDIDAS</b> ...	<b>96</b>



<b>3.2.2.1. Electrodo de pica .....</b>	<b>97</b>
3.2.2.1.1. <i>Electrodo de pica en profundidad .....</i>	<i>97</i>
3.2.2.1.2. <i>Utilización de picas en paralelo .....</i>	<i>100</i>
<b>3.2.2.2. Utilización de cables enterrados .....</b>	<b>101</b>
3.2.2.2.1. <i>Cable enterrado rectilíneo.....</i>	<i>101</i>
3.2.2.2.2. <i>Cable enterrado en bucle .....</i>	<i>103</i>
<b>3.2.3. MAPAS CON LÍNEAS DE EQUIRESISTIVIDAD .....</b>	<b>105</b>
<b>3.3. CORRECCIÓN DE LAS MEDICIONES .....</b>	<b>105</b>
<b>3.4. SUELOS HETEROGÉNEOS .....</b>	<b>106</b>
<b>3.4.1. EVALUACIÓN DE LAS CURVAS .....</b>	<b>106</b>
3.4.1.1. <i>Modelo de dos suelos con <math>\rho_1 &lt; \rho_2</math> .....</i>	<i>106</i>
3.4.1.2. <i>Modelo de dos suelos con <math>\rho_1 &gt; \rho_2</math> .....</i>	<i>107</i>
<b>3.4.2. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS .....</b>	<b>108</b>
<b>3.4.3. RELACIÓN ENTRE LA RESISTIVIDAD APARENTE (<math>\rho_a</math>) Y LA RESISTIVIDAD DE LA PRIMERA CAPA (<math>\rho_1</math>) .....</b>	<b>111</b>
<b>3.4.4. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y SUS SOLUCIONES .....</b>	<b>112</b>
<b>3.5. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN .....</b>	<b>113</b>
<b>3.6. PERFIL DE RESISTIVIDAD .....</b>	<b>115</b>
<b>3.6.1. TIPOS DE PERFILES DE RESISTIVIDAD .....</b>	<b>115</b>
3.6.1.1. <i>Perfil de resistividad ascendente .....</i>	<i>115</i>
3.6.1.2. <i>Perfil de resistividad descendente .....</i>	<i>116</i>
3.6.1.3. <i>Perfil de resistividad plano .....</i>	<i>116</i>
 <b>CAPÍTULO 4.</b>	
<b>4. PRUEBAS, MEDICIONES Y RESULTADOS .....</b>	<b>118</b>
<b>4.1. PROBLEMAS PREVIOS A LA MEDICIÓN .....</b>	<b>118</b>
<b>4.1.1. ESPECIFICACIÓN DEL LUGAR A MEDIR .....</b>	<b>118</b>
4.1.1.1. <i>Ubicación general del lugar .....</i>	<i>118</i>
4.1.1.2. <i>Coordenadas geográficas del lugar .....</i>	<i>119</i>
4.1.1.3. <i>Extensión del lugar .....</i>	<i>119</i>
4.1.1.4. <i>Niveles cerámicos .....</i>	<i>119</i>
<b>4.1.2. EQUIPOS REQUERIDOS PARA LA MEDICIÓN .....</b>	<b>120</b>
4.1.2.1. <i>Terrómetro Erdungsmesser .....</i>	<i>120</i>
4.1.2.1.1. <i>Características técnicas del Erdungsmesser (SIEMENS) .....</i>	<i>121</i>
4.1.2.1.2. <i>Funcionamiento del Erdungsmesser .....</i>	<i>121</i>
4.1.2.2. <i>Picas o electrodos para la medición .....</i>	<i>122</i>
4.1.2.3. <i>Combo .....</i>	<i>123</i>
4.1.2.4. <i>Cables .....</i>	<i>123</i>
4.1.2.5. <i>Termómetro .....</i>	<i>123</i>
4.1.2.6. <i>Reloj .....</i>	<i>123</i>
<b>4.2. PRUEBAS REALIZADAS .....</b>	<b>124</b>
<b>4.2.1. PRUEBA DE LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD .....</b>	<b>124</b>
4.2.1.1. <i>Constatación del equipo de medida .....</i>	<i>124</i>
<b>4.2.2. EVALUACIÓN GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DEL SECTOR .....</b>	<b>125</b>
<b>4.3. ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE RESISTIVIDAD .....</b>	<b>127</b>
<b>4.3.1. RESUMEN GENERAL .....</b>	<b>127</b>
<b>4.3.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS SECTORES ANALIZADOS .....</b>	<b>129</b>
4.3.2.1. <i>Zona Sur-Vía de Entrada (Conector Alpachaca) .....</i>	<i>129</i>

4.3.2.2.	Zona Sur-km 2 (Conector Alpachaca) .....	130
4.3.2.3.	Zona Campamento (Sector 1) .....	130
4.3.2.4.	Zona Campamento Noroeste (Sector 2) .....	133
4.3.2.5.	Zona Pista Noroeste y Norte (Sector 3-I) .....	133
4.3.2.6.	Zona Pista Norte (Sector 3-II) .....	133
4.3.2.7.	Zona Pista Centro Oeste (Sector 4-I) .....	134
4.3.2.8.	Zona Pista Centro Sur (Sector 4-II) .....	134
4.3.2.9.	Zona Pista Oeste (Sector 5) .....	134
4.3.2.10.	Zona Pista Centro Sureste (Sector 6-I) .....	135
4.3.2.11.	Zona Pista Centro Este (Sector 6-II) .....	135
4.3.2.12.	Zona Pista Sur (Sector 7) .....	135
4.3.2.13.	Zona Terminal (Sector 8) .....	136

## CAPÍTULO 5.

5.	DISEÑO DEL SISTEMA NORMALIZADO DE PUESTA A TIERRA .....	137
5.1.	NORMATIVA DE REFERENCIA PARA PUESTAS A TIERRA .....	137
5.1.1.	IEEE Std 80-2000 .....	137
5.1.2.	REGLAMENTO DE SEGURIDAD NEC .....	138
5.1.3.	REGLAMENTO DE SEGURIDAD TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE) COLOMBIA, CAPÍTULO II ARTÍCULO 15 "PUESTAS A TIERRA" .....	145
5.1.4.	OTRAS PUBLICACIONES .....	145
5.2.	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO E INSTALACIÓN DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA .....	146
5.2.1.	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA CENTROS DE TRANSFORMACIÓN .....	146
5.2.1.1.	Diseño .....	146
5.2.1.1.1.	Transformadores aéreos .....	146
5.2.1.1.2.	Cámaras de transformación .....	149
5.2.2.	NORMATIVA VIGENTE DE LA EEQS.A. PARA PUESTAS A TIERRA .....	156
5.2.2.1.	Disposiciones tipo para líneas y redes de distribución .....	156
5.2.2.1.1.	Disposición I (T1 -1 ) .....	157
5.2.2.1.2.	Disposición II (T1 -2 ) .....	158
5.2.2.1.3.	Disposición III (T1 -3 ) .....	159
5.2.2.1.4.	Disposición tipo para instalación en seccionador tripolar con carga (T3)....	160
5.2.2.2.	Partidas de diseños .....	161
5.2.2.2.1.	Partida I.- Conexiones a Tierra .....	162
5.2.2.2.2.	Partida O.- Obras civiles para cámaras .....	163
5.2.2.2.3.	Partida P.- Equipamiento de cámaras .....	163
5.3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA .....	163
5.3.1.	CONSIDERACIONES PRELIMINARES .....	163
5.3.2.	DISEÑOS NORMALIZADOS CARACTERÍSTICOS PARA EL SECTOR DEL NUEVO AEROPUERTO DE QUITO.....	164
5.3.2.1.	Diseño de puesta a tierra para un transformador aéreo.....	164
5.3.2.1.1.	Sector: Campamento (I).....	164
5.3.2.1.2.	Proceso de diseño .....	165
5.1.2.1.2.	Análisis económico .....	167
5.3.2.2.	Cámara de transformación .....	168
5.3.2.2.1.	Sector: Pista Noroeste y Norte (3-I) .....	168

5.3.2.2.2. <i>Proceso de diseño</i> .....	168
5.1.2.1.3. <i>Análisis económico</i> .....	174

## **CAPÍTULO 6.**

### **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

<b>6.1. CONCLUSIONES</b> .....	<b>175</b>
<b>6.2. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>177</b>

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>179</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>182</b>

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Fig. 2.1.</b> Fuerzas libres de un conductor.....	7
<b>Fig. 2.2.</b> Variación de la resistividad con la temperatura para tres conductores: (a) Metal ordinario; (b) Metal, aleación o compuesto superconductor; (c) Semiconductor.....	9
<b>Fig. 2.3.</b> Variación de la resistividad en función de la humedad del terreno.....	14
<b>Fig. 2.4.</b> Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura.....	15
<b>Fig. 2.5.</b> Variación de la resistividad del terreno en función de la salinidad.....	16
<b>Fig. 2.6.</b> Resistencia a tierra según su estratigrafía y profundidad.....	17
<b>Fig. 2.7.</b> Variación de la resistividad del terreno a lo largo del año.....	18
<b>Fig. 2.8.</b> Representación esquemática de un circuito de puesta a tierra.....	24
<b>Fig. 2.9.</b> Cajetín metálico puesto a tierra.....	28
<b>Fig. 2.10.</b> Tensión de paso cerca de una estructura conectada a tierra.....	48
<b>Fig. 2.11.</b> Tensión de contacto a una estructura conectada a tierra.....	49
<b>Fig. 2.12.</b> Tensión de transferencia.....	50
<b>Fig. 2.13.</b> Curva de peligrosidad.....	52
<b>Fig. 2.14.</b> Esfera de influencia de un electrodo simple.....	57
<b>Fig. 2.15.</b> Disposición de los electrodos de varilla: (a) Vertical; (b) Inclinada; y (c) Horizontal.....	58
<b>Fig. 2.16.</b> Electrodo de grafito rígido.....	59
<b>Fig. 2.17.</b> Esquema del electrodo de grafito rígido.....	60
<b>Fig. 2.18.</b> Esquema del electrodo de grafito picrón.....	61
<b>Fig. 2.19.</b> Electrodo de placa estrella.....	62
<b>Fig. 2.20.</b> Sistema de malla.....	65
<b>Fig. 2.21.</b> Relación entre el diámetro del electrodo y la resistencia a tierra.....	66
<b>Fig. 2.22.</b> Variación de los electrodos enterrados con la profundidad.....	67
<b>Fig. 2.23.</b> Varillas en paralelo.....	68
<b>Fig. 2.24.</b> Radio de conductividad de varillas en paralelo sobre un área de varillas espaciadas.....	68
<b>Fig. 2.25.</b> Conector estándar Cadweld.....	70
<b>Fig. 2.26.</b> Variedad de conectores.....	70
<b>Fig. 2.27.</b> Registro para electrodo de varilla.....	71
<b>Fig. 2.28.</b> Relleno de lynconita alrededor del electrodo.....	87
<b>Fig. 2.29.</b> Relleno circular al electrodo.....	88
<b>Fig. 3.1.</b> Esquema de montaje por el Método de Wenner.....	91
<b>Fig. 3.2.</b> Equipo y conexiones para la medición de la resistividad del suelo por el Método de Wenner.....	93
<b>Fig. 3.3.</b> Esquema de montaje por el Método de Schlumberger.....	93

<b>Fig. 3.4.</b> Esquema de conexión del sistema simétrico.....	95
<b>Fig. 3.5.</b> Partes constitutivas de un electrodo de pica empalmable.....	97
<b>Fig. 3.6.</b> Escala logarítmica de resistividades y resistencias para picas en función de la profundidad.....	99
<b>Fig. 3.7.</b> Escala logarítmica de resistividades y resistencias para cable enterrado rectilíneo.....	102
<b>Fig. 3.8.</b> Escala logarítmica de resistividades y resistencias para cable enterrado en bucle.....	104
<b>Fig. 3.9.</b> Modelo de dos suelos con $\rho_1 < \rho_2$ .....	106
<b>Fig. 3.10.</b> Resistividad aparente $\rho_a$ , cuando $\rho_1 < \rho_2$ .....	107
<b>Fig. 3.11.</b> Modelo de dos suelos con $\rho_1 > \rho_2$ .....	107
<b>Fig. 3.12.</b> Resistividad aparente $\rho_a$ , cuando $\rho_1 > \rho_2$ .....	108
<b>Fig. 3.13.</b> Extrapolación de $\rho_a$ para encontrar $\rho_1$ .....	109
<b>Fig. 3.14.</b> Determinación de los valores de H y de K. (a) Cuando es un punto; (b) Cuando es un triángulo.....	110
<b>Fig. 3.15.</b> Megger de cuatro terminales cortesía AVO internacional.....	114
<b>Fig. 3.16.</b> Perfil de resistividad.....	115
<b>Fig. 3.17.</b> Perfil de resistividad ascendente.....	116
<b>Fig. 3.18.</b> Perfil de resistividad descendente.....	116
<b>Fig. 3.19.</b> Perfil de resistividad plano.....	117
<b>Fig. 3.20.</b> Ventana principal del programa RESAP.....	117
<b>Fig. 4.1.</b> Dato de placa del Erdungsmesser (SIEMENS).....	120
<b>Fig. 4.2.</b> Erdungsmesser utilizado.....	122
<b>Fig. 4.3.</b> Perfil de resistividad para $b = 0.3$ m.....	131
<b>Fig. 4.4.</b> Perfil de resistividad para $b = 0.5$ m.....	132
<b>Fig. 5.1.</b> Vista frontal de disposición T1-1.....	157
<b>Fig. 5.2.</b> Vista superior de disposición T1-1.....	157
<b>Fig. 5.3.</b> Vista frontal de disposición T1-2.....	158
<b>Fig. 5.4.</b> Vista superior de disposición T1-2.....	158
<b>Fig. 5.5.</b> Vista frontal y superior de disposición T1-3.....	159
<b>Fig. 5.6.</b> Vista frontal de disposición T3.....	160
<b>Fig. 5.7.</b> Vista superior de disposición T3.....	161
<b>Fig. 5.8.</b> Extrapolación del perfil de resistividad para $b = 0.5$ m.....	164
<b>Fig. 5.9.</b> Disposición T1-3 utilizada.....	166
<b>Fig. 5.10.</b> Malla de puesta a tierra para una subestación de 138 a 23 kV, $128 \times 96$ m <sup>2</sup> , con 54 electrodos de tierra de 7.5 m c/u, $D = 8$ m.....	169

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tab. 2.1.</b> Resistividad según el tipo de terreno.....	13
<b>Tab. 2.2.</b> Valores medios de Resistividad.....	13
<b>Tab. 2.3.</b> Relación entre pH y la corrosividad.....	20
<b>Tab. 2.4.</b> Relación entre el potencial red-ox y la corrosividad.....	21
<b>Tab. 2.5.</b> Resistividades referenciales de aguas naturales genéricas.....	23
<b>Tab. 2.6.</b> Efectos de la intensidad de corriente eléctrica sobre el cuerpo humano.....	51
<b>Tab. 2.7.</b> Dimensiones mínimas recomendadas para los electrodos de puesta a tierra.....	64
<b>Tab. 2.8.</b> Conductor de los electrodos de tierra de instalaciones de c.a.....	72
<b>Tab. 2.9.</b> Relación entre resistividad y corrosión en función del estado del suelo.....	74
<b>Tab. 2.10.</b> Equivalencias de corrosividad y resistividad.....	74

<b>Tab. 2.11.</b> Potenciales electroquímicos normales de algunos metales expresados en voltios y referidos al electrodo de hidrógeno.....	76
<b>Tab. 3.1.</b> Resistencia según el número de picas de tierra.....	100
<b>Tab. 4.1.</b> Mediciones de prueba de resistividad.....	124
<b>Tab. 4.2.</b> Tabla de datos para la evaluación Geológica - Geotécnica.....	125
<b>Tab. 4.3.</b> Resumen de mediciones de resistividad de campo.....	128
<b>Tab. 4.4.</b> Simbología de las observaciones.....	129
<b>Tab. 4.5.</b> Resistividad en función de la separación de los electrodos para $b = 0.3$ m.....	131
<b>Tab. 4.6.</b> Resistividad en función de la separación de los electrodos para $b = 0.5$ m.....	132
<b>Tab. 5.1.</b> Fórmulas para el cálculo de resistencias de puesta a tierra en baja frecuencia..	148
<b>Tab. 5.2.</b> Parámetros a considerar en el procedimiento de diseño de mallas de puesta a tierra.....	150
<b>Tab. 5.3.</b> Lista de materiales para la disposición T1-1 (1 varilla).....	158
<b>Tab. 5.4.</b> Lista de materiales para la disposición T1-2 (2 varillas).....	159
<b>Tab. 5.5.</b> Lista de materiales para la disposición T1-3 (3 varillas).....	160
<b>Tab. 5.6.</b> Lista de materiales para la disposición T3.....	161
<b>Tab. 5.7.</b> Lista de materiales requeridos.....	167

## RESUMEN

Este trabajo presenta principalmente la influencia del suelo en el funcionamiento de todos los sistemas eléctricos, identificándolo con la tierra, cuya ilimitada capacidad de recepción, conducción y dispersión de corrientes eléctricas, permiten atribuirle la necesaria referencia de potencial cero, por donde se pueden cerrar los circuitos de evacuación o de concentraciones de carga o aparición de corrientes, fijando la seguridad de las personas, los animales y los aparatos de baja, media y alta tensión.

Según ello, el modelo básico para su aplicación, considera al suelo inicialmente como un medio homogéneo, que reproduce los fenómenos del campo eléctrico conservativo, a partir de cuyo desarrollo bajo condiciones establecidas, se define el principio de caída de potencial para la ejecución de las medidas directas de resistividades de campo (realizadas en el presente trabajo), resistencias de dispersión y potenciales de toque y de paso; entre ellas, la primera se considera imprescindible para los estudios de diseño, diagnóstico y corrección de puestas a tierra, dado que la identificación de dicho parámetro determina consecutivamente la resistencia de puesta a tierra.

La resistencia de un electrodo de tierra, medida en ohmios, determina que tan rápido, y a que potencial, la energía se equipara, de esta manera, la puesta a tierra es necesaria para mantener el potencial de los objetos al mismo nivel de tierra. Además de buscar que el peligro de exposición al choque eléctrico por voltaje sea bajo, el conductor de puesta a tierra debe funcionar conduciendo la corriente total de la falla a tierra (en magnitud y duración).

Además en este proyecto se especifica los procedimientos para diseñar sistemas de tierras y se realiza dos casos diferentes, uno para pequeñas puestas a tierra y otro para una malla o gran sistema de tierra, los dos situados y analizados en el sector del nuevo aeropuerto de Quito.

## PRESENTACIÓN

En el capítulo 1 se realiza una introducción del trabajo, detallando los objetivos, el alcance y la justificación del mismo.

En el capítulo 2 se describen los conceptos generales a fin de conocer detalladamente los sistemas de puesta a tierra, analizarlos y tener la certeza de cómo se comportan, para asegurar a todos los equipos involucrados y por supuesto a los seres humanos.

En el capítulo 3 se presentan las técnicas de medición del principal parámetro a estudiar cuando se trata de sistemas de puesta a tierra, la resistividad, así como la aparición de otros parámetros a considerar cuando el suelo se comporta heterogéneamente.

En el capítulo 4 se desarrolla el análisis minucioso de las resistividades medidas en el sector del nuevo aeropuerto de Quito, evaluando todas las características desfavorables y favorables, físicas y químicas del medio que las rodea.

En el capítulo 5 se presenta el diseño normalizado de un sistema de puesta a tierra para centros de transformación en el sector del nuevo aeropuerto de Quito, aclarando en brevedad la mayoría de normas aplicables.

En el capítulo 6 se exponen las conclusiones a las que se llegó luego de realizar el estudio y se sugieren recomendaciones con el fin de evitar que se produzcan inconvenientes en el diseño o construcción de sistemas de puesta tierra.

# CAPÍTULO 1.

## INTRODUCCIÓN

En cualquier Sistema Eléctrico de Potencia (S.E.P.), debe existir la denominada «puesta a tierra» que identifica a uno o varios electrodos enterrados en un sitio determinado del suelo, esta toma a tierra tiene un potencial que servirá como nivel de referencia básico y respecto al cual se medirán o considerarán necesariamente todos los demás dispositivos, equipos, lugares y niveles de voltaje del sistema.

La «puesta a tierra» al ser básicamente un electrodo de referencia puede tener un potencial variable con respecto al tiempo, respecto al cual se medirán los diversos potenciales dentro y fuera de él (variados en base a un punto fijo), dicha tierra puede constituir todo un sistema de puesta a tierra, muy importante y necesario, pues a más de referencia, sirve de protección ante fallas, sobretensiones, sobrecorrientes y cortocircuitos que afecten a otros sistemas que son diseñados en relación a este, como por ejemplo: el de telecomunicaciones, de computación, etc.

Las características eléctricas del sistema de puesta a tierra deben ser entendidas y comprendidas en su totalidad, principalmente entre ellas la resistividad del suelo o terreno en donde se realizará la nueva instalación, pues según ésta, se determinará la resistencia y la efectividad de la puesta a tierra de dicho sitio.

Las puestas a tierra tienen el objetivo principal de limitar la tensión que con respecto a tierra, pueden presentar en un momento dado los componentes metálicos, de esta manera se las establece como un circuito de protección paralelo a la instalación eléctrica que sirve para salvaguardar a las personas que pueden estar en contacto con dichos elementos.



Además las puestas a tierra son fundamentales para que cualquier instalación, sistema eléctrico y superficie próxima al terreno, carezcan de diferencias de potencial peligrosas y que al mismo tiempo permitan el paso a tierra de las corrientes de falla o de las descargas atmosféricas.

## **1.1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS**

### **1.1.1. OBJETIVO GENERAL**

Elaborar un proyecto de un sistema normalizado de puesta a tierra de la parte nororiental de la ciudad de Quito correspondiente al sector del nuevo aeropuerto, parroquia de Tababela.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la resistividad de los suelos con los equipos de medida respectivos en diferentes sitios del área nororiental de la ciudad de Quito, aledaños al nuevo aeropuerto, parroquia de Tababela.
- Obtener las resistencias de puesta a tierra de los lugares analizados, requeridas para el diseño y construcción de puestas a tierra normalizadas, con las respectivas justificaciones técnicas.
- Elaborar el proyecto de puesta a tierra normalizada para centros de transformación, determinando el diseño adecuado para cada lugar especificado.

## **1.2. ALCANCE**

El presente proyecto permitirá facilitar la información necesaria del suelo propiamente dicho, en este caso su resistividad y su resistencia, para desarrollar la respectiva planificación eléctrica del lugar en el futuro, agilizando el proceso de

diseño de puesta a tierra tanto para la empresa de distribución, como para el constructor privado o contratista.

De esta manera se determinará el sistema de puesta a tierra, sugiriendo entre varios diseños normalizados, el que mejor se adapte al lugar especificado y tomando en cuenta sus características técnicas y presupuestarias.

Así este trabajo tiene como finalidad primordial estudiar la resistividad tanto teórica como prácticamente; es decir, analizar la importancia que tiene dentro de un Sistema Eléctrico de Potencia (S.E.P.) en lo que se refiere a puestas a tierra normalizadas de centros de transformación; del mismo modo se realizarán las respectivas mediciones de resistividad en distintos lugares del sector del nuevo aeropuerto de Quito, que aún no hayan sido ocupados o habitados, con el afán de obtener información general de la resistividad del suelo, que a la postre sirva de ayuda para la correcta construcción de nuevas instalaciones eléctricas, optimizando tiempo y dinero en la ejecución o elaboración de las mismas.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Considerando al sector del nuevo aeropuerto como un foco de crecimiento tanto industrial como residencial en los años venideros, es sumamente importante conocer las características del terreno previo a la instalación de su respectiva puesta a tierra, debido a la inminente proliferación de nuevas edificaciones, es muy factible presentar una guía de procedimientos para el diseño y elaboración del sistema de puesta a tierra que facilite su construcción.

Debido a la falta de información sobre el suelo del lugar mencionado, es necesario obtener los valores de resistividad y a su vez los de resistencia de puesta a tierra en diversos sitios de la parroquia de Tababela, aledaños al sector del nuevo aeropuerto, que aún no hayan sido planificados, es decir donde no exista cualquier tipo de construcción civil, con el fin de acceder rápidamente a los datos reales, para proceder inmediatamente al diseño del sistema de puesta a

tierra normalizada, necesaria para la ejecución de centros de transformación futuros.

#### **1.4. IMPORTANCIA**

La razón principal de este proyecto radica en la objetiva toma de las mediciones de la resistividad del terreno y su correcta interpretación, pues para determinar la resistividad de diseño óptima, se debe considerar las diferentes condiciones del entorno en el cual se realicen dichas pruebas, analizando de este modo los parámetros que influyen en la resistividad del terreno, como pueden ser el tipo de suelo, estratigrafía, factores de corrección, temperatura, variaciones estacionales, compactación, etc.

El análisis posterior abarca la determinación de la resistencia de puesta a tierra, la cual se obtendrá con los datos obtenidos de las mediciones (previamente ordenados y clasificados de acuerdo al lugar, hora y día en que fueron tomados), utilizando para ello, el mayor valor de resistividad para cada sector. Esta resistencia constituye la base del diseño correspondiente al lugar especificado.

## CAPÍTULO 2.

### CONCEPTOS GENERALES

#### 2.1. CONSIDERACIONES BÁSICAS DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La resistividad es la magnitud física que mide la resistencia que opone, al paso de la corriente eléctrica, un cuerpo o material, además es una constante que depende de la naturaleza de la sustancia considerada y que únicamente registra variaciones con los cambios de temperatura.

Por esta razón la resistividad es una propiedad de los materiales, los mismos que pueden ser a su vez conductores, semiconductores o aisladores; de esta manera si la sustancia es un conductor *perfecto* tendrá una resistividad nula, y un aislador *perfecto*, una resistividad infinita. También es importante mencionar que la resistividad es inversamente proporcional a la conductividad eléctrica de dichos materiales, la cual constituye otra propiedad particular de la materia.

Las resistividades más bajas corresponden a los metales y las aleaciones, que son los mejores conductores, mientras las resistividades de los aisladores exceden a las de los anteriores en un factor de  $10^{22}$  [R1].

Mediante los aisladores es posible limitar las corrientes eléctricas a trayectorias bien definidas a través de buenos conductores eléctricos, mientras que es imposible confinar las corrientes caloríficas hasta un grado comparable. Es muy interesante observar que, como grupo, los metales son los mejores conductores térmicos; las conductividades eléctrica y térmica de los metales, así como sus respectivas resistividades se deben en gran parte a los electrones libres. Al contrario, los semiconductores forman un grupo intermedio entre los metales y los

aisladores, y su principal importancia no se debe a sus resistividades, sino al modo que estas quedan afectadas por la temperatura y por pequeñas cantidades de impurezas.

### 2.1.1. DEFINICIÓN ELÉCTRICA DE RESISTIVIDAD <sup>R1</sup>

La intensidad de corriente por unidad de sección transversal recta, o densidad de corriente  $\mathbf{J}$  en un conductor depende de la intensidad del campo eléctrico  $\mathbf{E}$  y de la naturaleza del conductor. Entonces se define una característica del conductor denominada *resistividad*, simbolizada con la letra griega « $\rho$ », como la razón de la intensidad del campo eléctrico a la densidad de la corriente:

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (2.1.)$$

Con lo que se puede concluir que la resistividad es la intensidad del campo eléctrico por unidad de densidad de corriente. Cuanto mayor sea la resistividad, tanto mayor será la intensidad del campo eléctrico necesaria para establecer una densidad de corriente dada; o bien, tanto menor será la densidad de corriente para una intensidad de campo eléctrico determinada. La unidad es el ohmio-metro y se la definirá más adelante.

### 2.1.2. CARACTERÍSTICAS LINEAL Y NO LINEAL DE LA RESISTIVIDAD

De la ecuación (2.1.) se deduce que  $E = \rho \cdot J$  y, dado que los vectores  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{J}$  tienen el mismo sentido, la ecuación anterior puede escribirse en forma vectorial:

$$\mathbf{E} = \rho \cdot \mathbf{J} \quad (2.2.)$$

Ha de tenerse en cuenta que la ecuación (2.2.) no implica necesariamente que la resistividad  $\rho$  sea *constante*, esto es, que la densidad de corriente  $\mathbf{J}$  sea directamente proporcional a  $\mathbf{E}$ , es decir función lineal del campo eléctrico.

---

<sup>R1</sup> SEARS, F.; ZEMANSKY, M. University Physics. Tercera edición.

Sin embargo, para muchas sustancias conductoras, especialmente los metales, a una temperatura dada es una constante independiente de  $\mathbf{E}$ , de modo que si  $\mathbf{E}$  se duplica, por ejemplo, la densidad de corriente también se duplica.

El descubrimiento de que, a una temperatura dada,  $\rho$  es una constante para un conductor metálico, lo hizo el alemán G. S. Ohm (1789-1854) y se conoce como la *Ley de Ohm*. Una sustancia que obedece a esta ley se denomina conductor *óhmico* o conductor *lineal*; en caso contrario, el conductor se denomina *no lineal*. De este modo la ley de Ohm describe una propiedad especial de ciertas sustancias y no una propiedad general de la materia.

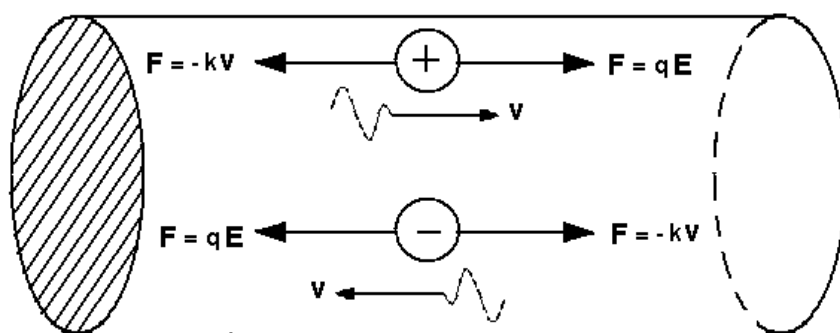


Figura 2.1. Fuerzas libres de un conductor.

Las fuerzas libres del conductor de la figura anterior se mueven con una velocidad de arrastre constante tal que la fuerza retardadora efectiva de viscosidad, es igual y opuesta a la fuerza impulsora.

La resistividad de un material puede expresarse en función de las propiedades del modelo de la Figura 2.1. en forma que se explica a continuación: Sea  $k$  la fuerza de viscosidad efectiva por unidad de velocidad, de modo que  $f = -k \cdot v$ . La fuerza impulsora es  $F = q \cdot E$ , y cuando  $v$  es la velocidad límite, entonces se tiene:

$$F + f = 0, \quad q \cdot E = k \cdot v, \quad E = \frac{k \cdot v}{q}$$

La densidad de corriente para el caso en que solo hay presente un tipo de carga portadora es  $J = nq \cdot v$ , donde  $n$  es el número de partículas por unidad de volumen. Por tanto,

$$\rho = \frac{E}{J} = \frac{k \cdot v / q}{nq \cdot v} = \frac{k}{nq^2} \quad (2.3.)$$

Si  $k$  y  $n$  son constantes, la resistividad también lo es y se cumple la ley de Ohm. La resistividad de todos los conductores metálicos aumenta al elevar la temperatura como se puede observar en la Figura 2.2.(a). No existe una teoría enteramente satisfactoria para explicar este efecto, que parece deberse a la creciente probabilidad de choques entre iones metálicos y portadores de carga al aumentar la vibración térmica de los iones cuando se eleva la temperatura. El coeficiente efectivo de viscosidad  $k$  de la ecuación (2.3.) crece, y ello aumenta la resistividad.

Para un intervalo completo de temperatura no demasiado grande, la resistividad de un metal puede representarse por la ecuación:

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20^\circ)] \quad (2.4.)$$

Siendo  $\rho_{20}$  la resistividad a  $20^\circ\text{C}$  y  $\rho_t$  la correspondiente a la temperatura de  $t^\circ\text{C}$ . El factor  $\alpha$  se denomina *coeficiente térmico de la resistividad*. Se han encontrado varios metales que presentan la propiedad de *superconductividad*. Al descender la temperatura, la resistividad disminuye al principio regularmente, como la de cualquier metal. A la llamada temperatura crítica (entre  $0.1\text{K}$  y  $10\text{K}$ ), la resistividad desciende súbitamente a cero, como muestra la Figura 2.2.(b). Una vez establecida una corriente en un anillo superconductor continuará por sí misma, al parecer indefinidamente, sin la presencia de ningún campo impulsor.

Los principios de la mecánica clásica no permiten explicar este comportamiento, que solo puede comprenderse basándose en la mecánica cuántica.

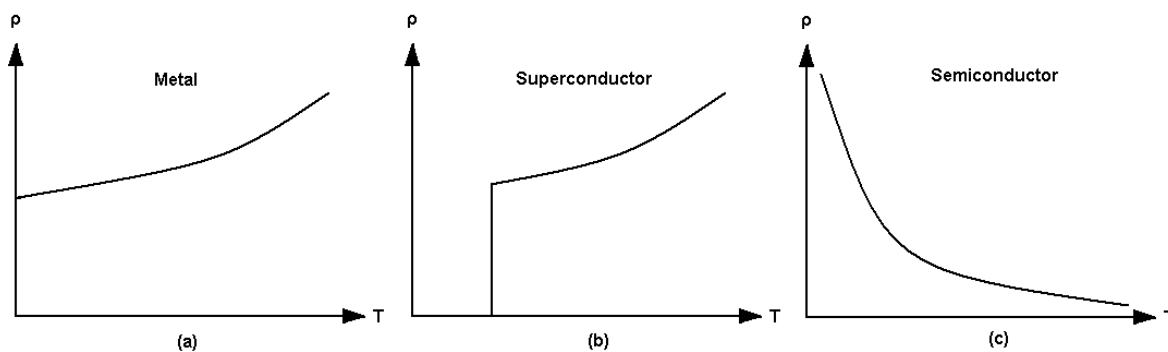


Figura 2.2. Variación de la resistividad con la temperatura para tres conductores:  
 (a) Metal ordinario; (b) Metal, aleación o compuesto superconductor;  
 (c) Semiconductor.

La resistividad de un semiconductor disminuye rápidamente al elevar la temperatura, como se observa en la Figura 2.2.(c). Cuando la temperatura crece, el número de portadores de carga aumenta rápidamente y este aumento de  $n$  en la ecuación (2.3.) sobrepasa con mucho a cualquier incremento de  $k$ . Inversamente, al descender la temperatura la resistividad de un semiconductor se hace tan grande que puede considerársele como un aislador.

### 2.1.3. RELACIÓN ENTRE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA.

La densidad de corriente  $\mathbf{J}$  en todo punto interior de un conductor, en el cual sólo existe un campo electrostático, está dada por la ecuación (2.2.).

Debido a que no hay instrumentos que puedan medir la densidad de corriente y el campo electrostático directamente, conviene escribir a dicha ecuación en forma distinta.

Multiplicando escalarmente ambos miembros de la misma por un elemento de longitud  $d\mathbf{s}$  del conductor, con la dirección y sentido de la densidad de corriente  $\mathbf{J}$ , e integrando a lo largo del conductor desde el punto  $a$  al  $b$ . Dado que  $\mathbf{J}$  y  $d\mathbf{s}$  son paralelos, el producto  $\mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}$  se reduce a  $J ds$  o sea  $(I / A) ds$ . Además



limitándose, a conductores para los que la intensidad de corriente  $I$  sea la misma en todas las secciones rectas, de modo que  $I$  pueda sacarse fuera de la integral. Por tanto,

$$\int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = I \int_a^b \frac{\rho}{A} ds \quad (2.5.)$$

La integral del primer término es simplemente la diferencia de potencial  $V_{ab}$  existente entre los puntos  $a$  y  $b$ ; la del segundo miembro se la denomina *resistencia*  $R$  del conductor entre los puntos  $a$  y  $b$ :

$$R = \int_a^b \frac{\rho}{A} ds \quad (2.6.)$$

La ecuación (2.5.) puede escribirse ahora de la siguiente forma:

$$V_{ab} = I \cdot R \quad (2.7.)$$

Lo cual significa que la diferencia de potencial entre los extremos de un conductor, en el cual la fuerza impulsora es puramente electrostática, es igual al producto de la intensidad que circula por el conductor, por su resistencia. La diferencia de potencial y la intensidad de corriente pueden medirse con un voltímetro y un amperímetro respectivamente. La unidad de resistencia eléctrica es el voltio por amperio u ohmio ( $\Omega$ ).

Todo material ya sea conductor (excepto un superconductor) tiene resistencia. La resistencia de un conductor homogéneo de longitud  $L$  y sección transversal constante  $A$  es:

$$R = \int_0^L \frac{\rho}{A} ds = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (2.8.)$$

Expresando la resistividad en función de la resistencia se tiene lo siguiente:

$$\rho = \frac{A \cdot R}{L} \quad (2.9.)$$

De esta ecuación se puede observar que la resistividad es directamente proporcional a la sección y a la resistencia del conductor e inversamente proporcional a su longitud.

## 2.2. RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Hasta el momento se ha especificado los parámetros eléctricos de la resistividad en los conductores metálicos o semiconductores, pero nuestro objetivo se enmarca principalmente en estudiar la resistividad del suelo propiamente dicha.

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

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina *resistividad aparente* que para el interés de este trabajo, será conocida simplemente como « $\rho_a$ ». [R2].

Ahora, la resistividad del terreno es la resistencia que presenta al paso de la corriente un cubo de terreno de 1 m de arista y de 1  $\Omega$ , entonces remplazando en la ecuación (2.9.) se tiene:

$$\rho = \frac{R \times A}{L} = \frac{1\Omega \times 1m^2}{1m} = 1\Omega \cdot m$$

Por esta razón la unidad de la resistividad en el Sistema Internacional es el ohmio-metro ( $\Omega \cdot m$ ), interpretada también como resistencia por unidad de volumen.

Para realizar una puesta a tierra es muy importante saber como se comporta el terreno, para ello se debe analizar todas sus características, y la mejor manera de hacerlo es conocer el valor de su resistividad; pues desde el punto de vista eléctrico, el suelo es el encargado de disipar las corrientes de defecto o falla que lleguen a este por medio de los electrodos de puesta a tierra. Con el fin de determinar las características del suelo, normalmente se obtienen muestras hasta una profundidad razonable que pueda permitir juzgar su homogeneidad.

### **2.2.1. ELEMENTOS QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO <sup>R2</sup>**

La resistividad del terreno varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre, ésta se ve afectada por varios factores, estos son:

- Naturaleza del terreno
- Humedad
- Temperatura
- Salinidad
- Estratigrafía
- Variaciones estacionales y del medio ambiente
- Factores de naturaleza eléctrica
- Factores de naturaleza química
- Compactación

#### **2.2.1.1. Naturaleza del terreno <sup>R2</sup>**

Los terrenos son buenos, regulares o malos conductores en función de su naturaleza. El conocimiento de su naturaleza es el primer paso para la implantación de una adecuada puesta a tierra.

---

<sup>R2</sup> MARTÍNEZ R, Juan. “Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas”

**Tabla 2.1. Resistividad según el tipo de terreno.<sup>R2</sup>**

<b>NATURALEZA DEL TERRENO</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega.m</math>)</b>
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600

Para cálculos aproximados de la resistencia de puesta a tierra se pueden utilizar los siguientes valores medios:

**Tabla 2.2. Valores medios de resistividad.<sup>R2</sup>**

<b>NATURALEZA DEL TERRENO</b>	<b>Valor medio de la Resistividad (<math>\Omega.m</math>)</b>
Terrenos cultivables, fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles, terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000

Se puede observar que a medida que el material del suelo es más compacto y más antiguo su resistividad es mayor (grosor de los granos de las partículas).

De esta manera a razón que aumenta el tamaño de las partículas aumenta el valor de la resistividad, por ello la grava tiene mayor resistividad que la arena, y ésta mayor resistividad que la arcilla.

### 2.2.1.2. Humedad <sup>R2</sup>

El agua que contiene el terreno, su estado higrométrico, influye de forma apreciable sobre la resistividad, pues al aumentar la humedad disminuye la resistividad y al disminuir la humedad aumenta la resistividad; en cualquier caso, siempre que se añada agua a un terreno disminuye su resistividad respecto a la que tendría en seco. Se dice que un terreno está «saturado de agua» cuando todos sus intersticios están llenos de agua.

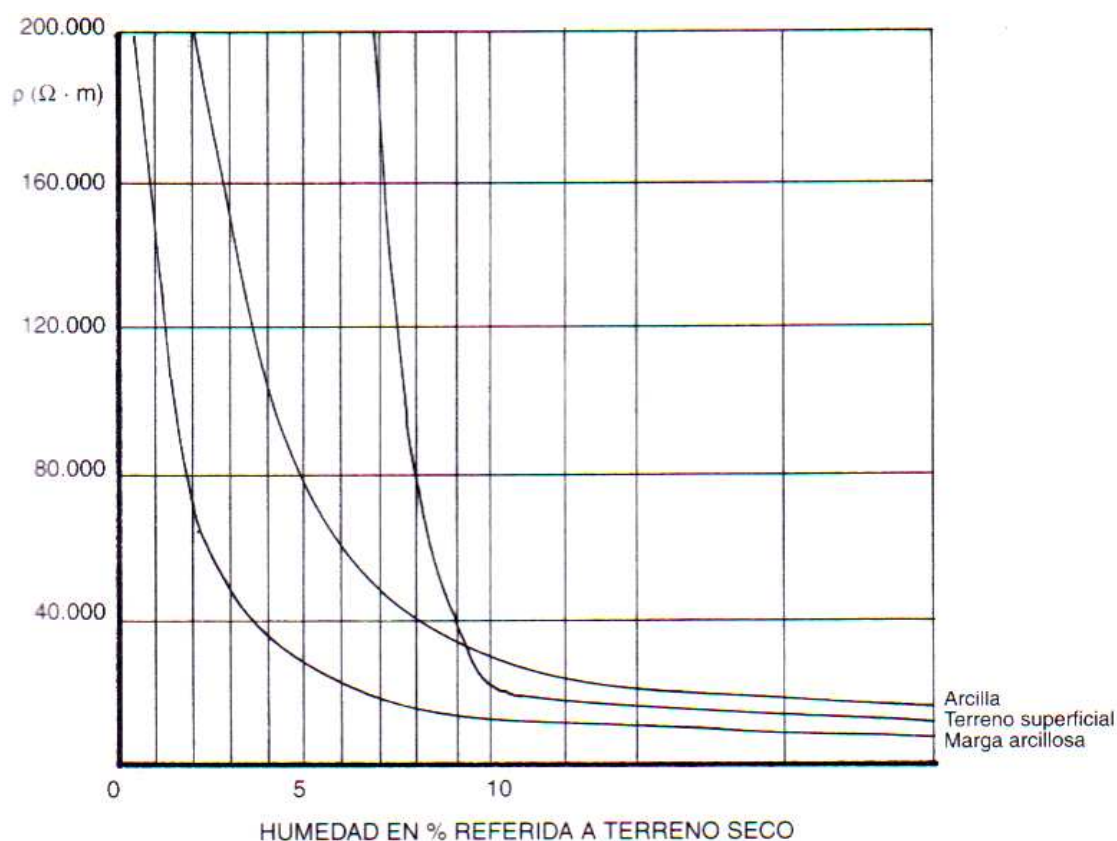


Figura 2.3. Variación de la resistividad en función de la humedad del terreno.

Por efecto de la evaporación natural de la superficie del terreno se produce un empobrecimiento del agua contenida en los agregados, fenómeno que se propaga

lentamente desde la superficie hacia los estratos más profundos y tiene mayor importancia cuanto más seco sea el clima del lugar y cuanto más superficial es la colocación del electrodo de tierra.

En los lugares de lluvias estacionales hay que tener muy en cuenta estos fenómenos, pues en la época de lluvias el terreno presenta una resistividad muy baja mientras que en la época seca la resistividad es muy alta. En algunas regiones donde estas oscilaciones son muy acentuadas, se deben fijar valores de máximos admisibles de resistividad de los terrenos, uno para la época de lluvias y otro para la época seca.

### 2.2.1.3. Temperatura del terreno <sup>R2</sup>

Las características térmicas del terreno dependen de su composición, de su grado de compactación y del grado de humedad.

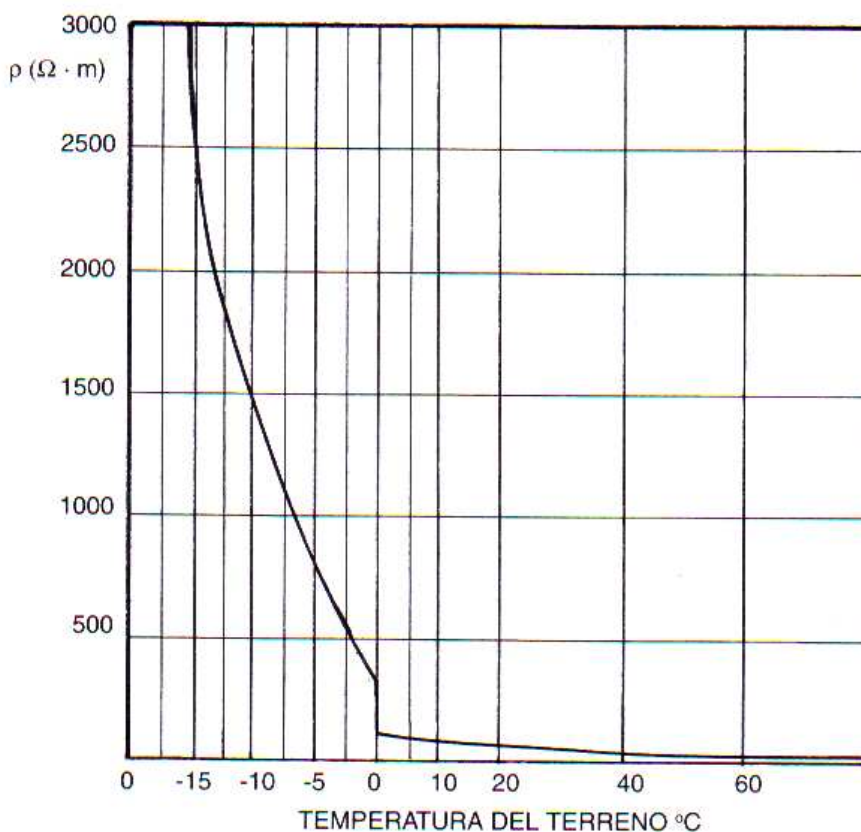


Figura 2.4. Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura.

La resistividad del terreno aumenta al disminuir la temperatura, pero cuando el terreno se enfría por debajo de cero grados centígrados, la resistividad aumenta muy rápidamente, como se puede ver en la Figura 2.4.

Si un terreno está a una temperatura inferior a  $0^{\circ}\text{C}$  el agua se congela, formándose hielo, que es aislante desde el punto de vista eléctrico, ya que la movilidad de los iones del terreno a través del agua se ve detenida al congelarse ésta.

#### 2.2.1.4. Salinidad del terreno <sup>R2</sup>

Un terreno puede mejorar sensiblemente su valor de resistividad aparente o incluso puede hacerse bueno un terreno de alta resistividad simplemente añadiéndole sales, es decir al aumentar la salinidad del terreno disminuye su resistividad.

Para mejorar la resistividad del terreno se añade sal en las arquetas de los puntos de puesta a tierra o cerca de los electrodos si son accesibles, y luego se los riega con agua; de esto se tratará más detalladamente en el siguiente este capítulo.



Figura 2.5. Variación de la resistividad del terreno en función de la salinidad.

El agua hace que las sales penetren a lo profundo del terreno, y ya sea un riego excesivo o lluvias en gran cantidad, lavan el suelo, arrastrando la sal que rodea

los electrodos de puesta a tierra, aumentando su resistividad. Por esta razón no es aconsejable colocar las tomas de tierra en sitios cercanos a ríos, tanto superficiales como subterráneos, pues suelen ser terrenos muy depurados y por ende más resistivos de lo normal.

La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; esto es, por la cantidad de minerales y sales disueltas. Como ejemplo, para valores de 1% (por peso de sal) o mayores, la resistividad es prácticamente la misma, pero, para valores menores de esa cantidad, la resistividad es muy alta.

### 2.2.1.5. Estratigrafía del terreno <sup>R2</sup>

Los terrenos están formados en profundidad por capas de diferentes agregados y por lo tanto de distintas resistividades. La resistividad será una combinación de la resistividad de las diferentes capas y del espesor de cada una de ellas. Entonces la resistividad media o aparente será la combinación de las resistividades de todas las capas que componen el terreno.

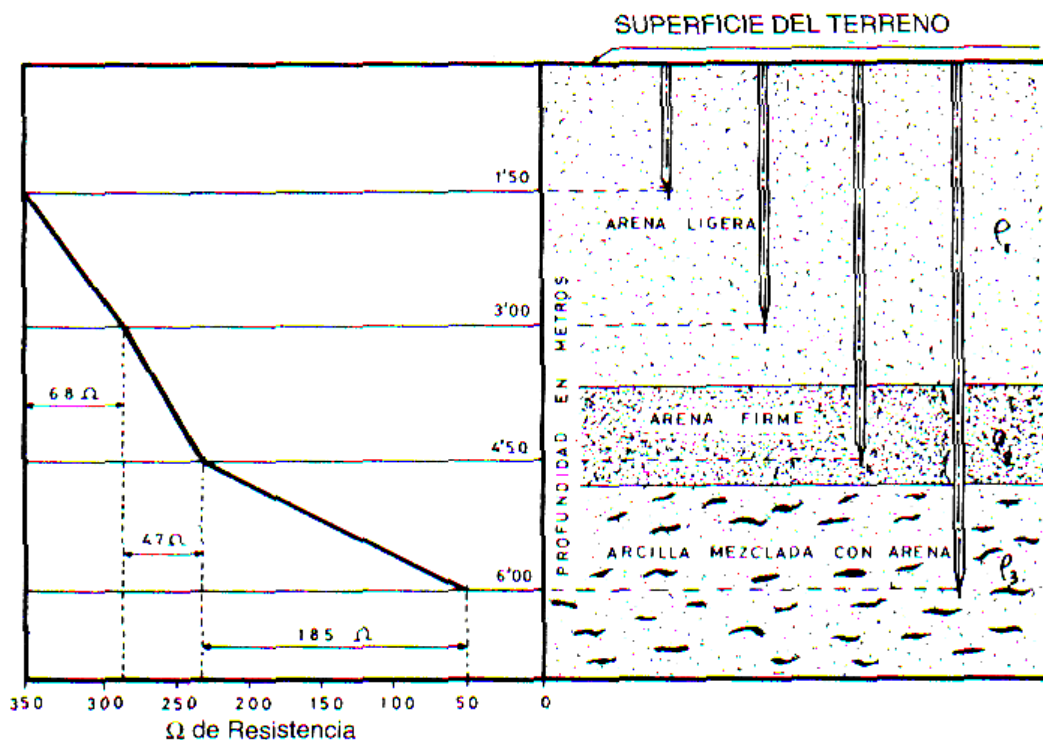


Figura 2.6. Resistencia a tierra según su estratigrafía y profundidad.



Cuando se desconoce la resistividad de las capas inferiores, obliga al estudio y medición de las mismas si se necesita conocer el valor de la toma a tierra a una profundidad determinada. En ningún caso se puede extrapolar el resultado de la capa superficial pues la variación de la composición del terreno puede darnos sorpresas significativas.

Si las instalaciones y el terreno lo permiten, debemos aconsejar la instalación de electrodos en profundidad. Así si el terreno es malo o el número de picas por instalar es grande o lo accidentado del terreno no lo permite, se colocarán en paralelo pero sabiendo la incertidumbre y el riesgo que esta decisión supone.

#### 2.2.1.6. Variaciones estacionales y del medio ambiente <sup>R2</sup>

En épocas de lluvias el nivel freático se aproxima a la superficie del terreno, presentando éste una resistividad menor que en el periodo de sequía, en el que el nivel freático se aleja en profundidad de la superficie.

Para conseguir mantener el valor de la resistividad lo más uniformemente posible a lo largo del año, es conveniente instalar profundamente los electrodos en el terreno y proteger lo más posible el suelo de las inclemencias del tiempo.

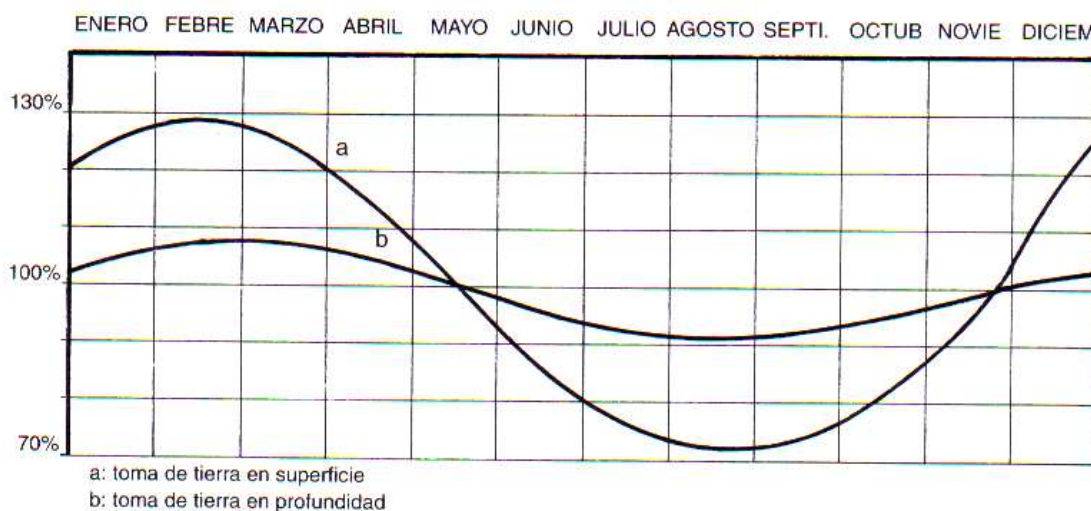


Figura 2.7. Variación de la resistividad del terreno a lo largo del año.

En verano la resistividad es mayor que en invierno, además los electrodos enterrados a más profundidad tienen una variación estacional inferior a la de los electrodos enterrados superficialmente.

A medida que enterramos más los electrodos o los coloquemos debajo de las cimentaciones de la instalación, tendremos más garantías de mantener estable el valor de la resistividad.

#### **2.2.1.7. Factores de naturaleza eléctrica**

Estos parámetros pueden modificar la resistividad de un terreno; los más significativos son el gradiente de potencial, la magnitud de la corriente de defecto a tierra y el deterioro significativo de los electrodos o del conjunto de la puesta a tierra en general.

##### *2.2.1.7.1. Gradiente de potencial*

Afecta al terreno cuando alcanza un valor crítico, de algunos kV/cm, lo que puede originar la formación de pequeñas áreas eléctricas en el suelo que hacen que el electrodo se comporte como si fuera de mayor tamaño.

##### *2.2.1.7.2. Magnitud de la corriente de defecto 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 alrededor de los conductores enterrados que provoquen la evaporación del agua.

##### *2.2.1.7.3. Deterioro de los electrodos o del conjunto de puesta a tierra*

Esto se da en el caso de un cortocircuito franco o la caída de un rayo que se canalice a través de la puesta a tierra de la instalación; en estos casos es reglamentaria la comprobación de la red de tierra del lugar ya que puede llegar a

deteriorarse o a fundirse si la intensidad es muy elevada (cientos o miles de amperios).

### 2.2.1.8. Factores de naturaleza química <sup>R3</sup>

#### 2.2.1.8.1. Efecto del PH

La naturaleza del suelo no sólo depende de la composición de la roca original, sino de otros factores tales como presencia de materia orgánica, abonos químicos, contaminación industrial o doméstica, etc., con lo cual las características primitivas de un suelo pueden cambiar extraordinariamente.

En muchos casos su presencia condiciona una alta corrosividad, como por ejemplo un suelo pantanoso, ácido, con mucha materia orgánica, o bien suelos muy alcalinos que atacan metales como Zn, Al, Pb. Por todo ello, la medida del pH del suelo también proporciona un criterio de selección de su agresividad. La Tabla 2.3. indica la relación entre el pH y la corrosividad.

**Tabla 2.3. Relación entre el pH y la corrosividad.**

pH	Medio	Corrosividad	Protección catódica
< 4.0	Ácido muy fuerte	Muy agresivo	Sí
4.0 – 4.5	Muy ácido	Muy agresivo	Sí
4.5 – 5.0	Ácido	Muy agresivo	Sí
5.0 – 6.0	Moderadamente ácido	Muy agresivo	Sí
6.0 – 6.5	Poco ácido	Agresivo	Sí
6.5 – 7.5	Neutro	No agresivo	Depende
7.5 – 8.5	Poco alcalino	No agresivo	Depende
> 8.5	Muy alcalino	Condicionado	Depende

Para valores de potencial hidrógeno menor a 6.5 es recomendable realizar la protección catódica para evitar la corrosión del sistema de puesta a tierra.

<sup>R3</sup> <http://www.procainsa.com/noticias/iberia-actualidad> (La corrosión)

La protección catódica y la corrosión se detallan minuciosamente en el apartado [2.5.].

#### 2.2.1.8.2. *Potencial red-ox*

El potencial de oxidación-reducción «red-ox» de un suelo ha servido para predecir el riesgo de corrosión anaerobia que puede sufrir una estructura enterrada y especialmente para los casos de corrosión bacteriana, pero no para dictaminar sobre otros tipos de corrosión.

A continuación se indican los valores de potencial red-ox en función del posible riesgo de corrosión anaerobia del suelo.

**Tabla 2.4. Relación entre el potencial red-ox y la corrosividad.**

Potencial red-ox	Corrosividad	Protección catódica
< 100 mV	Muy agresivo	Sí
100 – 200 mV	Moderadamente agresivo	Sí
200 – 400 mv	Débilmente agresivo	Sí
> 400 mV	No agresivo	Depende

Los suelos que requieran la instalación de protección catódica, son aquellos cuyo potencial red-ox inferiores a 400 mV.

#### 2.2.1.9. **Compactación**<sup>R2</sup>

Siempre que se coloquen electrodos de pica, de placa y de conductor enterrado; la vibración de la máquina de penetración dejará una separación entre la pica y el terreno por lo que habrá que compactar para tener un buen contacto pica-terreno. Entonces cuando la compactación del terreno es grande la resistividad disminuye. Por ello, se procurará siempre colocar los electrodos en los terrenos más compactos posibles.

## **2.2.2. COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DEL SUELO<sup>R2</sup>**

Los suelos tienen conformación estratificada, con capas superpuestas de características conductivas propias, que obedecen a los procesos de meteorización, transporte y acumulación de productos sólidos a través de las edades Geológicas; cuando son planos son gruesos y laminares (Litoral Costero, Selva Baja), y cuando son accidentados son delgados e irregulares (Sierra, Selva Alta).

### **2.2.2.1. Características de los suelos<sup>R2</sup>**

Su composición es diversa y compleja según el sitio, la cobertura superficial limítrofe con la atmósfera, contiene y/o favorece formas de vida. Entre más de 90 elementos caracterizados, predominan 8, de los cuales el oxígeno (O<sub>2</sub>) con el silicio (Si) y el aluminio (Al) en forma de óxidos hidratados, constituyen entre el 70% al 80% de la masa total, seguida de óxidos de hierro (Fe) y magnesio (Mg) y compuestos de calcio (Ca), sodio (Na) y potasio (K), y otros en forma de pequeños porcentajes de sales solubles (entre 0.05% y 2.0%), con promedios de humedad pequeños (<1%) en suelos secos y hasta grandes (>15%) en suelos arcillosos húmedos.

### **2.2.2.2. La conducción eléctrica del suelo<sup>R2</sup>**

Normalmente, los suelos no son buenos conductores de la electricidad, sin embargo, la dispersión de la corriente permite una capacidad de conducción aceptable que también es de naturaleza electrolítica y/o electroquímica, y depende principalmente de la porosidad del material, que contiene la humedad y las sales solubles, y acompaña en menor o mayor grado a otras características como la granulometría, la compactación y la temperatura que controlan su conductividad, especialmente tratándose de los estratos superficiales donde las corrientes por encima de 10 A, ocasionan su desecamiento por Efecto Joule y el incremento local de la resistividad.

La evaluación eléctrica de los suelos, se hace en base a medidas de resistividad; al respecto la información geológica propone tablas genéricas con rangos referenciales, tanto para suelos (Tabla 2.1.) como para las aguas que los recargan (Tabla 2.5.); de otro lado, disponiendo de una muestra «representativa», también se hacen medidas de laboratorio, en ambos casos los datos obtenidos no siempre son correctos; adicionalmente, también se suele disponer de datos en (ms/cm) para la conductividad de las aguas y de los suelos; en éste último caso dicho parámetro corresponde a una solución de 20 g de muestra disuelta en 100 cm<sup>3</sup> de agua destilada y no al suelo natural.

De esta manera, solo es segura la medida de campo, con todas las previsiones que permitan mínimos errores, ya sea considerando los rangos de resistividades del terreno o del tipo de agua que lo recubra, dados por las tablas mencionadas o por muestras experimentales.

**Tabla 2.5. Resistividades referenciales de aguas naturales genéricas.**

<b>TIPO O CARACTERÍSTICA DEL AGUA</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega</math>.m)</b>
Meteóricas (lluvia atmósfera limpia)	800 - 1200
Meteóricas (lluvia atmósfera industrial)	30 - 400
Superficiales puras (filtraciones del suelo)	>> 3000
Superficiales salubres (mar y minerales)	>> 0.1
De anomalías geotérmicas	0.03 - 0.3
Aluviones con agua dulce	20 - 200
Aluviones con agua salada	1 - 5
Aluviones casi secos	50 - 100
Estancadas	30 - 150
Filtraciones rocosas	30 - 1000

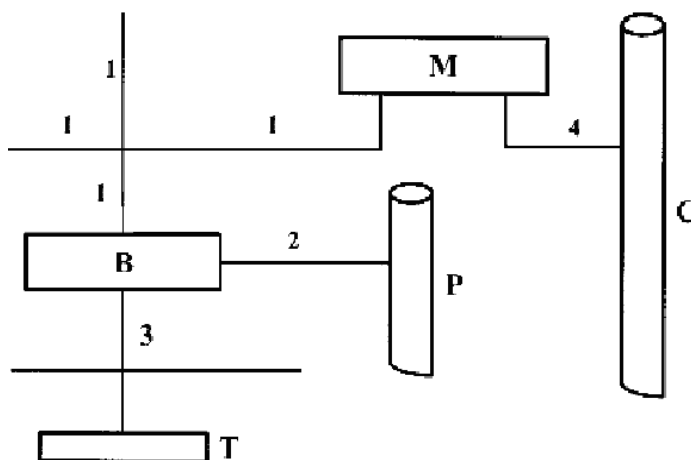
En la Tabla 2.5. se indican los valores genéricos de resistividad eléctrica para distintas clases de aguas.

## 2.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA <sup>R4</sup>

### 2.3.1. INTRODUCCIÓN

Los procedimientos para diseñar sistemas de tierras se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja. Los conceptos son ciencia, pero la aplicación correcta es un arte, ya que cada instalación es única en su localización, tipo de suelo, y equipos a proteger.

Se puede invertir tanto dinero como se desee en un sistema de tierras, por ello se plantearán en los siguientes capítulos los puntos a observar en un diseño básico. Con estas direcciones se resolverán la mayoría de los problemas, pero en los casos complejos, es preferible consultar la bibliografía proporcionada.



#### Leyenda

- 1 Conductor de protección.
- 2 Conductor de unión equipotencial principal.
- 3 Conductor de tierra o línea de enlace con el electrodo de puesta a tierra.
- 4 Conductor de equipotencialidad suplementaria.
- B Borne principal de tierra o punto de puesta a tierra.
- M Masa.
- C Elemento conductor.
- P Canalización metálica principal de agua.
- T Toma de tierra.

Figura 2.8. Representación esquemática de un circuito de puesta a tierra.

<sup>R4</sup> <http://www.ruelsa.com/notas/tierras.html>

### 2.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA <sup>R4</sup>

Para su estudio apropiado los sistemas de puesta a tierra se clasifican según su aplicación en:

- Puesta a tierra de los sistemas eléctricos.
- Puesta a tierra de los equipos eléctricos.
- Puesta a tierra en señales electrónicas.
- Puesta a tierra de equipos electrónicos.
- Puesta a tierra de protección atmosférica.
- Puesta a tierra de protección electrostática.

#### 2.3.2.1. Puesta a tierra de los sistemas eléctricos <sup>R4</sup>

El propósito de aterrizar los sistemas eléctricos es para limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de rayos, fenómenos de inducción o, de contactos no intencionales con cables de voltajes más altos.

Se logra uniendo mediante un conductor apropiado a la *corriente de falla a tierra* total del sistema, una parte del sistema eléctrico al planeta tierra.

##### 2.3.2.1.1. *Sistemas de alambrados que requieren conexión a tierra*

###### a) **Sistemas eléctricos derivados en c.a.**

Cuando el voltaje a tierra esté entre 50 y 150 V. (Sistema derivado).

###### b) **Sistemas de c.a. de menos de 50 V**

Si están alimentados por transformadores de sistemas a más de 150 V a tierra o de sistemas no aterrizados.



2.3.2.1.2. *Sistemas de alambrados en c.a. que pueden no ser aterrizados sólidamente*

**a) 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 de menos de 1000V, siempre que todas las condiciones adicionales siguientes se cumplan:
  - El sistema solamente se use en control.
  - Que solamente personal calificado tenga acceso a la instalación.
  - Que se tengan detectores de tierra en el sistema de control.
  - Que se requiera continuidad del servicio.
  - Sistemas aislados en hospitales y en galvanoplastia.
- d. 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. tres fases de 480 a 1000 V, donde las siguientes condiciones se cumplen:
  - 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 la práctica, los sistemas industriales en media tensión son normalmente aterrizados mediante una resistencia de valor bajo. Eso es, típicamente se conecta una resistencia en el neutro del transformador, soportando una corriente máxima de falla de 400 A, que no es muy dañina a los equipos, pero requiere relevadores/detectores de falla a tierra rápidos.

### 2.3.2.1.3. *Conductor a aterrizar*

En los siguientes sistemas de 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 hilo común a todas las fases: El conductor común.
- d. Sistemas polifásicos que tiene una fase aterrizada: Este conductor.
- e. Sistemas polifásicos en general: Solo puede estar aterrizado el conductor común o cuando no lo hay, una fase.

### 2.3.2.1.4. *Lugar de puesta a tierra del sistema*

#### **a) Sistemas en c.c.**

La tierra debe estar en la estación 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) Sistemas en 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.

También, 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.

Este conductor de puesta a tierra del sistema no debe ser menor al requerido por las normas de la IEEE [R15] y [R16], 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.

#### 2.3.2.1.5. *En un sistema derivado separado*

Una conexión del neutro a la carcasa se requiere en los sistemas derivados separados, tales como los que cuentan con transformadores o con generadores localizados en edificios. Esto se logra conectando la terminal del neutro del sistema derivado al sistema de tierra. En los transformadores, instalando un puente de unión de la terminal Xo (neutro) del transformador a la carcasa del mismo, o al lado de carga del gabinete del centro de cargas.

#### 2.3.2.2. **Puesta a tierra de los equipos eléctricos**<sup>R4</sup>

Su propósito es eliminar los potenciales de toque que pudieran poner en peligro la vida y las propiedades y, para que operen las protecciones por sobrecorriente de los equipos. Los sistemas de puesta a tierra de equipos, por su importancia como medio de protección están muy normalizados a nivel mundial.

Se logra conectando al punto de conexión del sistema eléctrico con el planeta tierra, todas las partes metálicas que pueden llegar a energizarse, mediante conductor apropiado a la *corriente de corto circuito* del propio sistema en el punto en cuestión.

##### 2.3.2.2.1. *Equipos y canalizaciones que deben estar puestos a tierra*

#### a) **Canalizaciones metálicas.**

Deben estar aterrizadas, en general, todas las canalizaciones metálicas.

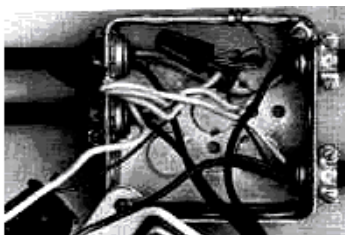


Figura 2.9. Cajetín metálico puesto a tierra.

### **b) Equipo fijo en general**

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

- 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.
- Si el equipo está en un lugar húmedo y no está aislado, o está en contacto con partes metálicas.
- Si el equipo está en un lugar peligroso o, donde el equipo eléctrico es alimentado por cables con cubierta metálica.
- Si el equipo opera con algún borne a más de 150 V a tierra, excepto en:
  - I. Cubiertas de Interruptores automáticos que no sean el interruptor principal y, que sean accesibles a personas calificadas únicamente.
  - II. Estructuras metálicas de aparatos calentadores, exentos mediante permiso especial y si están permanentemente y efectivamente aisladas de tierra.
  - III. Carcazas de transformadores y capacitores de distribución montados en postes de madera a una altura mayor de 2.4 m sobre nivel del piso.
  - IV. Equipos protegidos por doble aislamiento y marcados de esa manera.

### **c) Equipo fijo específico**

Todas las partes metálicas no conductoras de corriente de las siguientes clases de equipos, no importando voltajes, deben ser puestas a tierra, mediante los conductores respectivos.

- Armazones de Motores.
- Gabinetes de controles de motores, excepto los que van unidos a equipos portátiles no aterrizados.

- Equipos eléctricos de elevadores y grúas.
- Equipos eléctricos en talleres mecánicos automotrices, teatros, y estudios de cine, excepto luminarias colgantes en circuitos de no más de 150 V a tierra.
- Equipos de proyección de cine.
- Luminarias, anuncios luminosos y equipos asociados.
- Generador y motores en órganos eléctricos.
- Armazones de tableros de distribución y estructuras de soporte, exceptuando las estructuras de tableros de corriente directa aislados efectivamente.
- Equipo alimentado por circuitos de control remoto de clase 1, 2 y 3 y circuitos de sistemas contra incendios cuando se requiera su aterrizado.
- Bombas de agua, incluyendo las de motor sumergible.
- Capacitores.
- Ademes metálicos de pozos con bomba sumergible.

#### **d) Equipos no eléctricos**

Las siguientes partes metálicas de equipos no eléctricos serán puestas a tierra:

- Estructuras y vías de grúas operadas eléctricamente.
- La estructura metálica de elevadores movidos no eléctricamente, a las que están sujetos conductores eléctricos.
- Los cables de acero de los elevadores eléctricos.
- Partes metálicas de subestaciones de voltajes de más de 1 kV entre conductores.
- Casas móviles y vehículos de recreo.

#### **e) Equipos conectados por cordón y clavija**

Exceptuando los aparatos doblemente 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 en:

- En lugares clasificados peligrosos.
- Cuando operan esos equipos a más de 150 V a tierra.
- En casas habitación: refrigeradores, congeladores y, aires acondicionados. Lavadoras de ropa, secadoras, lavaplatos, y equipos eléctricos de acuarios. Herramientas manuales eléctricas y lámparas portátiles de mano.
- En otros lugares, no residenciales: refrigeradores, congeladores, y aire acondicionado. Lavadoras, secadoras y máquinas lavaplatos, computadoras, y equipos eléctricos de acuarios. Herramientas manuales portátiles. Aparatos motorizados como: podadoras y limpiadoras de pisos. Herramientas de ambientes húmedos o mojados o por personas que trabajan dentro de tanques metálicos y lámparas portátiles de mano.

#### **f) Instalaciones Provisionales**

Los requisitos mencionados arriba también deben cumplirse para todas las instalaciones provisionales.

#### **g) Líneas**

Se debe poner a tierra 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 45 m.

Las estructuras metálicas, incluyendo postes de alumbrado, las canalizaciones metálicas, los marcos, tanques y soportes del equipo de líneas.

##### *2.3.2.2.2. 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:

- Mediante un contacto "polarizado".
- Mediante una conexión fija del cordón a un conductor de puesta a tierra.
- Mediante un cable o trenza conductora, aislada o desnuda, protegida contra daño mecánico.

#### *2.3.2.2.3. Partes metálicas de equipos fijos consideradas aterrizadas*

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

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

#### *2.3.2.2.4. Continuidad eléctrica del circuito de tierra*

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

- Puente de unión al conductor de tierra.
- Mediante conexiones roscadas en tubería rígida y eléctrica (EMT).
- Mediante conectores no roscados que se usan como accesorios de la tubería rígida y la eléctrica (EMT).
- Mediante puentes de unión a gabinetes.

#### *2.3.2.2.5. Circuitos que no se deben aterrizar*

Los circuitos de grúas eléctricas operando en lugares con presencia de fibras combustibles y los circuitos aislados propios de quirófanos de hospitales.

#### 2.3.2.2.6. Consideraciones para un buen diseño de puesta a tierra de equipos eléctricos.

Un sistema de puesta a tierra bien diseñado, considera:

- Emplear las tuberías metálicas roscadas como conductores de puesta a tierra.
- Usar los interruptores automáticos con detector de falla a tierra en las cocheras, cocinas, y obras en construcción.
- Colocar el conductor de puesta a tierra de equipos junto con los cables de líneas y del neutro del mismo circuito, por dentro de la misma canalización metálica.
- Que no obstante se corran cables en paralelo por diferentes canalizaciones, el calibre de todos los cables de puesta a tierra se calcule únicamente con el valor de la protección.

#### 2.3.2.3. Puesta a tierra en señales electrónicas<sup>R4</sup>

Para evitar la contaminación con señales en frecuencias diferentes a la deseada. Se logra mediante *blindajes* de todo tipo conectados a una referencia cero, que puede ser el planeta tierra.

##### 2.3.2.3.1. Transitorios

La causa mayor de fallas de los componentes electrónicos de los puertos de interconexión de datos, y los de control en bajo voltaje, es el sobreesfuerzo eléctrico que usualmente se origina en los *transitorios* causados por: (1) las descargas atmosféricas; (2) por las maniobras de interrupción de cargas inductivas, o; (3) por descargas electrostáticas.

Este sobreesfuerzo es causado por voltajes de una magnitud de decenas de voltios a varios miles de voltios y, con duración de unas decenas de nanosegundos a unas centenas de microsegundos. Los que se conocen normalmente como «picos de voltaje».



Ningún cable enterrado, ni siquiera de potencia, es inmune a los transitorios provocados por los rayos. Los transitorios se eliminan mediante componentes conectados a la tierra del sistema.

Las corrientes provocadas por las descargas atmosféricas prefieren viajar por conductores metálicos más que por la simple tierra, porque representan un camino de menor impedancia. Esto destruye el aislamiento. Además causan una diferencia de potencial entre el blindaje y los conductores internos, que puede destruir componentes electrónicos en la interconexión, ya que los cables y sus circuitos de conexión deben soportar los voltajes máximos que se puedan obtener entre los extremos de los cables.

Cuando es muy grave el problema por estar interconectando los cables dos sistemas de tierra diferentes, como en el caso de un sistema de control distribuido, los conductores se prefieren del tipo de fibra óptica. Otra solución utilizada es el interconectar los distintos sistemas de tierra de una industria o edificio mediante conexiones a una red de tierra perimetral adicional, para lograr el mismo potencial a tierra en cualquier lado.

#### *2.3.2.3.2. Interferencias causadas por armónicas*

Las armónicas se generan en fuentes de poder de tipo conmutada de computadoras, y en los variadores de frecuencia, entre otros lugares. Su efecto en los equipos electrónicos se mitiga incrementando calibres de conductores, cambiando el diseño y configuración del transformador de alimentación, y usando filtros activos.

Los filtros pasivos compuestos de capacitores e inductores no son generalmente efectivos (excepto como protección de bancos de capacitores) porque la frecuencia de corte del filtro tiene que ser muy cercana a la fundamental, lo que es prácticamente imposible de diseñar en un filtro de este tipo.

#### 2.3.2.3.3. *Interferencia en radiofrecuencia*

La interferencia por radiofrecuencia, RFI por sus siglas en inglés, es causada principalmente por transmisiones radiales. Sin embargo, este tipo de interferencia también es producida por los componentes electrónicos trabajando a altas frecuencias.

En los equipos electrónicos su efecto se minimiza con un buen blindaje en cables y en los mismos equipos. Aunque, la mejor manera de acabar con la RFI es blindar el ruido directamente en su fuente. Los blindajes mencionados para ser efectivos se deben conectar a la tierra del sistema.

#### 2.3.2.3.4. *Interferencia electromagnética*

Este tipo de interferencia, conocido por sus siglas en inglés EMI, es ruido eléctrico que se convierte en un voltaje en un sistema eléctrico. Sus fuentes son las mismas que generan la interferencia en radiofrecuencia.

Este tipo de interferencia en los equipos electrónicos se corrige conectando todo a una única puesta a tierra del sistema.

En resumen, los efectos en los equipos electrónicos de los transitorios y de gran parte de los tipos de interferencias se eliminan mediante la conexión adecuada de los componentes a una referencia de tierra.

#### 2.3.2.3.5. *Protectores de cables de instrumentación y de comunicaciones*

Para controlar las descargas y los fenómenos transitorios, se añaden dispositivos de protección a los cables que conectan entre sí los equipos de computación, instrumentación y de comunicaciones.

Estos dispositivos desvían la corriente, bloquean la energía que viaja por los conductores, filtran ciertas frecuencias, regulan voltajes o, realizan una combinación de todas estas tareas.

Los protectores funcionan mejor, siempre y cuando se coloquen muy cercanamente al sistema a proteger, pues tanto los protectores como el equipo protegido permanecen al mismo potencial bajo condiciones de transitorios.

Como familias de protectores tenemos:

- Válvulas de gas;
- Filtros; y
- Semiconductores.

#### **a) Válvulas de gas.**

Estos dispositivos se construyen de tal manera que la trayectoria de la descarga sea de baja impedancia una vez que se sobrepase el nivel máximo de voltaje. Un ejemplo son las lámparas de neón.

Esta es la clase de protección más lenta pero la que puede manejar más energía al menor costo. Los protectores telefónicos son de esta clase.

#### **b) Filtros**

Los filtros comunes contienen elementos pasivos, capacitores e inductores, en configuración pasa-baja. Muchos equipos de comunicaciones (faxes, módems, etc.) tienen este tipo de protección en la conexión de potencia, en forma de una ferrita. Y, con ella protegen el aparato de ruido eléctrico de alta frecuencia.

#### **c) Semiconductores**

Los dispositivos semiconductores son los arreglos más sofisticados. Son más rápidos y baratos pero generalmente manejan menos energía que otras

alternativas de igual precio. Y debido a su rango limitado de operación y características, estos dispositivos deben especificarse más precisamente. Nota: Existen dispositivos electrónicos para proteger por corriente o por voltaje.

Las resistencias no lineales compuestas de óxidos de zinc en una matriz de óxido de bismuto, llamados varistores, funcionan por voltaje y se manufacturan para manejar un máximo de energía en julios o en vatios-segundos. El dispositivo se selecciona para operar a un voltaje ligeramente mayor que el máximo esperado de la fuente de voltaje. Cada varistor de óxido metálico tiene una capacitancia inherente, lo cual crea algunos problemas en señales de altas frecuencias (> 135 MHz). Además, un varistor se degrada con el tiempo en operación.

La protección con varistores es la más empleada actualmente, tanto en las conexiones de fuerza como en las de los puertos de comunicaciones. Su desventaja es que cuando se dañan por una descarga, los equipos quedan desprotegidos porque fallan siempre abriendo el circuito de descarga.

Los diodos tipo Zener o, avalancha son dispositivos más rápidos que los varistores pero no pueden manejar tanta energía como los últimos. Y, ya que no pueden disipar energía, se les usa en ocasiones junto con válvulas con gas, donde el diodo dispara primero y la gran energía se disipa en la válvula de gas.

La efectividad de estos dispositivos depende de la longitud de la conexión a tierra (al chasis). La más corta es la mejor. Además, se debe tener precaución en no unir los cables de entrada junto a los de salida del protector, por existir la posibilidad de un acoplamiento inductivo entre ellos.

#### *2.3.2.3.6. Modos de protección*

El modo de protección depende de la conexión al circuito a proteger. Unidades de protección de «modo diferencial» se conectan entre líneas y, los de «modo común», entre los hilos de señal y tierra.

Como mínimo, un protector en «modo común» se debe colocar en cada extremo del conductor.

Para cancelar el ruido inducido en «modo diferencial» en líneas de instrumentación como en redes de comunicaciones se usan pares trenzados. Así, el ruido se induce igualmente en ambos conductores cancelando el efecto.

Como los transitorios también son una forma de ruido, también se inducen en los conductores. Cables multiconductores acoplan la energía del transitorio a todos los pares de conductores del cable. Y como la energía inducida es la misma, siendo un par o muchos, se disipa más energía en un arreglo multiconductor.

Cuando existen más de 6 pares, se emplean protectores conectados en derivación y, cuando son menos, en serie, por ser mayor la energía presente por par. Los protectores en serie consisten de filtros como también de supresores en derivación. Todos los pares que no se usen de un cable multiconductor deben ser conectados a tierra y así, la energía inducida en ellos, pasará directamente a tierra.

#### *2.3.2.3.7. Protección de PLCs*

Para proteger Controladores Lógicos Programables (PLCs por sus siglas en inglés), la protección estándar dada por varistores en derivación es suficiente. Siempre y cuando no existan cables con señales que provengan de lugares fuera del sistema de tierras al que está conectado el PLC.

Cuando se tienen señales provenientes de fuera del sistema de puesta a tierra del PLC, se emplean protectores con aislamiento galvánico. Dichos protectores aíslan eléctricamente la señal que no tiene la misma referencia de tierra.

Debido a los requisitos de la puesta a tierra de los equipos eléctricos y debido a la presencia de tuberías metálicas en una planta industrial, es imposible aislar galvánicamente todas las trayectorias de tierra, y esto puede crear lazos de

corriente en equipos electrónicos con resultados nefastos. Si éste es el caso, es probable que uniendo las redes de tierras por medio de una red perimetral, y empleando protectores sin separación galvánica, y dejando la pantalla sin conectar en un extremo, se resuelva el problema. La otra solución, es por el momento, la que sugieren los fabricantes de equipos de controles distribuidos y comunicaciones: emplear cables de fibra óptica del tipo sin pantalla metálica.

#### **2.3.2.4. Puesta a tierra de equipos electrónicos<sup>R4</sup>**

Para evitar la destrucción de los elementos semiconductores por voltaje, se colocan *dispositivos de protección* conectados entre los conductores activos y la referencia cero, que puede ser el planeta tierra.

Existen cuatro esquemas de aterrizado de equipos electrónicos. Estos son:

- El convencional.
- El esquema de tierra aislada.
- Esquema de tierra aislada total.
- Esquema de malla de referencia.

##### *2.3.2.4.1. Esquema convencional*

Este esquema encuentra su uso en las instalaciones de PCs donde únicamente existe alumbrado y algún otro equipo eléctrico, tal como en los pequeños comercios o en las viviendas. Pero, no es recomendado para las instalaciones comerciales, educativas o industriales, porque:

- Puede resultar excesivamente ruidoso el sistema de tierras.
- Los transitorios pueden sobrepasar el nivel de aislamiento. No es compatible con las recomendaciones de puesta a tierra de la mayoría de los fabricantes de equipos electrónicos.
- El alambrado puede resultar obsoleto cuando se cambien las tarjetas y equipos por otros de una tecnología de mayor velocidad.

#### 2.3.2.4.2. Esquema de tierra aislada<sup>R5</sup>

Este esquema es el más socorrido en la industria, y por la mayoría de los proveedores de equipos electrónicos, porque reduce el ruido de modo común. En él, la puesta a tierra del equipo es separada de la puesta a tierra de las canalizaciones, así cualquier corriente espuria no afecta a los equipos así conectados.

El ruido de modo común es toda señal no deseada que aparece en todos los conductores de señal al mismo tiempo con respecto a la tierra.

El tipo de receptáculo (contacto) para este esquema es diferente, y, tiene un triángulo de color naranja pintado en la placa para diferenciarlo de los receptáculos normales.

La frase «tierra aislada» ha sido interpretada equivocadamente como de una tierra separada, provocando en caso de falla precisamente un voltaje a tierra inseguro para las personas y para los equipos.

En esta configuración se tiene una conexión a tierra relativamente libre de ruido e interferencia para la referencia lógica de los aparatos y, es complementada con la tierra de seguridad convencional del sistema de tierras de potencia. Pero, tiene las siguientes limitaciones:

- En altas frecuencias, la impedancia del conductor de tierra puede ser demasiado alta para servir de buena conexión.
- El acoplamiento no intencional de los dos sistemas de tierras (aislado y de puesta a tierra de las canalizaciones) dentro de los aparatos o en sus conexiones a cables blindados, puede causar lazos de corriente, resultando en ruidos electrónicos que inutilizan el sistema aislado. Un ejemplo de ese caso, es cuando la impresora está conectada al sistema de tierra normal, y la computadora al sistema de tierra aislado.

---

<sup>R5</sup> <http://www.liebert.com/tierras-aisladas.html>

#### 2.3.2.4.3. Esquema de tierra aislada total<sup>R5</sup>

Este esquema consiste en conectar todas las computadoras, los aparatos e instrumentos a tierra usando una configuración de estrella a partir de un solo punto físico, el cual es un cabezal o placa de conexión, el o la cual a su vez está conectada mediante un conductor apropiado a la red general de tierras.

Esta configuración es utilizada en los transmisores de comunicaciones (radiodifusión, sitios celulares, etc.), donde es posible tener un mismo punto de puesta a tierra para todos los equipos y para todas las pantallas de los cables. Sin embargo, también tiene sus limitaciones:

- Esta configuración puede ser difícil de crear en un ambiente industrial.
- Todos los equipos cercanos deben conectarse de esta manera a tierra o, se pueden tener lazos de corrientes.
- Puede tener una impedancia en alta frecuencia muy alta, que en términos prácticos, la puesta a tierra sea ineficaz. Este problema es posible que no se tenga en la mayoría de equipos industriales, porque no emplean muy altas frecuencias.

#### 2.3.2.4.4. Esquema de malla de referencia<sup>R5</sup>

Los equipos y partes metálicas estructurales se conectan a este tipo de piso falso mediante trencillas, y que al ofrecer un plano de referencia de tierra, baja la impedancia a tierra en todas las frecuencias. En el mercado se conoce dicha malla como *Signal Reference Grid (SRG)*.

Sus limitantes son:

- Muchos fabricantes de equipos electrónicos industriales no están de acuerdo con su empleo.
- En ambientes industriales, es difícil su implementación.



#### 2.3.2.4.5. Inferencias finales<sup>R5</sup>

No importa cual de los tres últimos métodos se emplee para la puesta a tierra de los equipos electrónicos, la trayectoria de los cables es crucial. Siempre conecte a tierra cada aparato por separado.

El aterrizado de blindajes y el de cables de señal también deben ser parte integral del diseño de sistemas de tierras.

#### 2.3.2.5. Puesta a tierra de protección atmosférica<sup>R4</sup>

Sirve para canalizar la energía de los rayos a tierra sin mayores daños a personas y propiedades. Se logra con una *mallá metálica* igualadora de potencial conectada al planeta tierra que cubre los equipos o edificios a proteger.

Las descargas atmosféricas pueden causar grandes diferencias de potencial en sistemas eléctricos distribuidos fuera de edificios o de estructuras protegidas. A consecuencia de ello, pueden circular grandes corrientes en las canalizaciones metálicas, y entre conductores que conectan dos zonas aisladas.

Pero, aún sin la descarga, una nube cargada electrostáticamente crea diferencias de potencial en la tierra directamente debajo de ella. El campo eléctrico debajo de una nube de tormenta es generalmente considerado entre 10 y 30 kV/m. Es importante, comparar estos valores con el de 1.5 kV/m con el que las puntas empiezan a emitir iones.

Una nube de tormenta promedio podría contener unos 140 MWh de energía con voltajes hasta de 100 MV, con una carga en movimiento intranube de unos 40 coulombios. Esta energía es la que se disipa mediante los rayos, con corrientes pico que van de unos cuantos kA a unos 200 kA con un percentil (50) de 20 kA.<sup>R6</sup>

---

<sup>R6</sup> R.B. Bent. Lightning and the hazards it produces for explosive facilities

#### 2.3.2.5.1. *Sistemas de pararrayos*<sup>R7</sup>

Los rayos ocurren con diferentes intensidades y un sistema que proteja contra su efecto deberá ser diseñado tomando en cuenta los rayos promedio o mayores del área en cuestión. Las descargas no pueden ser detenidas, pero la energía puede ser desviada en una forma controlada. El intentar proteger contra descargas directas puede ser excesivamente caro.

Un sistema de protección contra descargas, llamado de pararrayos, debe:

- Capturar el rayo en el punto diseñado para tal propósito llamado terminal aérea.
- Conducir la energía de la descarga a tierra, mediante un sistema de cables conductores que transfiera la energía de la descarga mediante trayectorias de baja impedancia, y;
- Disipar la energía en un sistema de terminales (electrodos) en tierra.

Cuando la energía de un rayo viaja a través de una trayectoria de gran impedancia, el daño causado puede ser grave por el calor y las fuerzas mecánicas que se crean [R17].

Como la tierra no tiene una resistividad uniforme en todos los puntos, dentro de un mismo predio puede existir un potencial entre dos placas de metal enterradas. Por eso, en un sistema de electrodos múltiples conectados entre sí, a manera de malla, existe la probabilidad de que exista una diferencia de potencial entre algunos de sus puntos aterrizados.

#### 2.3.2.5.2. *Zonas de protección*

Los equipos y estructuras son clasificados según su necesidad de protección contra descargas atmosféricas de acuerdo a la norma ANSI/NFPA 78-1989 [R18].

---

<sup>R7</sup> M.O. Durham. Submersible power supply considerations. Electric Submersible Pump Workshop.

PRIMERA CLASE.- Las estructuras de esta clase, requieren de poca o ninguna protección. El requisito es que verdaderamente estén conectados a tierra. Ejemplos de esta clase son:

- Todas las estructuras metálicas excepto tanques u otras estructuras que contengan materiales inflamables.
- Tanques de agua, silos y estructuras similares, construidas mayormente de metal.
- Astas bandera construidas de algún material conductor.

SEGUNDA CLASE.- Esta clase consiste de edificios con cubierta conductora y estructura no conductora, tal como edificios con cubierta metálica. Este tipo requiere de conductores para conectar la cubierta a electrodos en la tierra.

TERCERA CLASE.- Esta clase consiste de edificios con estructura metálica y cubierta no conductora. Este tipo requiere de terminales aéreas conectadas a la estructura y fuera de la cubierta para actuar como terminales pararrayos.

CUARTA CLASE.- Esta clase consiste de estructuras no metálicas, que requieren una protección. Se incluyen en esta clase:

- Edificios de madera, piedra, ladrillo u otros materiales no conductores, sin elementos de refuerzo metálicos.
- Chimeneas. Aún con elementos de refuerzo, éstas deben tener una gran protección contra rayos, con terminales aéreas, cables de bajada y electrodos de aterrizado.

QUINTA CLASE.- Una quinta clase consiste de aquellas cosas cuya pérdida puede ser de consecuencias, y que normalmente recibe un tratamiento pararrayos completo, incluyendo terminales aéreas, cables de bajada y electrodos de aterrizado. Entre éstas están:

- Edificios de gran valor estético, histórico o intrínseco.
- Edificios conteniendo combustibles o materiales explosivos.
- Estructuras conteniendo sustancias que pueden ser peligrosas si se derraman como consecuencia de una descarga.
- Tanques o conjuntos de tanques.
- Plantas de energía y estaciones de bombeo.
- Líneas de transmisión.
- Subestaciones eléctricas.

#### 2.3.2.6. Puesta a tierra de protección electrostática<sup>R4</sup>

Sirve para neutralizar las cargas electrostáticas producidas en los materiales dieléctricos. Se logra uniendo todas las *partes metálicas y dieléctricas*, utilizando el planeta tierra como referencia de voltaje cero.

Las cargas electrostáticas se crean en líquidos o polvos que tienen una rigidez dieléctrica elevada, y pueden llegar a ser de varios kilovoltios de magnitud.

##### 2.3.2.6.1. Medidas generales contra la electrostática

En el caso de manejo de productos en polvo a granel, se especifica conectar todas las partes metálicas entre sí, para lo cual se utilizan cables multihilos de temple suave o trenzas metálicas desnudas. Estos conductores permiten el movimiento de electrones entre las diferentes partes, y no interfieren con las lecturas de instrumentos como celdas de carga. El calibre es importante desde el punto de vista de rigidez mecánica, no de capacidad de corriente.

El sistema de uniones metálicas entre los distintos componentes puede hacerse en conjunto con el diseño del sistema de tierras de potencia, para evitar cables en paralelo, y tener siempre los calibres adecuados.

Cuando esta puesta a tierra no es suficiente para evitar la acumulación de cargas electrostáticas, en la industria se emplean los siguientes mecanismos que igualan o disminuyen la creación de potenciales de naturaleza electrostática.

- Cepillos de alambre muy delgado de bronce.
- Ionizadores de aire.

Estros tienen forma de cañón de aire, barra, barrera de aire, etc. Trabajan con una fuente de corriente continua de 5000 a 8000 V.

- Barbas metálicas en contacto con el material.
- Humidificadores.

#### *2.3.2.6.2. Protección de tanques*

Para evitar las descargas electrostáticas que pudieran poner en peligro las instalaciones en el caso del almacenaje en tanques de productos inflamables, las normas especifican la instalación de por lo menos un cable flexible con conexión al mismo sistema de tierras del tanque, con conector de tipo pinza para igualar potenciales de todos los vehículos que carguen o descarguen producto al o del tanque.

Los tanques y tuberías de fibra de vidrio o de material plástico presentan problemas serios porque estos materiales no son conductores. Sin embargo estos materiales son muy susceptibles de presentar problemas debido a la electroestática y, por ello, sus válvulas y accesorios metálicos en caso de conducir un fluido no conductor de electricidad, deben ser puestos a tierra para drenar cualquier carga. En caso de ser necesario, un electrodo suspendido dentro del tanque y conectado a la red de tierras perimetral drenará cualquier carga interna.

Es importante observar que ciertos fluidos que se descargan libremente dentro de tanques crean cargas electrostáticas grandes, por lo que lo adecuado es colocar la descarga debajo del nivel del líquido.

En el caso de tanques con recubrimiento no conductor, y donde se tiene instrumentación, se recomienda tener electrodos de instrumentación con puesta a tierra (Ground Loop Interrupt), para evitar que las cargas fluyan a través de electrodos y circuitos electrónicos causando lecturas falsas y reduciendo la vida útil de los electrodos.

### **2.3.3. EFECTOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL ORGANISMO<sup>R8</sup>**

#### **2.3.3.1. Límites de corriente tolerables por el cuerpo humano<sup>R8</sup>**

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas, debidas a disturbios atmosféricos o a fallas del equipo, obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezcan peligro a los operadores o, en general, al personal que labora en el recinto.

Intensidades del orden de miles de amperios, producen gradientes de potencial elevados en la vecindad del punto o puntos de contacto a tierra y si, además, se da la circunstancia de que algún ser viviente se apoye en dos puntos, entre los cuales existe una diferencia de potencial debida al gradiente arriba indicado, puede sufrir una descarga de tal magnitud que sobrepase el límite de su contractilidad muscular y provoque su caída. En tal situación, la corriente que circula por su cuerpo aumenta y si por desgracia ésta pasa por algún órgano vital como el corazón, puede originar fibrilación ventricular y sobrevenir la muerte.

El umbral de percepción se acepta generalmente como de aproximadamente 1 miliamperio. Si el camino de la corriente incluye la mano y el antebrazo, las contracciones musculares, el malestar y el dolor aumentan al crecer la corriente y

---

<sup>R8</sup> IEEE Std 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding.

bastan intensidades de algunos cuantos miliamperios para evitar que el sujeto pueda soltar el electrodo agarrado con la palma de la mano, que es la condición de contractilidad antes mencionada.

Se pueden tolerar intensidades de corriente superiores, sin originar fibrilación, si la duración es muy corta. La ecuación que liga los parámetros de la intensidad de corriente tolerable y el tiempo que puede tolerarla un organismo es:

$$I_c^2 \cdot t = 0.0135 \quad (2.10.)$$

De la cual, despejando la  $I_c$ , resulta:

$$I_c = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.11.)$$

En donde  $I_c$  es el valor efectivo de la corriente que circula por el cuerpo, en amperios y  $t$  es el tiempo de duración del choque eléctrico en segundos. 0.0135 es una constante de energía, derivada empíricamente.

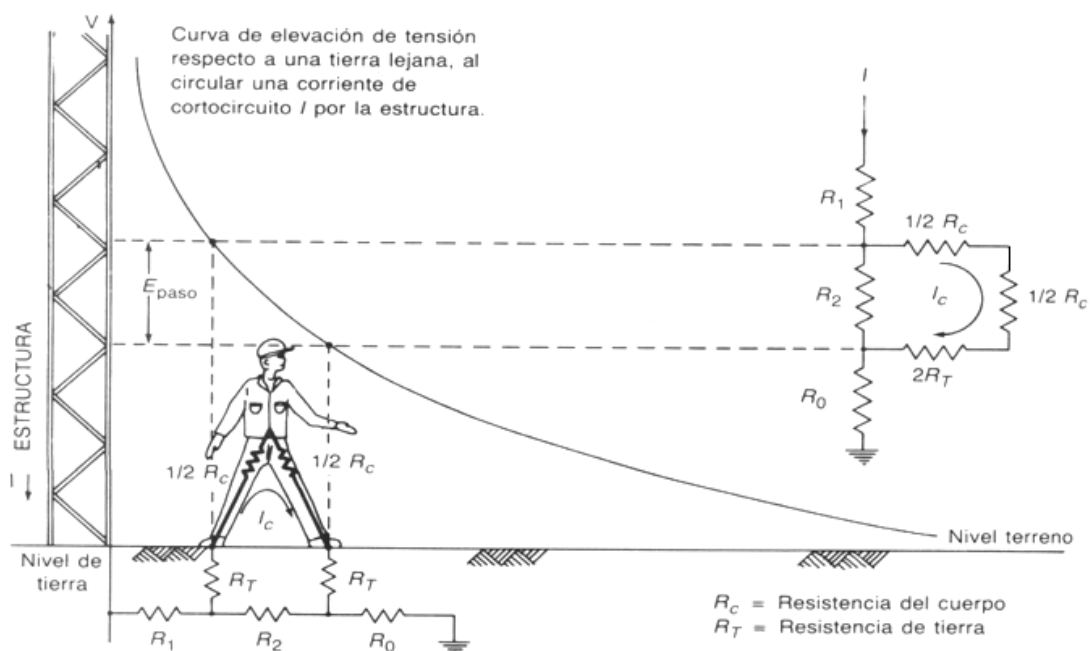


Figura 2.10. Tensión de paso cerca de una estructura conectada a tierra.

Es necesario para una buena comprensión tomar en cuenta los diversos casos que pueden presentarse al hacer contacto con superficies a diferente potencial. Las diferencias de potencial tolerables se determinan de acuerdo con los conceptos de tensiones de «paso», de «contacto» y de «transferencia».

En la Figura 2.10. se muestra el circuito equivalente de la diferencia de tensión de un «paso» o contacto entre los pies. La distancia de contacto entre los pies se supone de 1 m.

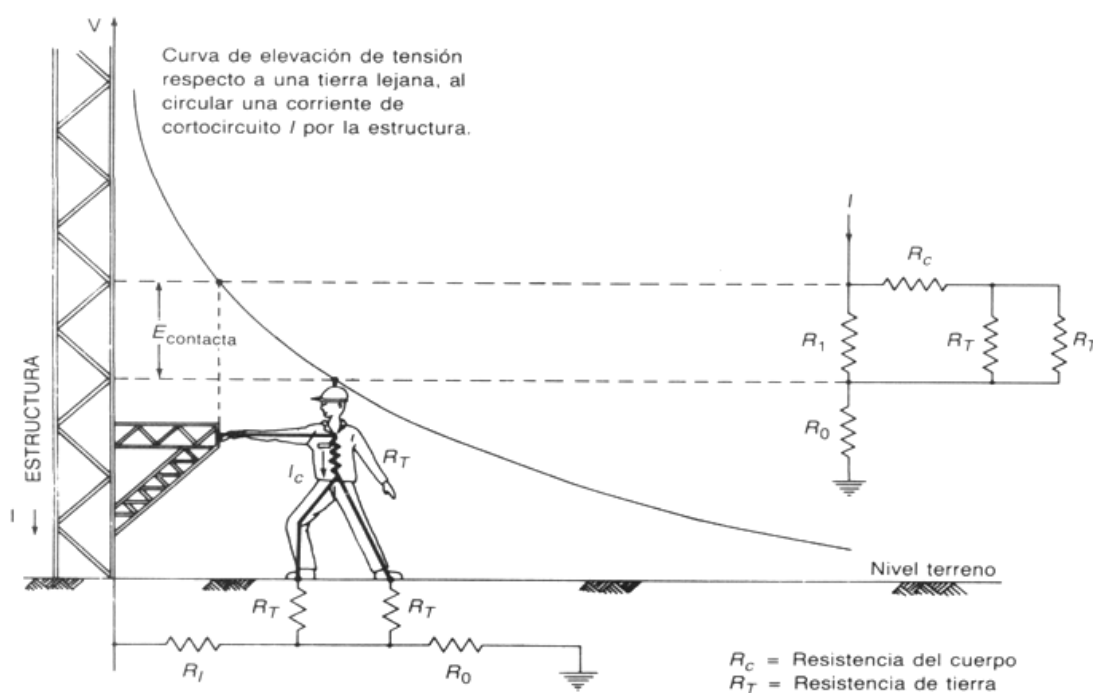


Figura 2.11. Tensión de contacto a una estructura conectada a tierra.

La Figura 2.11. muestra el circuito equivalente para un «contacto» entre la mano y los dos pies. La distancia medida sobre el suelo, igual al alcance normal, es de 1 m.

En la Figura 2.12., se muestra un ejemplo de un contacto con potencial «trasferido». En este caso se hace contacto con un conductor que está a tierra en un punto lejano. La tensión del choque eléctrico puede ser esencialmente igual a la elevación total de potencial de la malla de tierra.



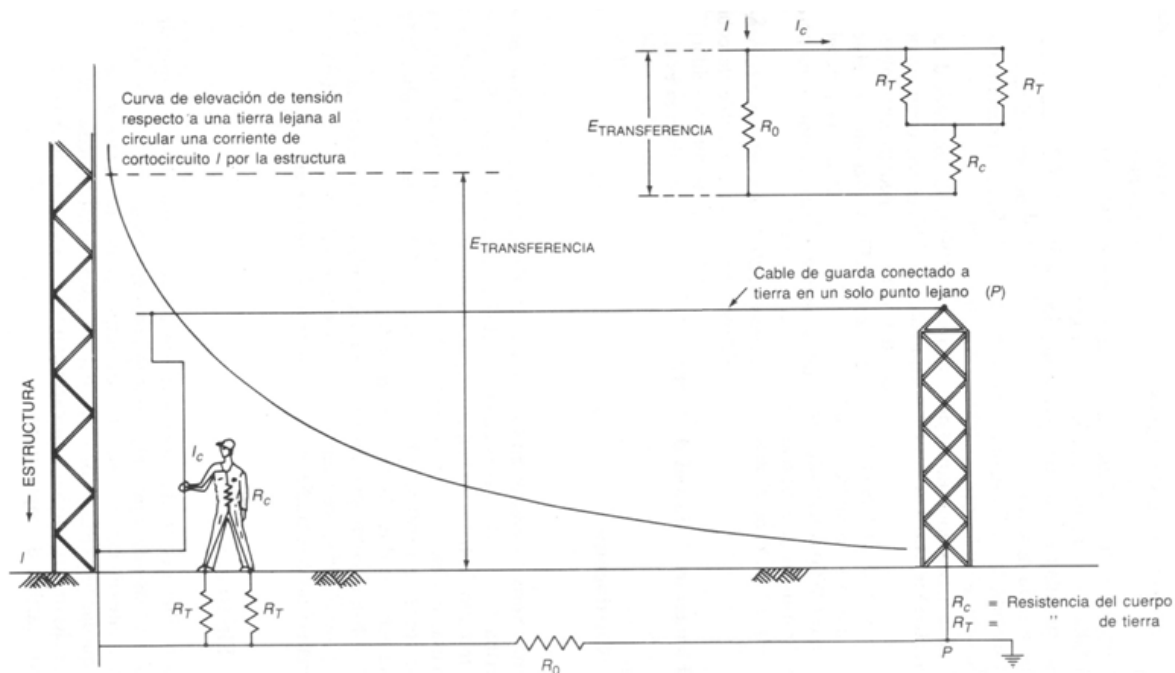


Figura 2.12. Tensión de transferencia.

Los circuitos incluyen en las resistencias del sistema de electrodos de tierra  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_0$  las resistencias de contacto de la mano y la de los zapatos (las dos últimas se consideran despreciables), la resistencia  $R_T$  del terreno inmediato debajo de cada pie y la resistencia del cuerpo  $R_C$ .

Para fines prácticos se consideran:

$R_T = 3\rho_s$  para cada pie. Donde  $\rho_s$  es la resistividad superficial ( $\Omega \cdot m$ ).

El valor de la resistencia del cuerpo humano  $R_C$  es variable, recomendándose tomar 1000 ohmios para la resistencia entre los dos pies y entre pies y manos (personas con 50 kg de peso aproximadamente).

Sustituyendo las constantes apropiadas del circuito correspondiente al voltaje de paso y el valor tolerable de la corriente de la ecuación (2.11) se obtiene:

$$E_{paso} = (R_C + 2R_T) \cdot I_C = (1000 + 6\rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.12.)$$

Pues al tratarse de un circuito en serie se tiene  $2R_T$  (Figura 2.10), y multiplicando cada término del paréntesis por la corriente del cuerpo:

$$E_{paso} = \frac{0.116 + 0.7\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2.13.)$$

Del mismo modo reemplazando las constantes del circuito equivalente al voltaje de contacto y el valor tolerable de la corriente de la ecuación (2.11) se tiene:

$$E_{contacto} = \left( R_C + \frac{R_T}{2} \right) \cdot I_C = (1000 + 1.5\rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.14.)$$

En la Figura 2.11. se observa que este circuito se encuentra en paralelo, entonces la resistencia equivalente de los pies es  $R_T/2$ , y multiplicando cada término del paréntesis por la corriente del cuerpo:

$$E_{contacto} = \frac{116 + 0.17\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2.15.)$$

**Tabla 2.6. Efectos de la intensidad de corriente eléctrica sobre el cuerpo humano.**<sup>R9</sup>

Corriente Eléctrica	EFFECTOS
Inferior a 25 mA	Contracciones musculares. Aumento de la presión sanguínea
25 a 80 mA	Posibles perturbaciones en los ritmos cardíacos y respiratorios con parada temporal del corazón y respiración
80 mA a 3 A	Especialmente peligrosa puede ocasionar fibrilación ventricular, de consecuencias mortales en la mayoría de los casos.
Mayor a 3 A	Perturbaciones del ritmo cardíaco. Posibilidad de parálisis cardíaca y respiratoria.

<sup>R9</sup> [http://www.procobreperu.org/f\\_sisconex.html](http://www.procobreperu.org/f_sisconex.html)

En la Tabla 2.4. se muestra los efectos de la intensidad de corriente eléctrica sobre el cuerpo humano. Como norma, se ha tomado un valor máximo de tensión que puede soportar el cuerpo humano durante un tiempo de 1.2 segundos, este es de 150 V.

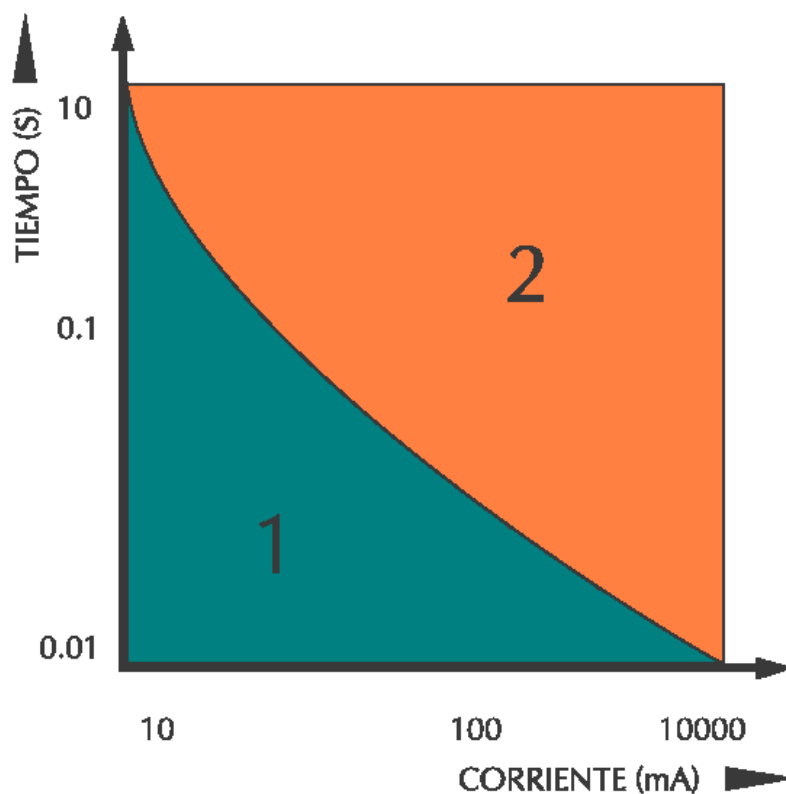


Figura 2.13. Curva de peligrosidad. <sup>R9</sup>

En la Figura 2.13. se diferencian dos zonas, la primera en donde no hay peligro para el ser humano, y la zona 2 en la cual el riesgo se incrementa en la medida que aumenta el tiempo y la intensidad de contacto.

## **2.4. MATERIALES DE PUESTA A TIERRA <sup>R4</sup>**

### **2.4.1. ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA <sup>R4</sup>**

Es muy importante tomar en cuenta que, los electrodos de puesta a tierra de los sistemas eléctricos deben estar accesibles y preferiblemente en la misma zona del puente de unión principal del sistema.

De acuerdo con las normas existentes, el sistema de electrodos de puesta a tierra se forma interconectando los siguientes tipos de electrodos (siempre que existan):

- Tubería metálica de agua enterrada.
- Estructura metálica del inmueble.
- Electrodo empotrado en concreto.
- Anillo de tierra.

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

- Electrodos de varilla o tubería.
- Electrodos de Placa
- Otras estructuras o sistemas metálicos subterráneos cercanos.

Los tipos de electrodos no permitidos en la mayoría de normas son:

- Tuberías de gas enterradas. Porque en los EE.UU. las compañías suministradoras de este fluido se opusieron a ello.
- Electrodos de aluminio. Aunque en Europa se han utilizado, los comités del NEC' [R19] 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.

Es importante hacer notar que en lugares donde existe congelamiento de la

superficie, la profundidad de enterramiento es mayor a la que se menciona en los párrafos siguientes; o, en los cálculos debe considerarse como aislada la parte del sistema de tierras que puede estar en contacto con la tierra congelada.

#### **2.4.1.1. Tubería metálica de agua enterrada <sup>R4</sup>**

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

- Por lo menos tener 3 m en contacto directo con la tierra.
- 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 [R20] está propugnando por eliminar las tuberías de agua como electrodos principales, debido a que con el uso cada vez mayor de equipos electrónicos, la corriente de fuga a tierra es en parte corriente continua, lo que provoca corrosión galvánica en las tuberías.

No confundir este tipo de electrodo, con el requerimiento, casi siempre olvidado, 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 igualar potenciales en caso de una falla.

#### **2.4.1.2. Estructura metálica del edificio <sup>R4</sup>**

La estructura metálica de los edificios puede ser usada, siempre que esté bien puesta a tierra, esto es, que su impedancia a tierra sea baja.

Para que sea baja la impedancia, se deben unir las columnas a las partes metálicas de la cimentación con conductores según los calibres de los

conductores de puesta a tierra requeridos en las normas y, en caso de haber sellos formados por películas plásticas, se deben puentear éstos.

#### **2.4.1.3. Electrodo de concreto armado o UFER<sup>R4</sup>**

Los electrodos Ufer, se llaman de esa manera en memoria del ingeniero Herb Ufer, quien estuvo a cargo de los laboratorios de los aseguradores (UL) en Los Ángeles de 1927 a 1953. Aparentemente el estuvo encargado de las pruebas de electrodos de puesta a tierra para arsenales en Arizona en 1942. Claramente, la tierra arenosa es el peor terreno para obtener una resistencia baja. Pero, los electrodos de concreto armado que el midió tuvieron una resistencia a tierra de 5 ohmios o menos.

En los sesentas, varios sitios en el oeste americano fueron probados con electrodos Ufer, obteniéndose tan buenos resultados, que el NEC en 1968 reconoció este tipo de electrodos.

Consisten en utilizar en las estructuras nuevas, el acero del concreto armado como electrodo principal, siempre y cuando la cimentación haya sido diseñada para este fin con los cables de tierra adecuados soldados a las varillas.

Debe constar de por lo menos 6 metros de una o más varillas de acero desnudo o galvanizado o revestido de cualquier otro recubrimiento eléctricamente conductor, 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.

El concreto tiene una estructura química ligeramente alcalina e higroscópica. La combinación de estas características provee iones libres que permiten al concreto exhibir una resistividad consistentemente de unos 30  $\Omega\cdot m$ . Los electrodos de concreto tienen una resistencia a tierra menor o igual que las varillas de cobre de un tamaño comparable, siempre que estén en contacto con suelos con resistividad de 50  $\Omega\cdot m$  o menor.

Algunas pruebas indican que la resistencia típica a tierra de una base para columna de anclaje medida en los pernos es de alrededor de 50  $\Omega$ , sin usar métodos especiales. De ahí que la resistencia efectiva de un edificio de estructura metálica con veintitantas columnas en paralelo es de menos de 5  $\Omega$ , 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.

En los lugares donde es posible que caigan descargas atmosféricas en el sistema de tierras con electrodos de concreto, éstos deben complementarse con electrodos de otro tipo, para que las grandes corrientes debidas a esas descargas no causen ningún daño por fractura al evaporar muy rápidamente el agua presente en el concreto.

#### **2.4.1.4. Anillo de tierra<sup>R4</sup>**

Un anillo de tierra consiste en un conductor de cobre desnudo, de sección transversal no menor al calibre 2 AWG (por resistencia mecánica) 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 frecuentemente circundando una fábrica o un sitio de comunicaciones, para proveer un plano equipotencial alrededor de edificios y equipos.

#### **2.4.2. ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA ESPECIALMENTE CONSTRUÍDOS<sup>R4</sup>**

Cuando no se dispone de alguno de los electrodos mencionados en el punto anterior, se puede usar uno o más de los electrodos siguientes:

- De Varilla o Tubería.
- Electrodos de Placa.

- Estructuras metálicas Subterráneas

#### 2.4.2.1. Electrodo de varilla o pica y tubería <sup>R10</sup>

Los electrodos de varilla o pica y tubo, deben tener entre 1.8 y 2.4 m de largo y deben instalarse de tal modo que al introducirlos, la longitud de cada uno esté en contacto con la tierra. (Ver la Tabla 2.7.)

Las varillas de metales no ferrosos deben estar aprobadas y tener un diámetro no inferior a 14.2 mm de diámetro, y las demás de por lo menos 20 mm. Las tuberías deben tener un diámetro no inferior a 30 mm, y si son de hierro, deben tener una protección contra corrosión en su superficie.

Las varillas de acero con un recubrimiento de cobre de 10 milésimas dura 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.



Figura 2.14. Esfera de influencia de un electrodo simple.

Estos electrodos se aplican al suelo mediante percusión hasta que alcanzan la profundidad adecuada. En caso de terrenos rocosos o de tepetate, las varillas no

---

<sup>R10</sup> AGULLEIRO, I; MARTÍNEZ, M. “Técnicas Modernas para la Medición de Sistemas de Puesta a Tierra Urbanas” Extracto.



pueden meterse de esa manera; se doblan o solamente no pueden entrar. Ocasionalmente se ha sabido de casos donde las varillas han sido regresadas hacia la superficie después de haber tratado de clavarlas en terrenos rocosos.

Cuando la roca está a menos de la longitud de las varillas, estos electrodos pueden meterse en diagonal hasta con un ángulo de  $45^\circ$  de la vertical (Figura 2.15.(b).). Pero, si no es este el caso, se deben enterrar horizontales en una trinchera abierta para el caso a 800 mm de profundidad por lo menos (Figura 2.15.(c).).

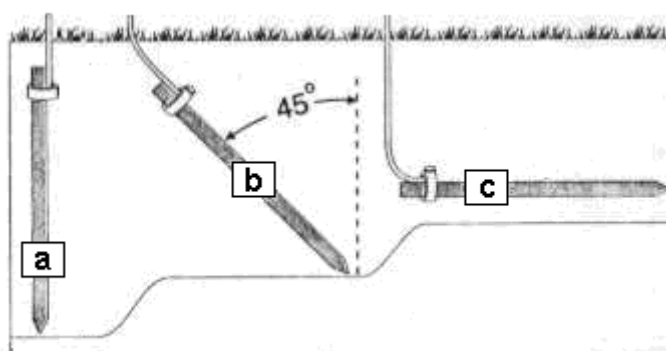


Figura 2.15. Disposición de los electrodos de varilla (a) Vertical; (b) Inclinada; y (c) Horizontal.

La alternativa al golpeado es perforar un agujero, instalar la varilla y rellenar nuevamente el agujero, aunque no se obtiene la compactación ni la baja resistencia de contacto de la varilla percutida.

#### 2.4.2.1.1. Picas convencionales Fe/Cu - Fe galvanizado<sup>R11</sup>

Considerando que la introducción de estas se realiza por hincado, los valores de resistencia de puesta a tierra son obtenidos de forma inmediata, y son mejores a los del sistema de placa. No obstante, estos valores deben entenderse como exclusivamente circunstanciales, ya que por efecto de la corrosión sobre el acero,

<sup>R11</sup> [http://www.procainsa.com/proteccioncatodicaysobretensiones\\_pt.htm](http://www.procainsa.com/proteccioncatodicaysobretensiones_pt.htm) (Sistemas de Puesta a Tierra)

la velocidad de pérdida de la resistencia inicial es muy rápida, y más aún, cuando la calidad de los recubrimientos de cobre o zinc ha ido reduciéndose o deteriorándose durante el proceso de hincado.

#### 2.4.2.1.2. *Electrodos de grafito rígido*<sup>RII</sup>

La conformación del electrodo de grafito rígido en forma de ánodo, con un activador-conductor de relleno para la mejora de la intimación con el terreno, hacen que este sistema de puesta a tierra, sea de alta fiabilidad.

Al tratarse de un electrodo constituido enteramente por grafito, no se encuentra afectado intensamente por la corrosión a diferencia de lo que ocurre con los metales.



Figura 2.16. Electrodo de grafito rígido.

En cuanto a los valores de resistencia de puesta a tierra en suelos de diferentes resistividades, su comportamiento es muy similar o incluso mejor al de las placas estrella, y mucho mejor al de las jabalinas convencionales.

Paralelamente, la evolución de estos valores con el paso del tiempo, es inmejorable dada su baja velocidad de desgaste por corrosión, y por tanto su vida útil es en principio ilimitada en comparación con los sistemas tradicionales.

Así, la propia naturaleza del electrodo, sus dimensiones y el activador conductor envolvente, hacen que este no necesite ningún mantenimiento (regado o mineralizado) tan frecuente en los demás sistemas.

Por todas estas características, el electrodo de grafito rígido es el ideal para puestas a tierra, superficiales y profundas ya que garantizan su larga durabilidad y un rendimiento más que aceptable.

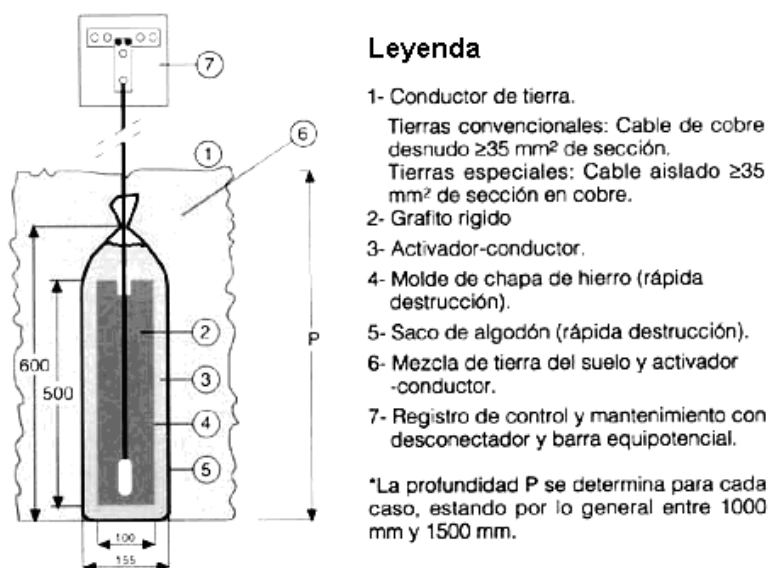


Figura 2.17. Esquema del electrodo de grafito rígido.

#### 2.4.2.1.3. Picas de Zinc<sup>RII</sup>

Las picas de Zinc constituyen una solución ideal para la protección catódica contra la corrosión de los sistemas de puesta a tierra cuando éstos están constituidos por conductores de acero galvanizado. Previenen además los pares galvánicos tan frecuentes en sistemas de puesta tierra de estructuras de acero (tanques enterrados, o bases de tanques aéreos) frente a conductores de cobre desnudo. Las principales características de estas picas son:

- Buen rendimiento por su baja resistencia eléctrica.
- Gran superficie de dispersión y buena intimación con el terreno ya que se presentan con saco relleno de activador-conductor en base bentonítica.

- Fácil manipulación y fácil instalación por cualquier usuario.
- Posibilidad de determinar su estado de degradación sin desenterrarlas.

#### 2.4.2.1.4. Electrodo de picrón<sup>RII</sup>

Los electrodos de *picrón* han sido diseñados para sistemas de puesta a tierra de altas prestaciones, especialmente para puestas a tierra profundas, en terrenos pantanosos, con niveles freáticos altos (zonas deltaicas) e incluso en aguas muy agresivas (ambientes marinos o directamente en agua de mar), para instalaciones eléctricas de alta y baja tensión, pararrayos, y equipamientos informáticos o de robótica.

Los electrodos de *picrón* pueden considerarse el sistema de puesta a tierra de mayor garantía y estabilidad del mercado.

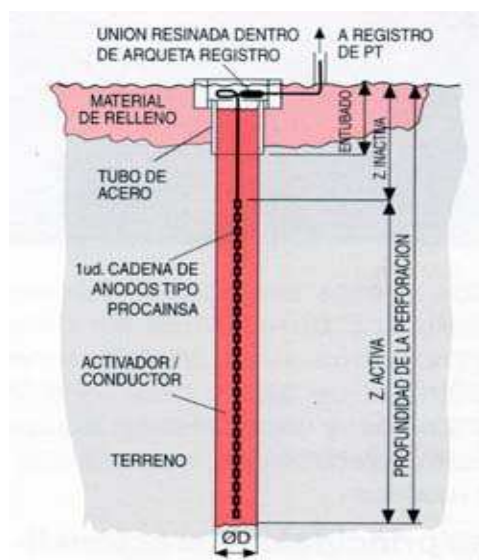


Figura 2.18. Esquema del electrodo de grafito picrón.

Sus principales características son:

- Duración ilimitada (vida > 30 años), debido a su mínima degradación por corrosión.

- Pueden utilizarse bajo forma de electrodos únicos o electrodos en cadena, para instalación en perforaciones verticales desde diámetros de 160 x 3000 mm, o bien pueden instalarse directamente depositados sobre sedimentos marinos.
- Nulo mantenimiento, pues no requieren regados periódicos para establecer su conductividad.

#### 2.4.2.2. Electrodos de placa <sup>R4</sup>

Los electrodos de placa no deberán tener menos de 0.2 m<sup>2</sup> de superficie en contacto con el suelo. Y las placas de acero deberán 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.

##### 2.4.2.2.1. Placas-estrella, planchas o similares

Las puestas a tierra mediante placas-estrella, planchas o similares, tienen un sistema de construcción parecido, basado en la abertura de un pozo o zanja de 2 a 3 m<sup>3</sup> y relleno mediante tierra vegetal y otros aditivos para disminuir la resistividad del terreno (tratamiento Ledoux).



Figura 2.19. Electrodo de placa estrella. <sup>R11</sup>

Los valores de resistencia eléctrica de puesta a tierra obtenidos en estas instalaciones pueden considerarse como aceptables. Debido a la falta de compactación del suelo, estos valores tienden a mejorar un tiempo después de su

instalación, manteniéndose estables durante un plazo que oscila entre 5 y 10 años.

#### **2.4.2.3. Estructuras metálicas enterradas<sup>R4</sup>**

La puesta a tierra mediante sistemas de tuberías o tanques enterrados, pero, puede ser cualquier clase de estructura metálica subterránea.

#### **2.4.2.4. Ademe de pozos<sup>R21</sup>**

Las normas americanas MIL-STD-1542B, MIL-HDBK-419 y MIL-STD-188-124 no recomiendan el uso de los ademes de pozos para lograr una baja impedancia a tierra. Las normas mencionadas hacen énfasis en que los ademes presentan muy baja resistencia a tierra en c.c., pero, no reducen la impedancia en corriente alterna, y, mencionan que si los ademes metálicos son utilizados como parte del sistema de tierras, no deben ser los únicos elementos en contacto con el suelo.

### **2.4.3. ELECTRODOS PARA PUESTA A TIERRA EN RADIO FRECUENCIA<sup>R4</sup>**

En el caso de torres de radiodifusión, se emplean cables en configuración de estrella (radiales) para su puesta a tierra. Y, se ha encontrado más efectivo tener conectados los cables en un punto que tener múltiples anillos rodeando el sitio.

Esos cables radiales llamados contra-antenas pueden ser menores a 30 m de largo si el suelo es adecuado. Los cables dispersan la energía de las descargas muy eficientemente. Como la corriente se divide en proporciones iguales en los cables radiales, entre más cables, menor corriente los circula. Y, una baja corriente es más fácil de disipar y tendrá menor impacto en la elevación del potencial de tierra del sistema.

En la Tabla 2.7. se describe las dimensiones de los electrodos en sus distintos tipos de forma general, sin embargo en el ANEXO N° 1, se detallan todas sus clases y variaciones con las respectivas medidas.

**Tabla 2.7. Dimensiones mínimas recomendadas para los electrodos de puesta a tierra.<sup>R10</sup>**

Tipo de electrodo		Dimensión mínima	
Picas	Barras	$\varnothing \geq 14.2$ mm (acero-cobre 250 $\mu$ ) $\varnothing \geq 20$ mm (acero galvanizado 78 $\mu$ )	Longitud
	Perfiles	Espesor $\geq 5$ mm y sección $\geq 350$ mm <sup>2</sup>	1.8 – 2.4 m
	Tubos	$\varnothing_{\text{ext}} \geq 30$ mm y espesor $\geq 3$ mm	
Placas	Rectangular	1 m x 0.5 m Espesor $\geq 2$ mm (cobre); espesor $\geq 3$ mm (acero galvanizado 78 $\mu$ )	
	Cuadrada	1 m x 1 m Espesor $\geq 2$ mm (cobre); espesor $\geq 3$ mm (acero galvanizado 78 $\mu$ )	
Conductor desnudo		35 mm <sup>2</sup> (cobre)	

#### 2.4.4. MALLAS

En la mayoría de normas de instalaciones eléctricas, requieren de un sistema enmallado de tierra con múltiples electrodos y conductores enterrados, cuando están involucradas tensiones y corrientes eléctricas muy altas, con el fin de minimizar los riesgos al personal en función de la tensión eléctrica de paso y de contacto [2.3.3.1.].

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.

En cada cruce de conductores de la malla, éstos 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.

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.



Figura 2.20. Sistema de malla.

En [5.3.] se presenta el cálculo de la malla requerida para la subestación de potencia cercana al nuevo aeropuerto, cumpliendo con el voltaje de paso y de contacto (IEEE Std 80) así como el cálculo del calibre mínimo del conductor de la malla para resistir las corrientes de falla. Los conectores empleados en la malla del sistema de tierras de una subestación deben ser de tipo de compresión o soldables exotérmicamente.

Los cables empleados en las mallas de tierra son de: acero, acero inoxidable, acero galvanizado, y cobre. Para evitar la corrosión galvánica en terrenos de baja resistividad, algunas compañías eléctricas desde el diseño utilizan en sus mallas de tierras, cable de cobre estañado para bajar el potencial electronegativo entre los diferentes metales, esto se detalla en el inciso [2.5.3.].



El factor principal en la selección del material es la resistencia a la corrosión [2.5.1.]. El cobre es el material más utilizado porque es económico, tiene buena conductividad, es resistente a la corrosión y tiene un punto elevado de fusión (1083 °C).

#### 2.4.5. MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA A TIERRA <sup>R4</sup>

Los sistemas con un electrodo único que conste de una varilla, tubería o placa, que no tiene una resistencia a tierra de 25  $\Omega$  o menos, que se complemente con electrodos adicionales de los tipos mencionados en [2.4.1] separados por lo menos una distancia de 1,83 m entre sí. En la práctica, cuando la resistencia del electrodo único mencionado, excede del valor buscado, esa resistencia se puede reducir de las siguientes maneras:

- Usando una varilla de mayor diámetro.
- Usando varillas más largas.
- Poniendo dos, tres o más varillas en paralelo.
- Tratando químicamente el terreno.

##### 2.4.5.1. Varillas de mayor diámetro <sup>R4</sup>

Usando varillas de 20 mm en lugar de varillas de 14.2 mm se logra una reducción en la resistencia a tierra de hasta un 10% máximo. Muy poco en realidad.

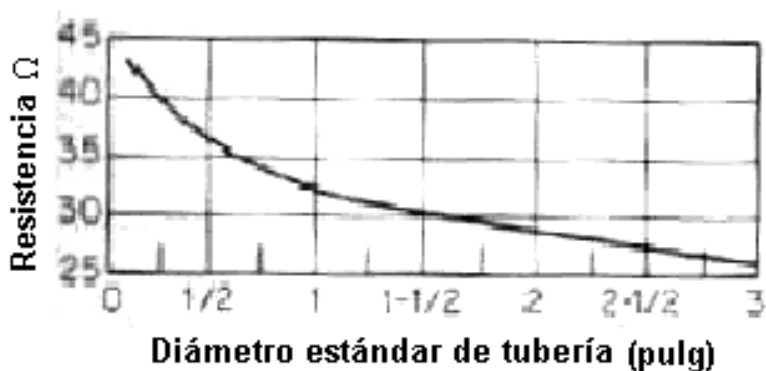


Figura 2.21. Relación entre el diámetro del electrodo y la resistencia a tierra.

### 2.4.5.2. Varillas más largas<sup>R4</sup>

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.

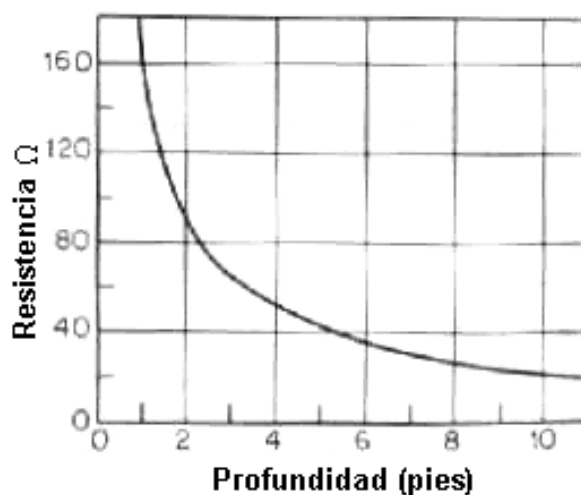


Figura 2.22. Variación de los electrodos enterrados con la profundidad.

Por lo general, doblando el largo, se obtiene una reducción del 40% de resistencia a tierra. Otra ventaja es que con el uso de varillas largas, se controla el gradiente de potencial en la superficie.

### 2.4.5.3. Varillas en paralelo (Electrodos múltiples)<sup>R4</sup>

El colocar varias varillas en paralelo es una manera muy efectiva de bajar la resistencia. Pero, las varillas de tierra no deben ser colocadas muy cerca una de otra [R14], porque cada varilla afecta la impedancia del circuito, por los efectos mutuos.

La única precaución que se debe tomar es guardar una distancia mínima entre las picas para no interferir en el ámbito de disipación de ambas. Experimentalmente se ha comprobado que la distancia mínima recomendable es de 1.5 veces la longitud de hincado de las pocas enterradas en paralelo (no debe ser menor de

1.8 m), se recomienda que estén separadas más del largo de cualquiera de ellas.



Figura 2.23. Varillas en paralelo.

El motivo de esta separación es que no se produzcan interferencias en los conos de deyección de las picas (conos formados por el volumen de terreno a través del que se produce la dispersión de los electrodos en caso de corriente de falla). El vértice del cono está en la superficie del terreno, la altura es la de la pica enterrada y la base es un círculo de radio igual a la longitud de la pica.

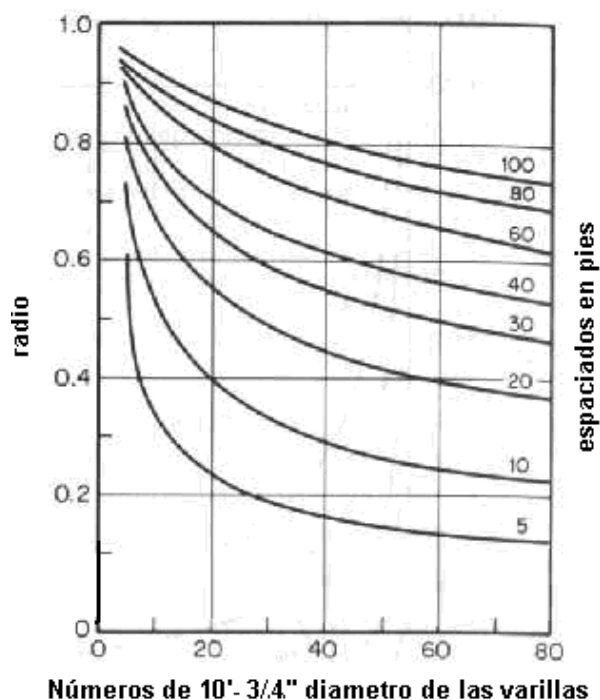


Figura 2.24. Radio de conductividad de varillas en paralelo sobre un área de varillas espaciadas.

Por ejemplo, dos varillas en paralelo a 3 m de distancia ofrecen una resistencia del 60% de la resistencia a tierra de una sola de ellas. Pero, incrementando ese espaciamiento a 6 m, la reducción de la resistencia es del 50%.

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 10 varillas apenas reducen ese valor al 10 %.

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. Considere como ejemplo de esto, un terreno de resistividad de  $1000 \Omega \cdot m$ . Una varilla de 25 cm da una resistencia a tierra de  $300 \Omega$ . Dos varillas de 12.5 cm dan una resistencia de  $210 \Omega$ . Esto es,  $2/3$  de la resistencia.

Obviamente que esto supone que el terreno superficial es razonablemente conductor.

#### **2.4.6. CONECTORES<sup>R4</sup>**

Los conectores de conductores de puesta a tierra con los electrodos pueden ser del tipo de soldadura exotérmica, conectores a presión, abrazaderas u otros medios aprobados en las normas. Y no deben tener soldaduras con materiales de puntos de baja fusión (estaño, plomo, etc.) para evitar falsos contactos, ya que pierde características de seguridad la malla, si se llegara a abrir.

Se prefieren las conexiones exotérmicas (de marcas: Cadweld, Thermoweld, o Mexweld) para redes de tierras de subestaciones de alta potencia.



Figura 2.25. Conector estándar Cadweld.

Para fabricar una conexión exotérmica no es necesaria una fuente de energía externa. Al encender una chispa sobre el polvo ignitor, se inicia una reacción química, donde el óxido de cobre es reducido por el metal aluminio produciendo cobre fundido a unos  $1400^{\circ}\text{C}$  y escoria de aluminio. Este cobre fluye sobre los conductores soldándolos en la forma del molde de grafito, obteniendo una unión metálica sólida en unos 20 segundos. Es importante notar que una buena unión depende del ajuste del molde a los conductores.



Figura 2.26. Variedad de conectores.

Las abrazaderas a usarse en sistemas de puesta a tierra deben ser adecuadas

para el número y tipo de conductores. Además, deben de ser compatibles con los materiales de los conductores y los electrodos de puesta a tierra, y cuando se usen enterradas, estos conectores deben ser apropiados (marcada la leyenda BURIED).

#### 2.4.7. REGISTROS<sup>R4</sup>

Las abrazaderas u otros accesorios para puesta a tierra, deben estar aprobados para su uso general sin protección, o protegerse contra daño físico, con una cubierta protectora, y la conexión debe ser accesible, siempre que no esté en un electrodo hundido, empotrado o enterrado.

Pero en el caso de las subestaciones, la misma norma especifica que 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.

Cuando se coloquen registros, se recomienda que sean al menos de 150 mm de diámetro para hacer cualquier maniobra y, que tengan tapa. 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.

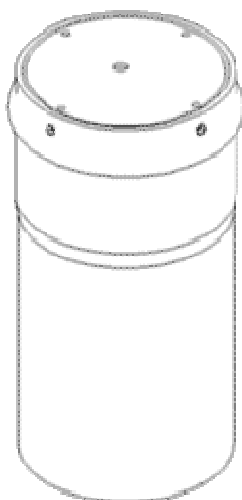


Figura 2.27. Registro para electrodo de varilla.

#### 2.4.8. CONDUCTORES DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA <sup>R4</sup>

El conductor del electrodo de puesta a tierra sin ningún empalme (excepto empalmes irreversibles) puede llevarse a cualquiera de los electrodos disponibles del sistema de puesta a tierra y es dimensionado según el mayor calibre requerido para todos los electrodos disponibles de acuerdo con la tabla. Excepto en el caso de un único electrodo del tipo varilla, o del tipo Ufer, donde se permite que el conductor del electrodo no sea mayor de calibre 6 en cobre.

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. Y, los calibres menores, deben correr siempre por tuberías conduit. En el caso de las tuberías conduit, éstas deben ser eléctricamente continuas; esto es, deben estar conectadas a tierra en ambos extremos. Inclusive las que cubren el cable de puesta a tierra de las acometidas residenciales.

Estos cables no deben ser de aluminio o de cobre con aluminio porque se corroen cuando están en contacto con la tierra o con el cemento.

**Tabla 2.8. Conductor de los electrodos de tierra de instalaciones de c.a.**

Tamaño nominal del mayor conductor de entrada a la acometida o sección equivalente de conductores en paralelo mm <sup>2</sup> (AWG o kcmil)		Tamaño nominal del conductor al electrodo de tierra mm <sup>2</sup> (AWG o kcmil)	
Cobre	Aluminio	Cobre	Aluminio
33,62 (2) o menor	53,48 (1/0) o menor	8,367 (8)	13,3 (6)
42,41 o 53,48 (1 o 1/0)	67,43 o 85,01 (2/0 o 3/0)	13,3 (6)	21,15 (4)
67,43 o 85,01 (2/0 o 3/0)	4/0 o 250 kcmil	21,15 (4)	33,62 (2)
Más de 85,01 a 177,3 (3/0 a 350)	Más de 126,7 a 253,4 (250 a 500)	33,62 (2)	53,48 (1/0)
Más de 177,3 a 304,0 (350 a 600)	Más de 253,4 a 456,04 (500 a 900)	53,48 (1/0)	85,01 (3/0)

Más de 304 a 557,38 (600 a 1100)	Más de 456,04 a 886,74 (900 a 1750)	67,43 (2/0)	107,2 (4/0)
Más de 557,38 (1100)	Más de 886,74 (1750)	85,01 (3/0)	126,7 (250)

Cuando no sea una acometida, se hace el cálculo sobre la sección de los conductores en paralelo.

Generalmente el conductor del electrodo de puesta a tierra es conectado a la terminal del neutro en el gabinete del interruptor principal donde existe el puente de unión principal entre las terminales del neutro y del gabinete.

Donde un tubo metálico es utilizado como canalización entre el medidor y el interruptor principal, la conexión del conductor puesto a tierra (neutro) crea un circuito paralelo al circuito de puesta a tierra, por lo que esta conexión debe hacerse lo más corta posible porque en los medidores, la terminal del neutro está unida a la carcasa metálica de los medidores.

## **2.5. PROTECCIÓN CATÓDICA ANTE LA CORROSIÓN EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS<sup>R12</sup>**

Su objetivo es otorgar inmunidad a la corrosión a las distintas estructuras metálicas enterradas o sumergidas, transformando las zonas anódicas, donde el metal se degrada, en zonas catódicas. La misma es una técnica especializada de mantenimiento preventivo destinada a brindar una prolongada vida útil a dicho tipo de estructuras.

Existe una estrecha dependencia entre el valor de resistividad y la corrosividad de un suelo, se ha constatado en numerosas ocasiones una relación directa entre la propiedad y la corrosión, de tal forma que esta es mayor cuanto menor sea la resistividad, como se puede observar en la Tabla 2.9.

<sup>R12</sup> <http://www.procainsa.com/noticias/iberia-actualidad> (Protección de Estaciones)



**Tabla 2.9. Relación entre resistividad y corrosión en función del estado del suelo**<sup>R12</sup>

AUMENTO DE	Resistividad	Corrosión
Temperatura	Baja	Sube
Salinidad	Baja	Sube
Humedad	Baja	Sube
Porosidad	Sube	Baja

Dependiendo de los valores de resistividad que tome un terreno, se establecen unas equivalencias de corrosividad, que se muestran en la Tabla 2.10., al mismo tiempo se indica la necesidad de protección catódica en dichas instalaciones enterradas o sumergidas y revestidas:

**Tabla 2.10. Equivalencias de corrosividad y resistividad.**<sup>R3</sup>

RESISTIVIDAD	CORROSIVIDAD DEL SUELO	PROTECCIÓN CATÓDICA
< 9	Severa	Si
9 a 23	Alta	Si
23 a 50	Significativa	Si
50 a 100	Moderada	Si
100 a 250	Leve	Depende
> 250	Baja	Depende

Se puede observar que para valores de resistividad en el orden de hasta 100  $\Omega \cdot m$ , es necesario realizar la protección catódica para evitar la corrosión del sistema de puesta a tierra.

Para la ejecución de la protección catódica se recurre a elementos sacrificables que se vinculan directa o indirectamente al metal a proteger. En el primer caso se suelen emplear ánodos galvánicos de zinc, aluminio o magnesio; mientras que en el segundo se recurre a una fuente exterior de corriente continua y electrodos de corriente impresa, de regulación manual o automática.

### 2.5.1. CAUSAS DE LA CORROSIÓN<sup>R12</sup>

La corrosión es un proceso natural y normal. Las teorías modernas sobre la corrosión y la protección están basadas en la estructura atómica de la materia. El átomo está formado por un equilibrio de cargas positivas (protones) y de cargas negativas (electrones).

Los metales tienden a perder electrones; el átomo en esta circunstancia se transforma en un ion positivo. Al sumergir un metal en un electrolito, espontáneamente los iones positivos entran en solución. Decimos entonces que ha comenzado la corrosión en medio húmedo con una circulación simultánea de corriente eléctrica.

Es decir, estamos en presencia de la destrucción electroquímica del metal o corrosión húmeda. La corrosión seca o química (sin circulación de iones) rara vez se da en la práctica.

Corrosión es, por lo tanto, la destrucción o deterioro químico o electroquímico de un metal por reacción con el medio que lo rodea.

Esta destrucción electroquímica del metal puede deberse a varias causas:

- Por heterogeneidad del metal.
- Por heterogeneidad del electrolito.
- Por acción de las corrientes vagabundas.

#### 2.5.1.1. Heterogeneidad del metal<sup>R12</sup>

Todo metal sumergido en un electrolito toma un potencial respecto al medio. Si el electrolito es una solución normal del metal, el potencial originado será el potencial electroquímico normal del metal.

**Tabla 2.11. Potenciales electroquímicos normales de algunos metales expresados en voltios y referidos al electrodo de hidrógeno.**

METAL	POTENCIAL (V)
Oro	+ 1.40
Plata	+ 0.79
Cobre	+ 0.34
Hidrógeno	0
Plomo	- 0.13
Hierro	- 0.76
Aluminio	- 1.67
Magnesio	- 2.34

A medida que se desciende en la Tabla 2.11., los metales van siendo menos nobles y más susceptibles de sufrir efectos de corrosión. Cuando el electrolito no es una solución normal, que es el caso corriente, el potencial electroquímico del metal difiere del potencial electroquímico normal.

#### 2.5.1.1.1. Pares galvánicos

La heterogeneidad más evidente es la que resulta de la unión de dos metales de naturaleza diferente sumergidos en un mismo electrolito. Por ejemplo, si dentro de un mismo electrolito vinculamos eléctricamente cobre y hierro, se establecerá una corriente eléctrica que saldrá del hierro hacia el electrolito. En tal caso el hierro se corroe y el cobre se protege.

La zona donde la corriente sale del metal hacia el electrolito se denomina anódica. La zona donde la corriente penetra a la estructura, se denomina catódica. En la primera habrá disolución del metal en forma de iones positivos, correspondiendo una oxidación (corrosión). En la segunda habrá una ganancia de electrones, correspondiendo una reducción (protección).

Si  $E_{Cu}$  y  $E_{Fe}$  a los potenciales espontáneos a circuito abierto del cobre y del hierro sumergidos en el electrolito, éstos tenderán a tomar un potencial de equilibrio,

cuando se vinculen eléctricamente ambas estructuras. Ese potencial de equilibrio se denomina potencial de corrosión,  $E_{\text{corr}}$  y a él corresponderá la corriente de corrosión  $I_{\text{corr}}$ . En consecuencia, como el cobre es más noble que el hierro, éste se corroe y el tipo de corrosión se denomina por copla o par galvánico.

#### *2.5.1.1.2. Estructuras oxidadas y otras*

También hay corrosión galvánica cuando se asocian viejas estructuras oxidadas de un metal con otras nuevas del mismo metal. El metal oxidado es siempre más noble que el metal nuevo y en tal caso, se corroerá este último. Asimismo, las diferencias internas de tensiones mecánicas, de composición, o de orientación cristalina también pueden originar corrosión por la creación de diferentes zonas anódicas y catódicas en las superficies involucradas.

### **2.5.1.2. Heterogeneidad del electrolito <sup>R12</sup>**

#### *2.5.1.2.1. Alineación diferencial*

En un electrolito que se puede suponer homogéneo, frecuentemente existen diferencias en el oxígeno disuelto. Si una pieza metálica se encuentra en un medio como el mencionado, tomará un potencial más positivo en la zona más aireada y menos positivo en la zona menos aireada. Esta última se corroerá por aireación diferencial. Las ralladuras o picaduras en la superficie de un metal pueden crear fenómenos de corrosión por aireación diferencial.

#### *2.5.1.2.2. Pilas geológicas*

Consideremos que el metal de una estructura sea perfectamente homogéneo y que ella, por su longitud enterrada, atraviese suelos de naturaleza diferentes; como por ejemplo suelos arenosos bien secos y terrenos arcillosos muy húmedos.

En esta última zona, la estructura se corroerá como consecuencia de la circulación de corrientes a través del electrolito desde las zonas anódicas (suelos

arcillosos) a las zonas catódicas (suelos arenosos). El proceso podrá acelerarse por la diferente concentración de oxígeno.

#### *2.5.1.2.3. Corrosión bacteriana*

En los últimos años se ha puesto en evidencia el rol importante que pueden tener ciertas bacterias en la corrosión de los metales. Uno de los casos más estudiados es el del hierro enterrado dentro de un medio anaerobio. Los productos de la corrosión más característicos son el sulfuro y el óxido de hierro.

#### **2.5.1.3. Acción de las corrientes vagabundas<sup>R12</sup>**

Por corrientes vagabundas se designan generalmente a las corrientes eléctricas que circulan en el suelo provenientes de los sistemas de tracción eléctricos, (tranvías, ferrocarriles), de las instalaciones eléctricas industriales (plantas de refinado electrolítico, de galvanoplastia, de soldadura) y de los sistemas de alimentación de energía (de corriente continua o alterna).

Estas corrientes son muy variables en su intensidad, dirección y sentido, llamándoseles por tal razón, vagabundas. Para comprender el proceso de corrosión por corrientes vagabundas utilizaremos el ejemplo de un sistema de tracción eléctrico cuyo recorrido es paralelo o aproximadamente paralelo a una canalización enterrada.

Como se sabe, el retorno de las corrientes utilizadas por los sistemas de tracción eléctricos, se efectúa por los rieles. Generalmente la continuidad eléctrica de los mismos no es perfecta como tampoco su aislamiento respecto al suelo. Debido a ello, una parte de las corrientes pasan de los rieles al suelo y de éste a la canalización vecina, circulando hasta la subestación; allí salen de la canalización.

Las corrientes son localmente peligrosas en estas zonas donde abandonan las estructuras para retornar a través del suelo, hacia el polo negativo de las fuentes de energía que las engendran. En tales zonas, denominadas anódicas, se origina

la corrosión electrolítica que será más o menos intensa, según la potencia del sistema de tracción, la frecuencia del servicio, las aceleraciones y desaceleraciones, la continuidad eléctrica de los rieles, la aislamiento del balasto (piedras que inmovilizan los durmientes), la humedad del suelo y las sales que contenga. En cambio, las zonas de entrada de las corrientes, llamadas catódicas, no presentan localmente inconvenientes y, por el contrario, son beneficiosas a la canalización.

## **2.5.2. TIPOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA <sup>R12</sup>**

Existen dos tipos de sistemas de protección catódica, los cuales se pueden emplear en forma individual o combinada:

- Ánodos galvánicos o de sacrificio, y
- Corriente impresa.

### **2.5.2.1. Ánodos galvánicos o de sacrificio <sup>R12</sup>**

La fuente de corriente eléctrica de este sistema utiliza la diferencia de potencial de oxidación entre el material del ánodo y el electrodo. La protección se produce a consecuencia de la corriente eléctrica que drena el ánodo durante su consumo. En todos los casos, se debe asegurar que la diferencia de potencial disponible del sistema seleccionado sea suficiente para que drene la corriente eléctrica de protección, de acuerdo con lo indicado en el inciso [2.2.2.2.].

### **2.5.2.2. Corriente impresa <sup>R12</sup>**

Este sistema consiste en inducir corriente eléctrica directa a una tubería enterrada mediante el empleo de una fuente y una cama de ánodos inertes que pueden ser de hierro, grafito, ferro silicio, plomo y plata entre otros. La fuente de corriente eléctrica directa se conecta en su polo positivo a una cama de ánodos inertes y el polo negativo a la tubería a proteger.

### 2.5.3. CRITERIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA <sup>R13</sup>

Para proteger catódicamente a los electrodos enterrados y/o sumergidos se debe cumplir, como mínimo, con uno de los criterios siguientes:

- Un potencial tubo/suelo (catódico) mínimo de -850 milivoltios, medido respecto de un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO<sub>4</sub>), en contacto con el electrolito. La determinación de este voltaje se debe hacer con la corriente eléctrica de protección aplicada;
- Un potencial de protección tubo/suelo (catódico) de -950 milivoltios, cuando el área circundante de la tubería se encuentre en condiciones anaerobias y estén presentes bacterias sulfato-reductoras; para una interpretación válida se debe efectuar la corrección a que haya lugar debido a la caída de voltaje originada durante la medición.
- Un cambio de potencial de polarización mínimo de -100 milivoltios, medido entre la superficie de la tubería y un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO<sub>4</sub>) en contacto con el electrolito.

Este cambio de potencial de polarización se debe determinar interrumpiendo la corriente eléctrica de protección y midiendo el abatimiento de la polarización. Al interrumpir la corriente eléctrica ocurre un cambio inmediato de potencial. La lectura del potencial después del cambio inmediato se debe usar como base de la lectura a partir de la cual se mide el abatimiento de la polarización.

Los periodos de suspensión de corriente eléctrica de protección durante los cuales se puede realizar dicha medición están en el rango de 0.1 a 3.0 segundos.

---

<sup>R13</sup> Código NACE-TM-0497-1997 "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems" Técnicas de medición.

#### **2.5.4. PERFIL DE POTENCIALES DE POLARIZACIÓN<sup>R13</sup>**

Una vez instalado el sistema de protección catódica se debe verificar el nivel de protección a lo largo de la trayectoria de la tubería. Los valores de potencial obtenidos deben cumplir, como mínimo, con alguno de los criterios indicados en el inciso anterior de esta Norma.

Con la información anterior se debe elaborar el perfil inicial de potenciales de polarización y mediante su análisis e interpretación se deben realizar los ajustes operacionales a que haya lugar en el sistema seleccionado.

Se deben establecer pruebas de rutina para verificar el comportamiento del sistema de protección catódica, tales como medición y registro de la demanda de corriente eléctrica de protección, resistencia del circuito, condiciones operativas de la fuente de corriente eléctrica directa y perfiles de potenciales de polarización. Lo anterior, con la finalidad de identificar fácilmente los valores de subprotección o sobreprotección en el conducto, así como contar con elementos de juicio técnicos para llevar a cabo pruebas y/o estudios adicionales.

El análisis e interpretación de los resultados de las pruebas antes mencionadas se deben efectuar de manera integral para efectos comparativos, con el objeto de determinar la tendencia de los parámetros monitoreados. Esta información se debe integrar en un expediente sobre la funcionalidad del sistema.

#### **2.5.5. FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA<sup>R14</sup>**

Para que un sistema de protección catódica sea efectivo debe proporcionar una corriente eléctrica suficiente y una distribución uniforme al sistema de tubería a proteger, evitando interferencias, corto circuitos en encamisados metálicos y daños en los aislamientos eléctricos así como en el recubrimiento anticorrosivo. Todos los sistemas de tubería de acero deben contar con un sistema de

---

<sup>R14</sup> <http://www.procainsa.com/noticias/diario-oficial/nom-actualidad.html>



protección catódica permanente en un plazo no mayor a un año posterior a la terminación de su construcción. En suelos altamente corrosivos (0 a 20  $\Omega\cdot\text{m}$ , presencia de agentes promotores de la corrosión, etc.), se debe instalar un sistema de protección catódica provisional con ánodos galvánicos en forma simultánea a la construcción del sistema de tubería. Este sistema provisional de protección catódica se debe sustituir, antes de un año después de terminada la construcción, por el sistema de protección catódica definitivo.

#### **2.5.5.1. Previsiones para el monitoreo <sup>R14</sup>**

Para determinar la eficacia del sistema de protección catódica, la tubería debe contar con estaciones de registro eléctrico para la medición de potenciales electrodo/suelo.

Cuando la tubería esté instalada a campo traviesa, dichas estaciones deben instalarse cada kilómetro sobre el derecho de vía de la tubería y en todos los cruzamientos con estructuras metálicas enterradas, carreteras, vías de ferrocarril y ríos, en caso de ser posible.

Cuando la tubería esté instalada en zonas urbanas, las estaciones de registro eléctrico se pueden instalar en banquetas, registros de válvulas o acometidas, en caso de ser posible.

Cuando las estaciones de registro eléctrico de protección catódica no se puedan colocar de acuerdo a lo establecido en el párrafo anterior debido a impedimentos físicos o geográficos, la estación de registro correspondiente se debe instalar en el sitio accesible más cercano. La ubicación real de estos sitios se debe documentar y guardar en archivo para futuras referencias.

Las estaciones deben contar con puntas de prueba, a efecto que faciliten la medición de la corriente eléctrica del sistema de protección catódica en cada uno de los puntos donde se aplique el sistema de protección seleccionado, previendo las conexiones para la medición de la corriente eléctrica drenada por cada ánodo

y la total de la cama anódica. Las mediciones se realizarán como mínimo una vez al año.

#### **2.5.5.2. Interferencias con otros sistemas <sup>R14</sup>**

Cuando se vaya a instalar un sistema de protección catódica de una tubería nueva se debe notificar a todas las compañías que tengan estructuras metálicas enterradas y/o sumergidas cerca del área en donde se vaya a alojar la tubería por proteger, con la finalidad de predecir cualquier problema de interferencia. La notificación debe contener, como mínimo, la información siguiente:

- La trayectoria que sigue el tendido de la tubería.
- La indicación de rutas de las tuberías a proteger y de cualquier estructura que se vaya a unir a la tubería para reducir alguna interferencia.
- El empleo de ánodos galvánicos o corriente impresa.
- La posición de la cama o ánodos.
- Las corrientes eléctricas esperadas.
- La fecha de puesta en operación del sistema.

El personal encargado de la protección catódica debe estar atento para detectar indicios de interferencia con una fuente generadora de corriente eléctrica vecina. En áreas donde se sospeche la presencia de corrientes eléctricas parásitas se deben efectuar los estudios correspondientes, dentro de los que se encuentran:

- La medición de potencial tubo/suelo;
- La medición del flujo de corriente eléctrica en la tubería interferida, y
- La medición de las variaciones en la corriente eléctrica de salida de la corriente eléctrica de interferencia.

Los indicios más comunes de interferencia con una fuente vecina son:

- Cambios de potencial tubo/suelo;
- Cambios de magnitud o dirección de la corriente eléctrica;

- Defectos en el recubrimiento, y
- Daños locales por corrosión en el ducto.

Para mitigar los efectos mutuos entre las líneas de transmisión eléctrica y las tuberías de acero enterradas, la separación entre la pata de la torre o sistema de tierras de la estructura de la línea de transmisión eléctrica y el ducto debe ser mayor de 10 m para líneas de transmisión eléctrica de 230 kV y menores.

Cuando no sea posible lograr las distancias mínimas recomendadas, se debe realizar un estudio del caso particular para reforzar el recubrimiento de la tubería donde sea necesario y, por ningún motivo, la distancia debe ser menor a 3 m respecto de la pata de la línea de transmisión eléctrica.

Se deben realizar estudios para evaluar los efectos que pudieran causar las descargas eléctricas de alto voltaje, corrientes eléctricas inducidas, cruces y paralelismo con torres de transmisión eléctrica y otras estructuras. Se deben realizar estudios y las correcciones necesarias para resolver los problemas de interferencia eléctrica.

#### **2.5.5.3. Cruzamientos<sup>R14</sup>**

Se debe conocer el funcionamiento del sistema de protección catódica en los puntos de cruzamiento como son: calles, carreteras, vías de ferrocarril y ríos, debido a que en estos lugares, si tienen camisa metálica, se pueden propiciar aterrizamientos que provocarían una reducción en la efectividad del sistema de protección catódica.

Cuando existan cruzamientos y/o paralelismos con otras tuberías se debe verificar la interacción entre ambos sistemas mediante mediciones de potencial tubo/suelo y establecer las medidas correctivas para minimizar los efectos de la interacción.

#### **2.5.5.4. Defectos en el recubrimiento anticorrosivo <sup>R14</sup>**

Debido a que el recubrimiento anticorrosivo de la tubería está expuesto a daños y deterioros por factores tales como: absorción de humedad, esfuerzos del terreno y desprendimiento catódico, se deben realizar investigaciones tendentes a identificar, cuantificar y valorar los defectos del recubrimiento dieléctrico y sus efectos en la demanda de corriente eléctrica del sistema de protección catódica seleccionado, estableciendo la conveniencia de repararlos y/o administrar la protección catódica en esas áreas desnudas de la tubería.

Cualquier tramo de la tubería que quede desnudo o expuesto al medio ambiente, debe ser examinado en búsqueda de evidencias de corrosión externa, y dependiendo del estado del recubrimiento dieléctrico, se tomen las acciones correctivas necesarias que garanticen la integridad de la tubería.

Cuando se detecten daños en el recubrimiento anticorrosivo que sean de una magnitud que justifique su reposición, se deben aplicar recubrimientos anticorrosivos compatibles con el existente.

### **2.6. MEJORAMIENTO DEL TERRENO <sup>R4</sup>**

Cuando un sistema eléctrico se expande, la que se creía era una baja resistencia a tierra, se hace mala.

Asimismo, con el uso cada vez mayor de tuberías no metálicas y, la caída en el nivel de aguas freáticas en muchos lados, ha resultado en mayores resistencias a tierra que las de diseño.

Cuando la resistencia a tierra no es lo suficientemente baja, hay algunos métodos para bajarla.

En el punto [2.4.5.], se ha visto que el utilizar varillas más largas y, el uso de muchas varillas en paralelo, baja la resistencia a tierra, pero, cuando lo anterior ya

no es posible, se tiene que mejorar el terreno mismo mediante productos químicos. Pero, tiene el inconveniente de ser una solución costosa y que bajo ciertas circunstancias se requiere de mantenimiento.

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

El relleno ideal debe compactarse fácilmente, ser no corrosivo y a la vez buen conductor eléctrico. La bentonita entre otros compuestos como el sulfato de magnesio o de sulfato de cobre, el chocoto o de compuestos químicos patentados (THOR GEL, el GEM de Erico, el GAP de Alta Conductividad 2000 S.A., 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%.

#### **2.6.1. MÉTODOS QUÍMICOS DE RELLENO <sup>R4</sup>**

Aparte del relleno con alguno de los compuestos mencionados, existen otros métodos químicos más.

En el primero, en un registro o hueco junto a la varilla se colocan unos 30 cm de los compuestos (Ver Figura 2.28.).

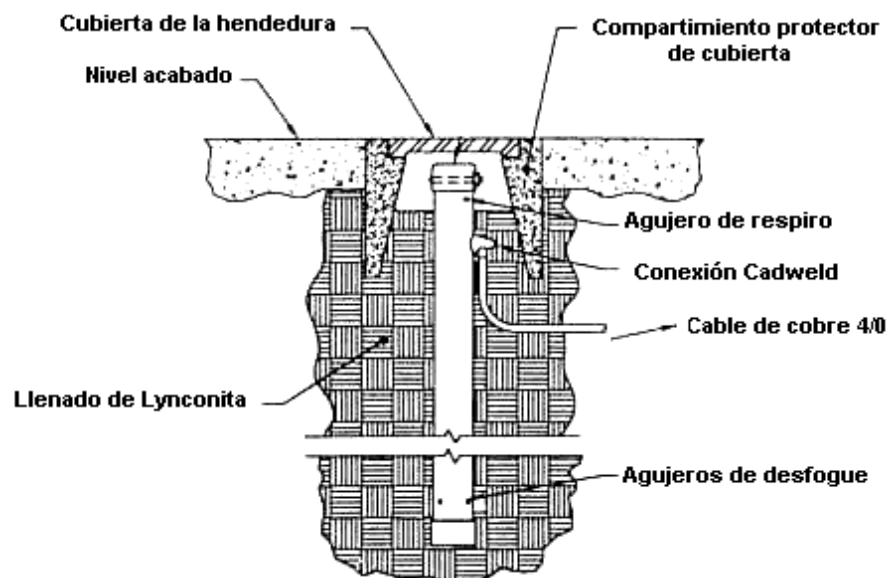


Figura 2.28. Relleno de lynconita alrededor del electrodo.

Este método es efectivo donde hay poco espacio como en banquetas o estacionamientos, pero es fácilmente demostrable que la resistencia a tierra obtenida, puede ser fácilmente obtenida de una manera más económica con electrodos múltiples.

El otro método es excavar una zanja alrededor de la varilla y llenarla con unos 20 o 40 kg de los compuestos químicos mencionados anteriormente, diluyéndolos con agua. Este proceso se puede observar en la Figura 2.29.

Por último, se puede utilizar uno de los cementos puzolánicos gráfiticos 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.

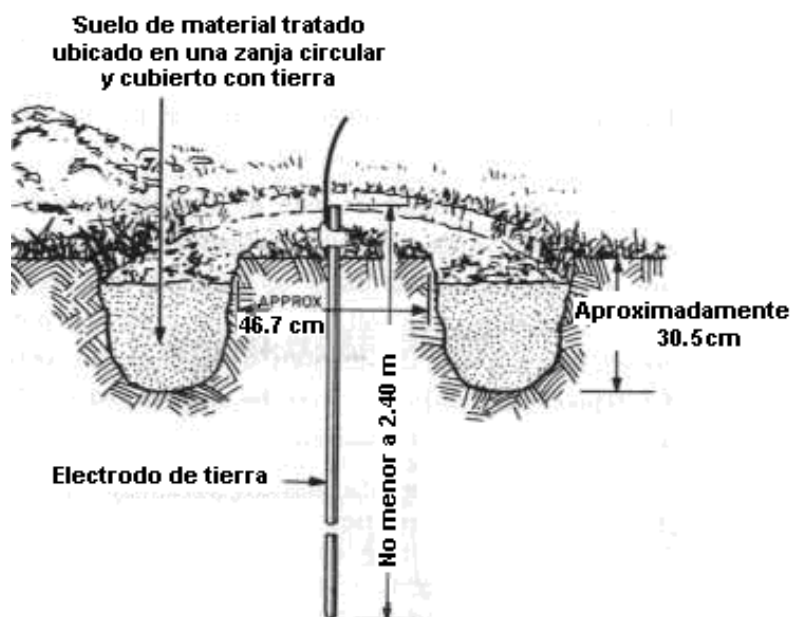


Figura 2.29. Relleno circular al electrodo.

El perforar y usar explosivos para hacer grietas en suelos rocosos, como se utiliza para cimentar las torres de líneas de transmisión, se ha utilizado en China para mejorar la resistividad de un terreno de alta resistividad, utilizando un material de baja resistividad para rellenar las grietas.

Como resultado del mejoramiento del terreno se observa en las mediciones que la variación estacional de la resistencia de un electrodo es mucho menor a la que pudiera obtenerse en un terreno natural no mejorado.

## **CAPÍTULO 3.**

### **TÉCNICAS DE MEDICIÓN**

#### **3.1. ALCANCE DEL ANÁLISIS**

Desde el punto de vista eléctrico, el análisis del terreno se lo realiza midiendo su resistividad en ohmios por metro ( $\Omega.m$ ); esta medida debe realizársela en las condiciones más desfavorables, esto es en la época de mayor sequía y a la hora del día de mayor calor (entre las 14 y 16 horas) puesto que entonces posee la mayor resistividad, por cuanto ha perdido la mayor humedad del terreno, la que actúa como el elemento difusor en el cual se desplazan los iones de conducción.

Para instalaciones de pequeña extensión, basta la medida en el sitio central de la instalación de la puesta a tierra, pero en áreas extensas como es el caso de este trabajo (aproximadamente 11 hectáreas en total), se requiere de muchas mediciones de resistividad en varios puntos, los mismos que deben cubrir razonablemente toda la extensión del terreno; y de dichas mediciones, se determinará la resistividad aparente o de diseño necesaria para la puesta a tierra normalizada para centros de transformación futuros en dicho lugar.

El objeto de realizar varias mediciones es verificar la homogeneidad del terreno. Cuando la coincidencia de medidas es razonable, se puede tomar como dato de diseño la mayor de ellas. Si no existe tal coincidencia se deberá definir el valor de diseño siguiendo alguna metodología, como por ejemplo la propuesta en el apartado [3.4.] Si la resistividad del suelo resulta muy elevada y además tomando en consideración aspectos económicos, se puede realizar tratamiento del suelo para reducir su resistividad.



## **3.2. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD<sup>R22</sup>**

### **3.2.1. MÉTODOS DE MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DE LOS TERRENOS<sup>R22</sup>**

Para determinar la resistencia de puesta a tierra de una instalación cualquiera que sea, se debe medir la resistividad del terreno, y luego comprobarla periódicamente en la época más desfavorable.

Si conocemos el valor de la resistividad del suelo con anterioridad a instalar o decidir el tipo de electrodo que vamos a utilizar, tendremos la ventaja de elegir el sistema que técnico-económicamente pueda ser más rentable.

Existen varios métodos para encontrar la resistividad del terreno entre los que destacamos los siguientes:

- Método de Wenner.
- Método de Schlumberger
- Método simétrico.
- Método de los dos puntos.
- Método de medición por muestras de suelos.

#### **3.2.1.1. Método de Wenner<sup>R2</sup>**

Generalmente la resistividad del terreno se mide por el método universal de cuatro puntos desarrollado por el Dr. Frank Wenner en 1915. El mismo resulta el más seguro en la práctica para medir la resistividad promedio de volúmenes extensos de suelos naturales.

Este método consiste en calcular la resistividad aparente del terreno colocando cuatro electrodos o picas en el suelo dispuestos en línea recta con la misma distancia «a» entre ellos y a una profundidad «b», luego estos se conectan a los

---

<sup>R22</sup> <http://members.tripod.com/JaimeVp/Electricidad/electric1.HTM>

bornes del instrumento de medida denominado telurómetro o Megger mediante cables aislados respectivos.

El espesor de la capa de terreno de la que estamos midiendo la resistividad es directamente proporcional a la separación entre picas, como se puede apreciar en la Figura 3.1., y su valor es:

$$h = \frac{3}{4} a$$

Donde:

$h$  = profundidad para la medida de la resistividad media

$a$  = separación entre electrodos.

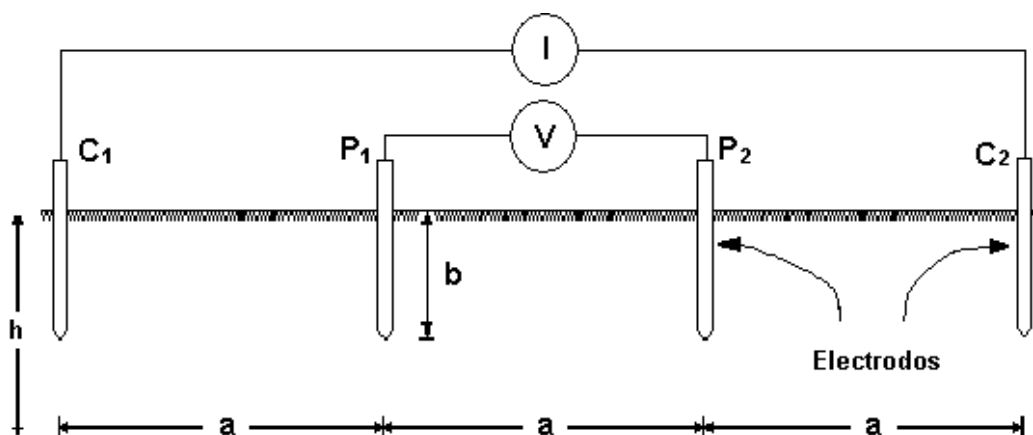


Figura. 3.1. Esquema de montaje por el Método de Wenner.

Sin embargo en algunas publicaciones toman el valor de  $h$  completamente igual a la separación entre electrodos; es decir  $h = a$ . (Resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos).

El principio de funcionamiento se da de la siguiente manera: al introducir una intensidad  $I$  en el terreno a través de los electrodos de corriente  $C_1$  y  $C_2$ , aparecerá en los electrodos de tensión  $P_1$  y  $P_2$  una diferencia de potencial  $V$  que mediremos con el aparato.

El medidor tiene una resistencia variable en su interior que es la que varía la intensidad **I** que se introduce en el terreno. El medidor también registra la tensión **V** que se detecta entre los bornes de tensión.

La relación entre la **V** y la **I** (Ley de Ohm), es el valor de la resistencia variable que se registra en el medidor:

$$R = \frac{V}{I}$$

Entonces el valor de la resistividad aparente que se calculará para un estrato de terreno de espesor *h*, será:

$$\rho = \frac{4\pi \cdot a \cdot R}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)} \quad (3.1.)$$

A una relación aproximada de  $a > 20 \cdot b$  se recomienda utilizar la siguiente expresión para encontrar la resistividad del suelo.

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R \quad (3.2.)$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad promedio en ohmios por metro ( $\Omega \cdot m$ ) a la profundidad «*h*»

*a* = Distancia de separación entre electrodos.

*R* = Lectura del telurómetro en ohmios ( $\Omega$ )

$\pi$  = 3.1415926...

No es necesario que las picas auxiliares sean muy largas, pues con introducirlas en el terreno 30 cm es suficiente para obtener unas medidas fiables y cumplir con la relación antes mencionada. Estos electrodos suelen venir con los equipos y miden alrededor de 60 cm de longitud.

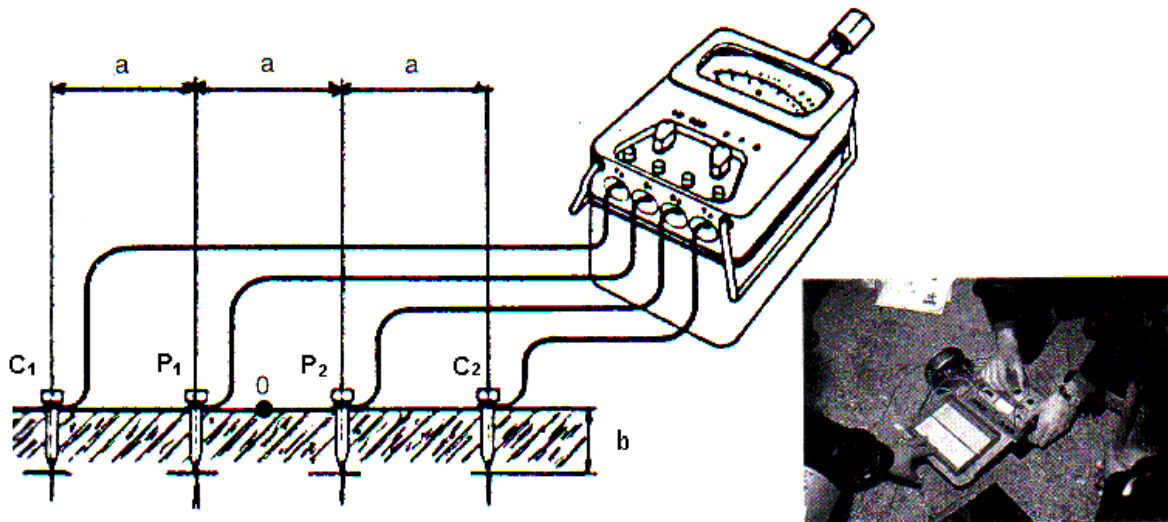


Figura. 3.2. Equipo y conexiones para la medición de la resistividad del suelo por el método de Wenner.

### 3.2.1.2. Método de Schlumberger<sup>R22</sup>

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

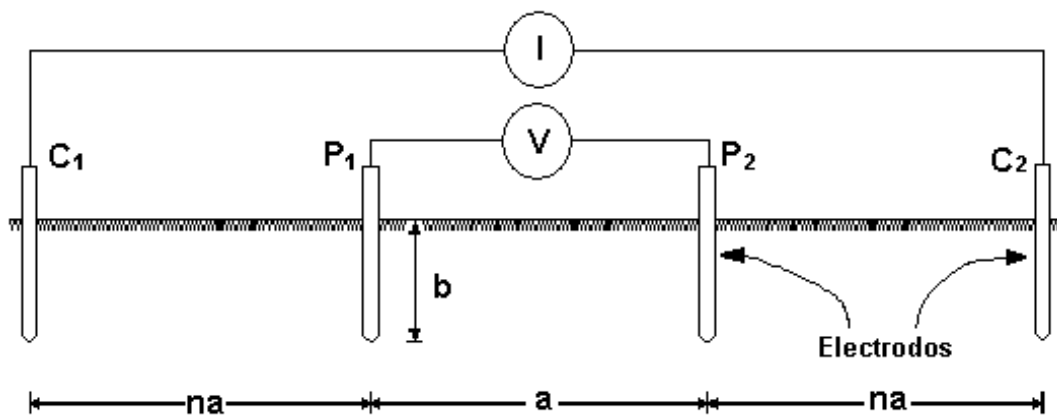


Figura. 3.3. Esquema de montaje por el Método de Schlumberger.

La configuración correspondiente a este método de medición se muestra en la Figura 3.3., y la resistividad está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = 2\pi \cdot R \cdot na \cdot (n+1) \quad (3.3.)$$

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

### 3.2.1.3. Sistema simétrico <sup>R2</sup>

También es una variante del método de Wenner, que se utiliza cuando las picas auxiliares no pueden clavarse a intervalos regulares.

Del mismo modo se utilizan dos electrodos de intensidad y dos de tensión que se conectan a los terminales del aparato. Las primeras serán las exteriores y las otras las interiores. Según se aprecia en la Figura 3.4., las cuatro picas se colocan simétricamente respecto de un punto central O debajo del cual queremos medir la resistividad del terreno.

La relación entre la distancia de los electrodos de intensidad y la profundidad o estrato de terreno a la cual se está midiendo la resistividad aparente es:

$$h = \frac{1}{2} L$$

Al igual que en el método de Wenner, se irán separando los electrodos de intensidad, y por lo tanto aumentando la distancia L, de este modo se conocerá el valor de la resistividad a una profundidad h mayor.

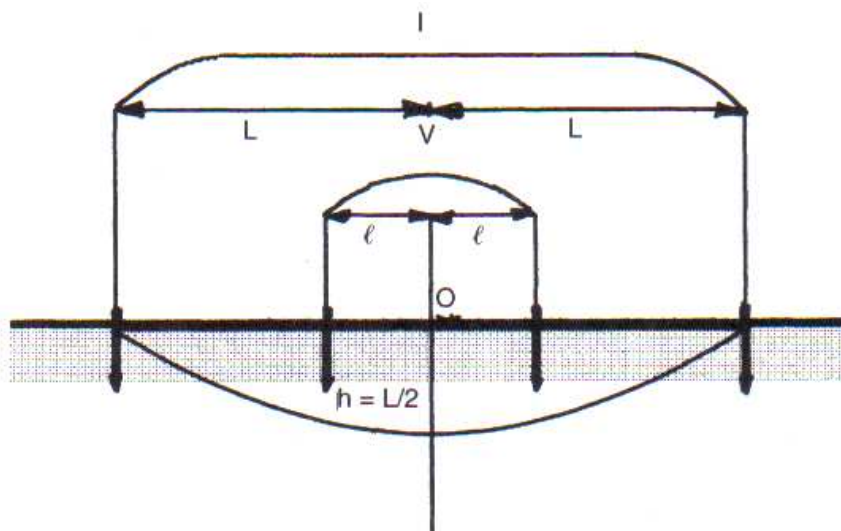


Figura. 3.4. Esquema de conexión del sistema simétrico.

Con este método se puede obtener el valor de la resistividad promedio de todas las capas del terreno entre la superficie y una profundidad  $h$ .

El valor de la resistividad aparente se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{\pi(L^2 - l^2)}{2l} \cdot R \quad (3.4.)$$

Si los electrodos auxiliares no se pueden clavar en el terreno por su dureza o por tratarse de terrenos pedregosos o suelos artificiales de hormigón o similar, se colocarán las picas tumbadas en el suelo sobre bayetas húmedas y después regadas abundantemente. Los valores medidos de la resistividad que se obtiene son muy similares a los que se obtendrían si se clavaran las picas.

#### 3.2.1.4. Método de los dos puntos

Tanto 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 ohmios por centímetro ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) a la tensión nominal de la batería.

#### **3.2.1.5. Método de Medición por muestras de suelos <sup>R22</sup>**

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.

#### **3.2.2. INTERPRETACIÓN Y UTILIZACIÓN PRÁCTICA DE LAS MEDIDAS <sup>R2</sup>**

Ya sea por cualquiera de los métodos explicados, se podrá determinar el valor de la resistividad del terreno, como paso previo para poder conocer la bondad de la puesta a tierra que se va a instalar posteriormente.

La bondad de una buena toma de tierra nos la va a dar el valor de la *resistencia de puesta a tierra* que, como se ha comentado anteriormente, es el valor de la resistencia que se opondrá al paso de la corriente eléctrica a tierra cuando se utiliza un electrodo introducido en el terreno. La combinación de la resistividad del terreno, el tipo de electrodo y el contacto electrodo-terreno será el que nos definirá el valor de la resistencia de puesta a tierra.

Utilizando los valores obtenidos de la resistividad aparente se podrá calcular la resistencia de puesta a tierra según el electrodo que se utilice.

### 3.2.2.1. Electrodo de pica <sup>R2</sup>

Se pueden plantear dos modalidades: en profundidad o en paralelo.

#### 3.2.2.1.1. Electrodo de pica en profundidad

Las picas serán de acero recubiertas de cobre, mayores de 14 ó mayores de 20 mm de diámetro y de 1.8, 2.0 ó 2.4 m de longitud empalmables o no [2.4.2.1.], con lo que la longitud dependerá del número de picas que se empalmen.

Una pica empalmable (Figura 3.5.), consta de las siguientes partes: sufridera, manguito de acoplamiento, electrodos; para empalmar dos picas basta desenroscar la punta de penetración de una y la sufridera de otra y enroscar.

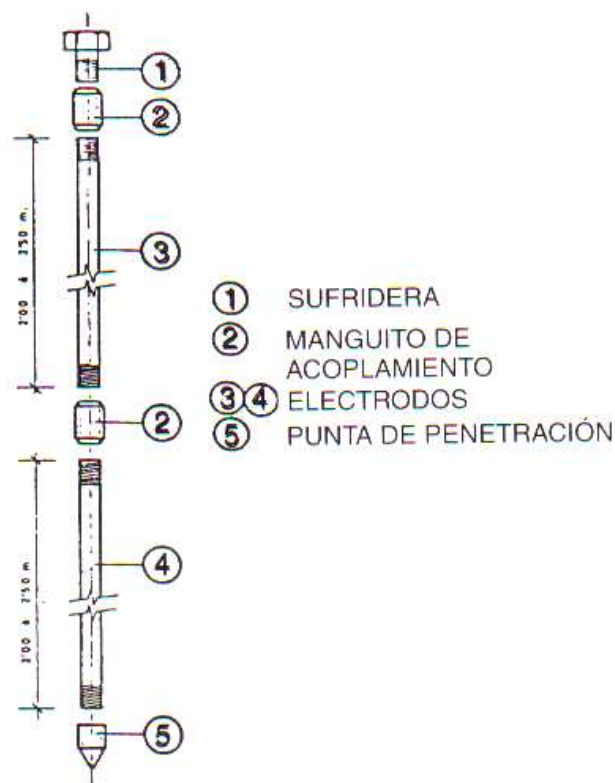


Figura. 3.5. Partes constitutivas de un electrodo de pica empalmable.



Según [R2] La resistencia de puesta a tierra en el caso de electrodos de pica, es la que se describe a continuación:

$$R = 0.366 \cdot \frac{\rho}{h} \cdot \log\left(\frac{3 \cdot h}{d}\right) \quad (3.4.)$$

Donde:

R = Resistencia de puesta a tierra en el caso de electrodos de pica en ohmios ( $\Omega$ )

$\rho$  = Resistividad del terreno en ohmios por metro ( $\Omega \cdot m$ )

h = Profundidad en metros (m)

d = Diámetro de la pica en metros (m).

En la Figura 3.6. se representa una escala logarítmica, en la que está indicado un haz de diagonales que representan la resistencia teórica de una pica de tierra clavada en un terreno uniforme de diferentes resistividades. Indica asimismo las capas de terreno que son más favorables para realizar una buena toma de tierra.

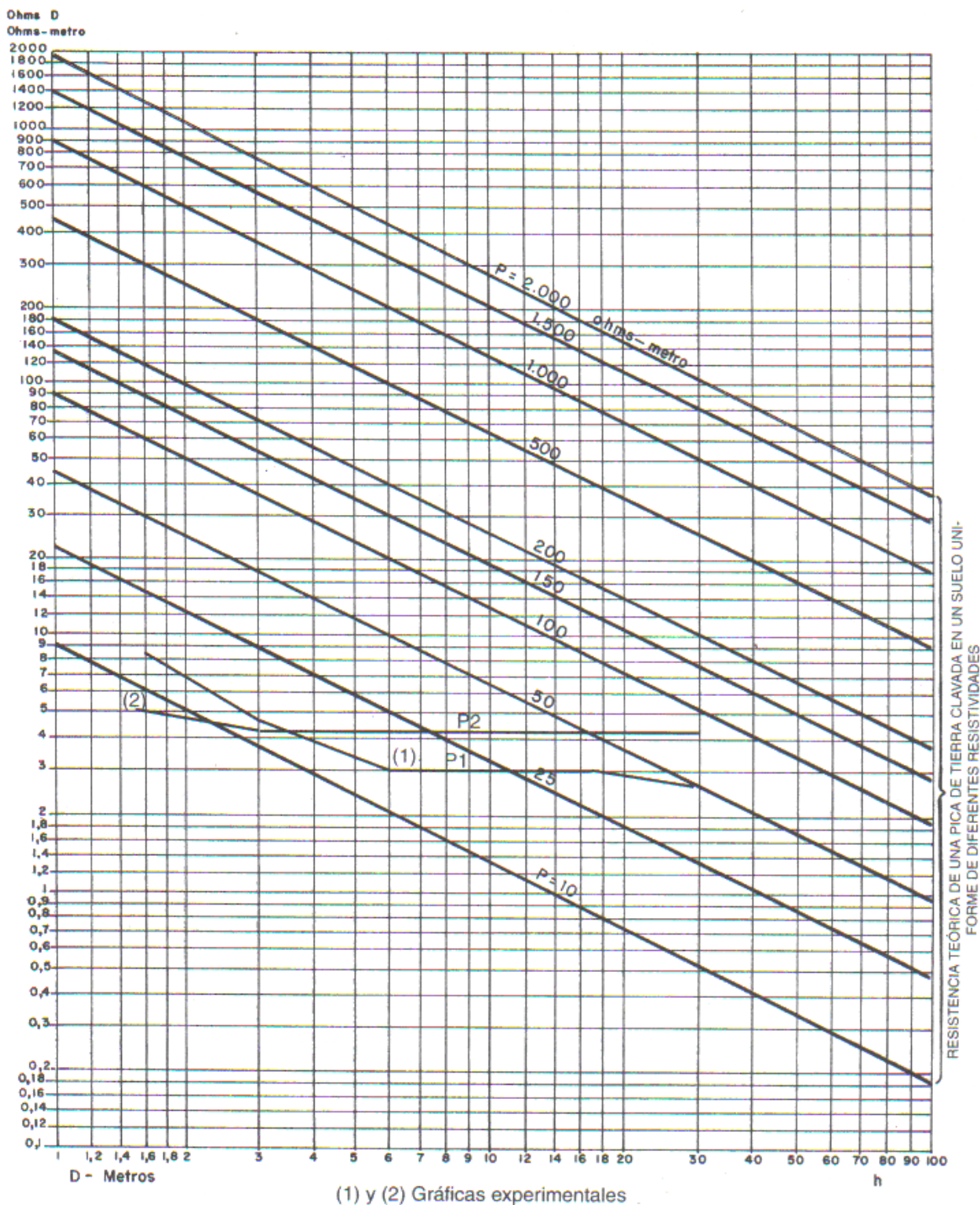


Figura. 3.6. Escala logarítmica de resistividades y resistencias para picas en función de la profundidad.

Se compara la gráfica experimental con el haz de diagonales; de forma general, mientras la pendiente de esta gráfica tenga la misma pendiente que el haz de diagonales, es más ventajoso utilizar una sola pica hincada en profundidad.

Cuando la curva tiende a la horizontalidad, quiere decir que no disminuye la resistencia al introducir más metros de pica en profundidad con lo que no es práctico ni rentable seguir profundizando. En este caso es preferible enterrar otras picas en paralelo, hasta una profundidad igual a la distancia en metros donde se produce la inflexión de la curva para tender a la horizontal como se puede observar en la Figura. 3.6. (1) y (2). En estos casos es preferible hundir un poco más (unos 50 cm) la pica de tierra con el fin de evitar las variaciones de resistividad en la superficie debido a los ciclos estacionales.

### 3.2.2.1.2. Utilización de picas en paralelo

Cuando las gráficas experimentales nos indican que no es ventajosa la utilización de una sola pica en profundidad, o cuando por la dureza del terreno es muy costoso su hincado, el valor de R puede disminuirse colocando varias picas en paralelo y uniéndolas mediante cable de cobre desnudo, que a su vez se enterrará en el terreno [2.4.5.3.].

La referencia [R23] considera que la separación de las picas de 2 m de longitud sea 4 m, es decir, 2 veces la longitud enterrada, y uniendo las picas con cable de cobre desnudo y enterrándolo, de forma que se convierta esta unión en un electrodo adicional.

**Tabla 3.1. Resistencia según el número de picas de tierra.**<sup>R23</sup>

N° DE PICAS DE TIERRA	LONGITUD	RESISTENCIA
1	2 m	R
2	2 m	R/2
3	2 m	R/3
4	2 m	R/4
n	2 m	R/n

<sup>R23</sup> NTE-IEP /1973.

### **3.2.2.2. Utilización de cables enterrados<sup>R2</sup>**

Al igual que en el caso de electrodos de pica, se construye una gráfica logarítmica donde se representa la resistividad y la resistencia de puesta a tierra en el caso de utilizar cable enterrado, bien rectilíneo o en forma de bucle.

#### *3.2.2.2.1. Cable enterrado rectilíneo*

Se coloca un cable rectilíneo enterrado en una zanja de al menos 60 cm de profundidad (preferiblemente 80 cm en climas continentales para evitar que se dispare la resistividad del terreno por debajo de los 0°C).

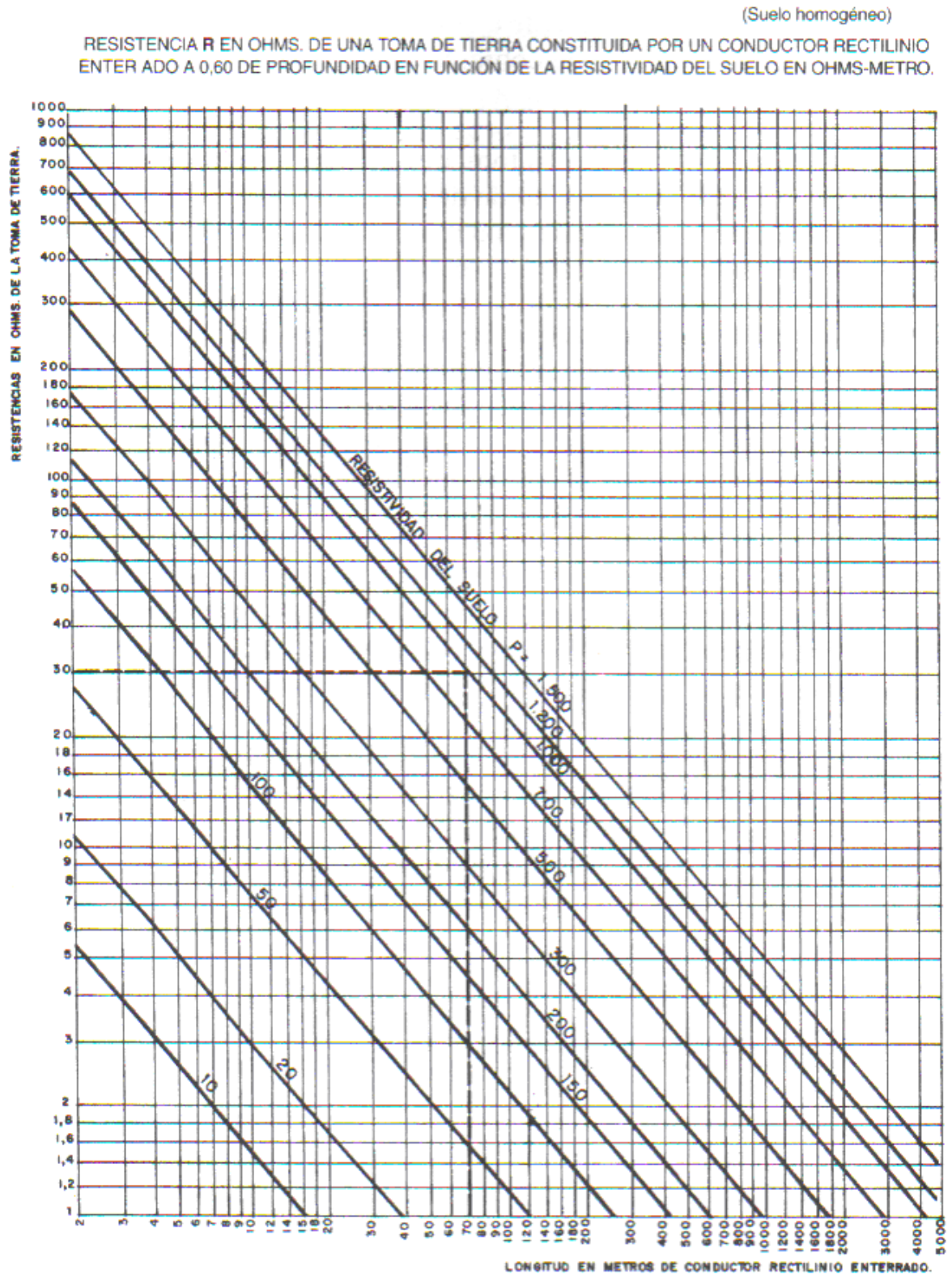


Figura. 3.7. Escala logarítmica de resistividades y resistencias para cable enterrado rectilíneo.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 3.7., dado un valor de resistividad del terreno (haz de diagonales) y un valor obtenido de resistencia de puesta a tierra R, obtenemos un valor en metros, de longitud de cable enterrado rectilíneo que se debe colocar en el terreno para obtener el valor de R.

#### *3.2.2.2.2. Cable enterrado en bucle*

El cable debe estar en bucle, es decir, unido el principio con el final. No es necesario, aunque si muy recomendable, que se coloque en forma circular. Se puede colocar en zanjas paralelas o en forma de elipse más o menos alargada. La única precaución que debemos seguir es que la distancia mínima entre los cables (ejes de las zanjas) sea de 5 m para evitar interferencias y unir el principio con el final del cable.

Los cables pueden ir estirados o haciendo zig-zag, pero de forma que la curvatura del cable sea siempre superior a  $180^\circ$ . A efectos de cálculo la longitud será la del cable enterrado y no la de la zanja construida.

(Suelo homogéneo)  
 RESISTENCIA  $R$  EN OHMS. DE UNA TOMA DE TIERRA CONSTITUIDA POR UN BUCLE CIRCULAR  
 EN FUNCIÓN DE LA RESISTIVIDAD  $P$ . DEL SUELO EN OHMS-METRO.

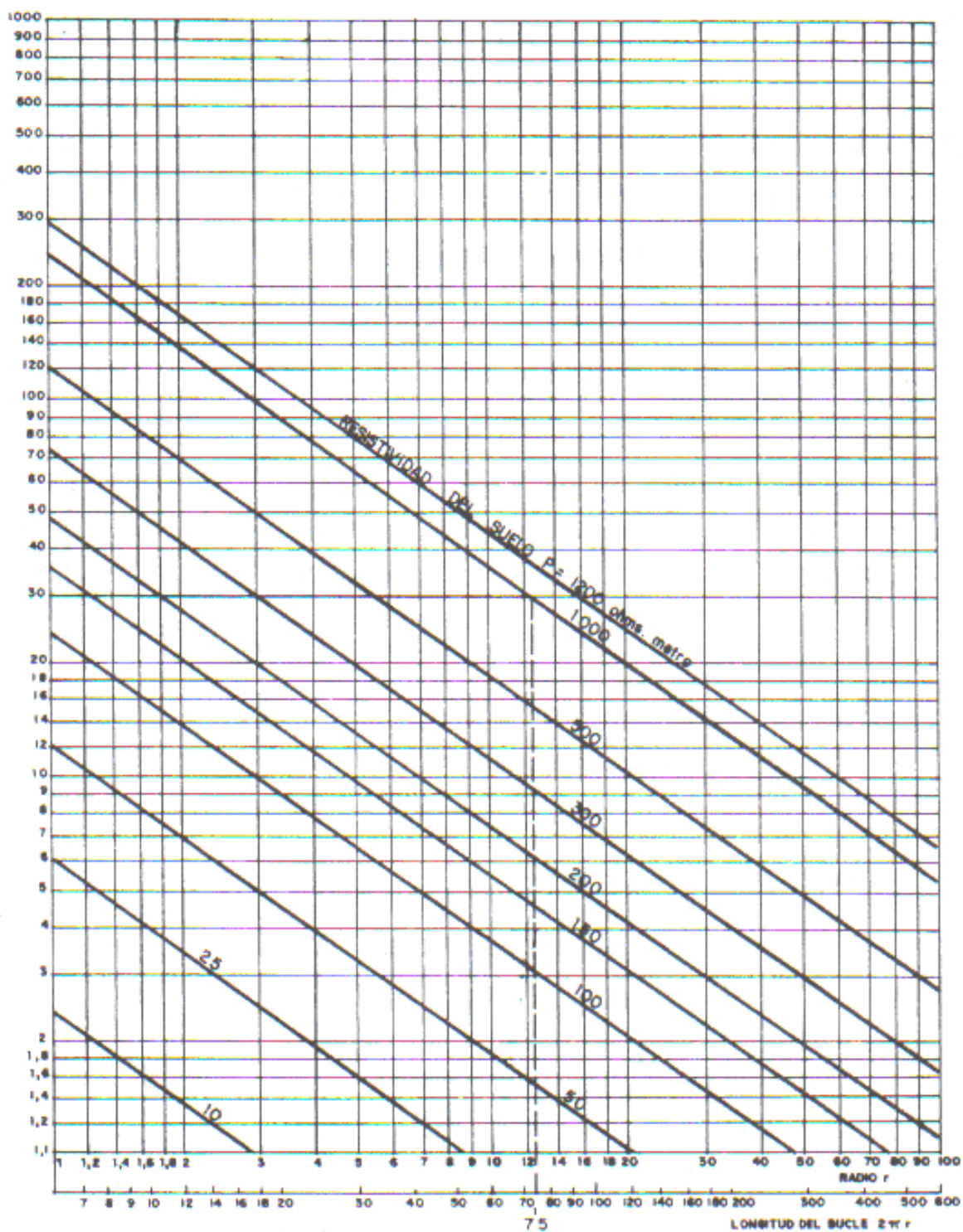


Figura. 3.8. Escala logarítmica de resistividades y resistencias para cable enterrado en bucle.

### **3.2.3. MAPAS CON LÍNEAS DE EQUIRRESISTIVIDAD<sup>R2</sup>**

Se definen como líneas de equirresistividad aquellas que resultan de unir puntos de igual resistividad formando un mapa con los valores obtenidos por medición directa en el campo. El mapa se realiza después de hacer un número significativo de mediciones, que dependerán de las características del terreno y de su mayor o menor homogeneidad.

El estudio del mapa nos puede facilitar el valor aproximado de la resistividad de todo el terreno sin más que hacer una muestra representativa de mediciones y, lo que es más importante, poder localizar sobre el plano el lugar más idóneo para la ubicación de la toma de tierra, que debe ser el que tenga valores de resistividad más bajos.

Cuando se trabaja de forma continuada en una zona, es conveniente ir almacenando estas referencias o mapas, pues con el tiempo facilitan el trabajo al ir conociendo el comportamiento eléctrico de grandes zonas y saber a priori la mayor o menor dificultad de hacer una instalación de puesta a tierra.

### **3.3. CORRECCIÓN DE LAS MEDICIONES<sup>R2</sup>**

Como se trata de realizar medidas en distintos puntos, la hora del día en que dichas medidas se realizan influye en los resultados, conforme se indicó previamente; por lo tanto, para referirse a una base común conviene designar uno de los electrodos medidos como patrón (o crearlo si es del caso).

La medida del electrodo patrón se toma como base de comparación, corrigiéndose las otras en la misma proporción (corrección lineal) en que esta medida varíe en el día o en el tiempo transcurrido. La resistividad corregida para todos los puntos corresponderá al máximo valor (medido o razonablemente estimado) del electrodo patrón.



### 3.4. SUELOS HETEROGÉNEOS

Los suelos heterogéneos, con varios estratos o capas, pueden, en términos prácticos, ser tratados como un suelo formado por dos estratos de diferente resistividad (superficial  $\rho_1$ , y profunda  $\rho_2$ ). Cuando se realiza la medición de la resistividad de este tipo de suelos, se obtiene una resistividad aparente  $\rho_a$ .

#### 3.4.1. EVALUACIÓN DE LAS CURVAS

Para el diseño de una puesta a tierra el suelo se lo puede considerar de dos capas, esto con el fin de no complicar los cálculos, sin embargo no quiere decir que no se pueda calcular para más de dos estratos.

##### 3.4.1.1. Modelo de dos suelos con $\rho_1 < \rho_2$

La conducción de corriente, durante la medición de la resistividad empleando cuatro electrodos, cuando  $\rho_1 < \rho_2$  es como se indica en la Figura 3.9. y los valores de resistividad aparente medidos  $\rho_a$  son como se muestran en la Figura 3.10.

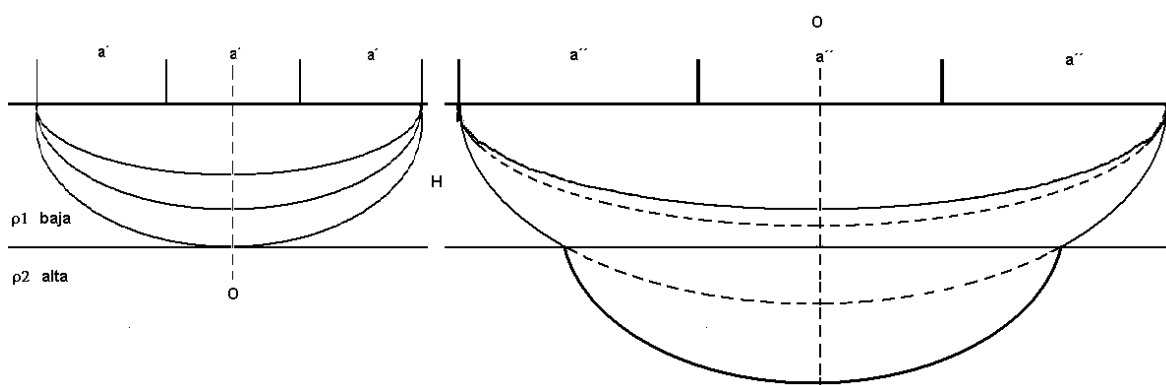


Figura. 3.9. Modelo de dos suelos con  $\rho_1 < \rho_2$ .

En la figura anterior se tiene dos suelos, de los cuales el superficial es de menor resistividad que el inferior, además se aprecia las líneas de corriente, que para valores bajos de «a» no atraviesan la segunda capa, en cambio para

separaciones grandes entre los electrodos de medición, sí la atraviesan, aumentando por este motivo la resistividad aparente  $\rho_a$ , este efecto puede apreciarse en las figuras 3.9. y 3.11

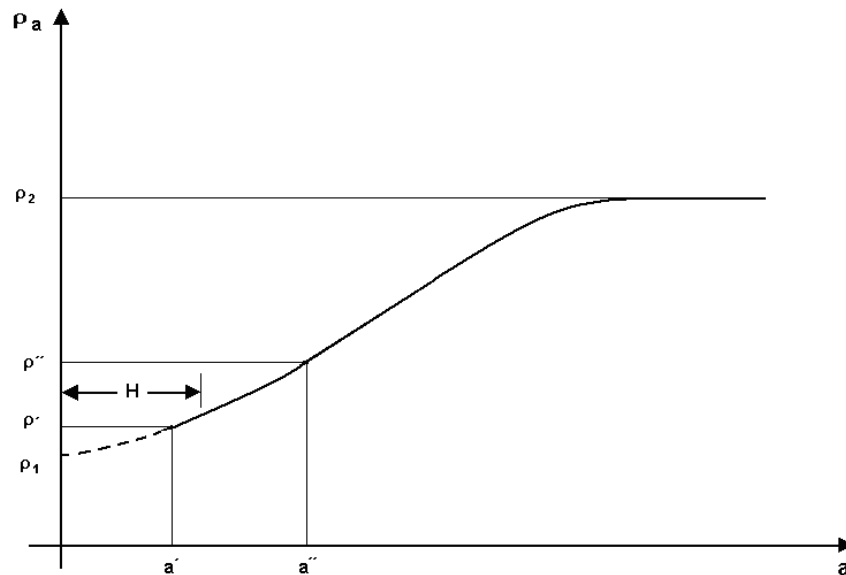


Figura. 3.10. Resistividad aparente  $\rho_a$ , cuando  $\rho_1 < \rho_2$ .

### 3.4.1.2. Modelo de dos suelos con $\rho_1 > \rho_2$

En la Figura 3.11. se tiene que la resistividad del suelo de la superficie, es más alta que la del más profundo,  $\rho_1 > \rho_2$ .

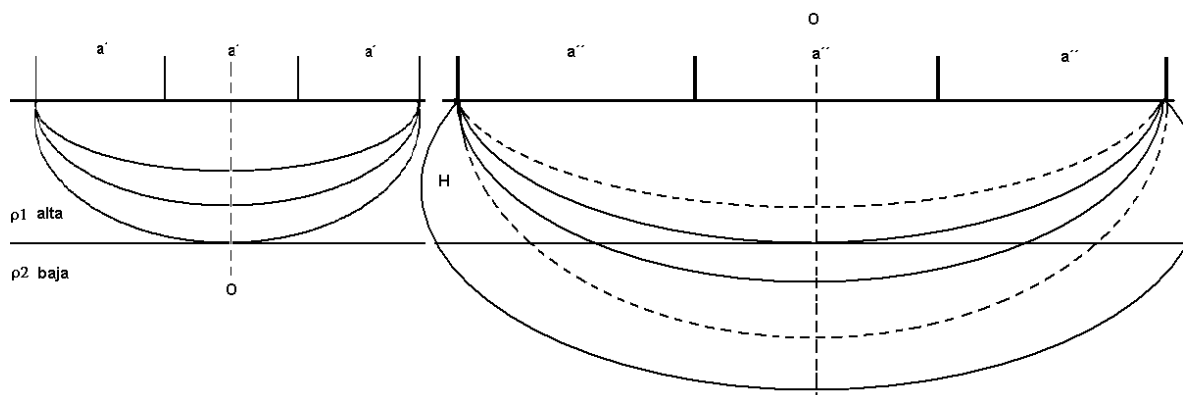


Figura. 3.11. Modelo de dos suelos con  $\rho_1 > \rho_2$ .

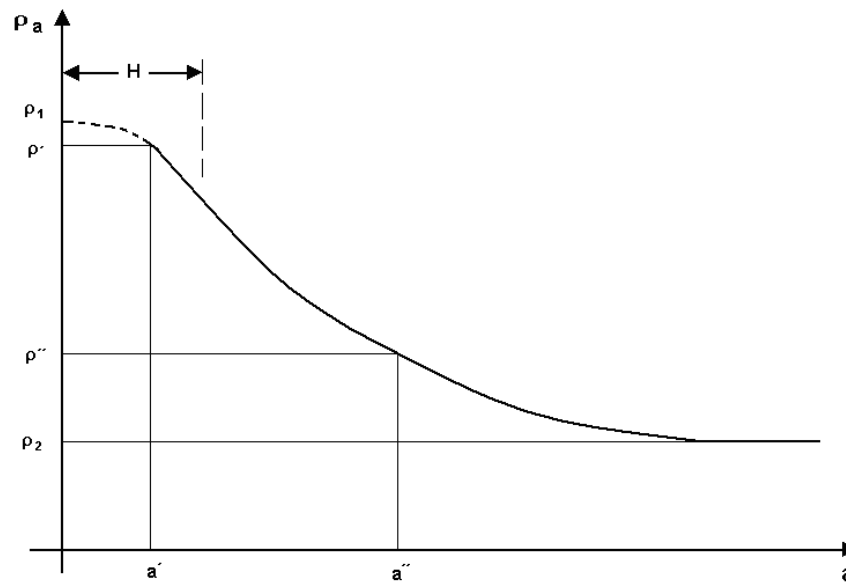


Figura. 3.12. Resistividad aparente  $\rho_a$ , cuando  $\rho_1 > \rho_2$ .

### 3.4.2. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS <sup>R24</sup>

Para determinar  $\rho_1$  se extrapola la curva  $\rho_a = f(a)$  para pequeñas distancias de «a» y se tiene la resistividad en la superficie  $\rho_1$ ; para  $\rho_2$  se hace lo mismo, pero para distancias mayores de «a», esto se puede observar en las figuras 3.10. y 3.12., realizado esto se puede hacer  $\frac{\rho_2}{\rho_1} = K$  y utilizar las curvas teóricas del ANEXO N° 2, y la curva del ANEXO N° 3. (Método de Sunde)<sup>R8</sup>

Las curvas teóricas de los anexos N° 2 y N° 3 sirven para encontrar la altura «H» a la que se encuentra la capa  $\rho_2$ ; se puede tomar cuando la relación  $\frac{a}{H} = k$  y ver a que razón corresponde en la resistividad aparente  $\frac{\rho_a}{\rho_1} = X$ , encontrada esta razón se va a la curva de campo y se hace  $\rho_1 \cdot X = \rho_a$ , en la curva de campo se localiza  $\rho_a$  y de esta manera H.

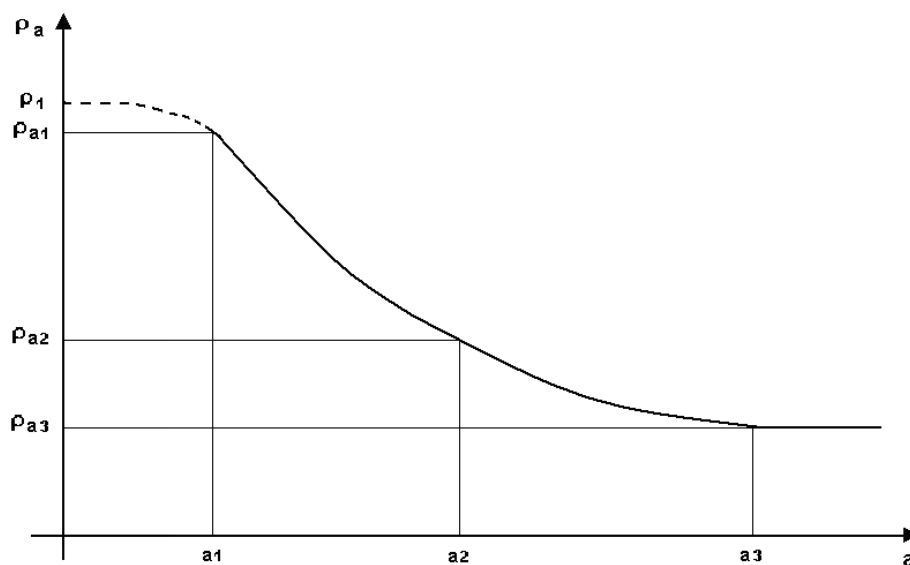


Figura. 3.13. Extrapolarción de  $\rho_a$  para encontrar  $\rho_1$ .

El método más preciso, es el siguiente: por extrapolarción se encuentra el valor  $\rho_1$ , como se muestra en la Figura 3.13.; se toma un valor «a», de la curva de campo se determina el valor  $\rho_{a1}$ , se hace  $\frac{\rho_{a1}}{\rho_1}$ , con este valor se va a las curvas teóricas y se ve que existen una infinidad de valores  $\frac{a}{H}$  y K; se toma algunos valores de  $\frac{a}{H}$ , se saca su inverso y se multiplica por el valor de K, de esta manera se consigue una serie de datos H y K que sirve para determinar la curva  $H_1 = f(K)$ ; se toma otro valor de «a<sub>2</sub>» y se determina en la curva otro valor de  $\rho_{a2}$ , nuevamente se hace  $\frac{\rho_{a2}}{\rho_1}$ , se encuentra otro conjunto de valores H y K que sirve para graficar otra curva,  $H_2 = f(K)$ ; por último se toma otro valor de «a<sub>3</sub>» se procede igual que para los dos casos anteriores y se grafica la curva  $H_3 = f(K)$ .

El punto donde se cortan las tres curvas será el valor de H y de K, o en su defecto si forman un triángulo, se tomará el punto medio; esto se representa en las figuras 3.14.a y 3.14.b.

R24 “Experimentación en Suelos para el Diseño de Mallas de Tierra”. FREIRE, Jaime. E.P.N. 1978.

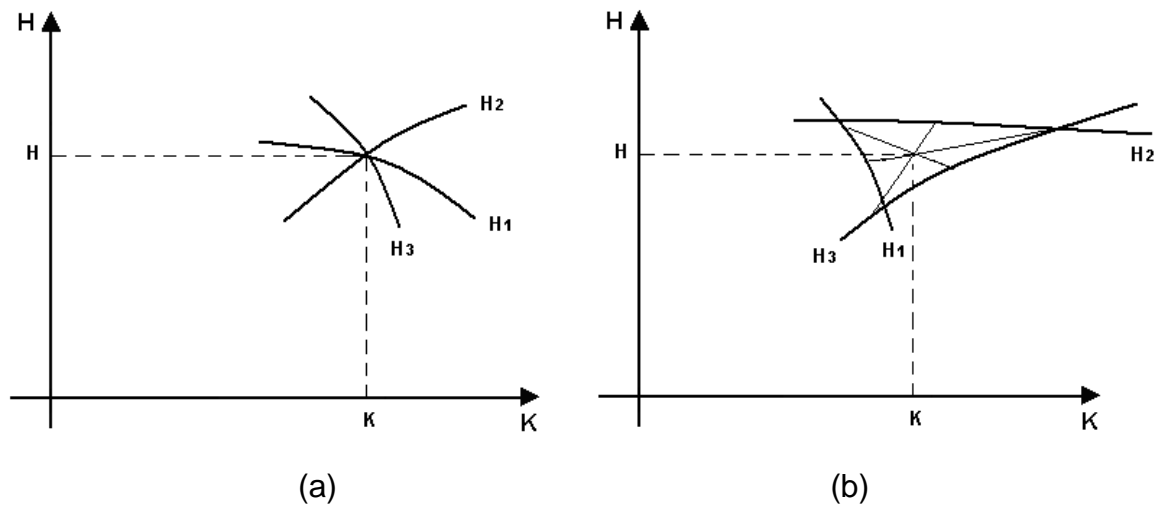


Figura 3.14. Determinación de los valores de H y de K.

(a) Cuando es un punto; (b) Cuando es un triángulo.

El valor de K dependerá de la curva que se ha tomado, si es del ANEXO N° 2. entonces  $K = \rho_2 / \rho_1$  y luego la del ANEXO N° 3. Haciendo variaciones de

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \text{ se determina los parámetros necesarios, o sea } \rho_1, \rho_2 \text{ y H.}$$

El procedimiento es similar para suelos múltiples, o de varias capas, en ese caso se utilizará curvas semejantes a las del ANEXO N° 2., como curvas teóricas.

Cuando se quiere determinar la altura H en forma aproximada, sin mayor precisión, se busca el punto de inflexión de la curva de campo, o sea cuando

$$\frac{d^2 \rho_a / \rho_1}{\rho_a^2} = 0 \text{ se encuentra este punto y por lo tanto «a», a este valor se lo}$$

multiplica por 2/3 y se tiene el valor de H aproximado.

$$H \approx \frac{2}{3} \cdot a$$

### 3.4.3. RELACIÓN ENTRE LA RESISTIVIDAD APARENTE ( $\rho_a$ ) Y LA RESISTIVIDAD DE LA PRIMERA CAPA ( $\rho_1$ )<sup>R25</sup>

El Dr. G. Tagg, considera que hay una relación entre la resistividad aparente  $\rho_a$  medida y la resistividad  $\rho_1$  de la primera capa, dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 4 \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[ \frac{k^n}{\left[ 1 + 4 \cdot \left( \frac{n \cdot H}{a} \right)^2 \right]^{1/2}} - \frac{k^n}{\left[ 4 \cdot \left( 1 + \left( \frac{n \cdot H}{a} \right)^2 \right) \right]^{1/2}} \right] \quad (3.6.)$$

Donde:

$\rho_a$  = Resistividad aparente del terreno en ohmios por metro ( $\Omega \cdot m$ )

H = Espesor de la primera capa en metros (m)

$$n = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Según la expresión (3.6.), el espesor o profundidad de la primera capa y la resistividad de la segunda, son también factores que afectan el valor de la resistividad aparente y consecuentemente el de la resistencia del electrodo enterrado.

Para considerar su efecto debe analizarse la magnitud de  $\rho_1$  y  $\rho_2$ , de H, así como la distribución de corriente en estos suelos, todo lo cual involucra un trabajo de detalle que solo conviene realizarlo por medio de programas computacionales, lo cual está fuera del alcance de este proyecto. En suelos con resistividades no muy disímiles, el empleo de la resistividad aparente  $\rho_a$  para diseño es apropiado.

<sup>R25</sup> AYORA, Paúl. "Apuntes de Diseño de Alto Voltaje" Capítulo I (Instalaciones de Puesta a Tierra).

### 3.4.4. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y SUS SOLUCIONES<sup>R24</sup>

La condición ideal de un suelo de capas múltiples sería:

- Que su superficie sea horizontal y lisa.
- Que las capas del suelo sean paralelas a la superficie del suelo de la capa superior.
- Que horizontalmente se extienda hasta el infinito.

Estas condiciones son muy difíciles de conseguir en la realidad, esto sería la razón del porque los resultados salen, la mayoría de veces muy distorsionados.

La solución aconsejada, es tomar suficiente información del lugar donde se realizan las medidas, mediante croquis, fotografías o una visita personal del procesador de datos de la resistividad, a fin de tener presente los factores que afectarán a las medidas y se pueda limitar un margen de error.

Si la naturaleza del terreno en el cual se quiere efectuar las mediciones es poco accesible, presenta problemas de vegetación, es pantanoso o demasiado rocoso, etc., en ese caso es conveniente visitar el terreno en el cual se va a efectuar el estudio, a fin de determinar los lugares más convenientes para efectuar las mediciones, especificar la clase de equipo que se va a utilizar, especialmente los tipos de electrodos; por ejemplo para lugares pantanosos o de vegetación abundante, es preferible utilizar como electrodos, varillas largas con marcas o distintivos de colores que permitan ubicarlos rápidamente, además cable flexible con buen aislamiento.

Cuando se desea encontrar la resistividad de la superficie del terreno, se tiene problemas de precisión. A pesar de que la resistividad superficial es sumamente variable con las condiciones atmosféricas, como se vio en el capítulo II, es necesario determinar la resistividad con bastante exactitud, para que los demás parámetros que dependen de la resistividad de la superficie, se puedan también determinar con cierta precisión. La solución es elegir la resistividad mediante

separaciones pequeñas entre los electrodos para obtener mayor eficacia en las extrapolaciones (como se muestran en las figuras 3.10. y 3.12. Si se utilizan varillas en la medición de la resistividad, hay que tener en cuenta las características de los electrodos de medida.

### **3.5. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un terrómetro (llamado en otros países: telurómetro) o *Megger* de tierras de cuatro terminales (como se detallo en el inciso [3.2.1.1.].

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

Los terrómetros deben inyectar una corriente de frecuencia que no sea de 60 Hz para evitar se midan voltajes y corrientes que no se deban al aparato sino a ruidos eléctricos. Por ejemplo, si estamos cerca de una subestación o de una línea en servicio, y vamos a realizar mediciones de resistividad y resistencia de tierra, con un aparato de 60 Hz, dichos sistemas van a inducir corrientes por el suelo debido a los campos electromagnéticos de 60 Hz y darán una lectura errónea.

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

También estos aparatos de repente tienen oscilaciones en sus lecturas y no es posible leerlas.

Un aparato inteligente, lleva conductores blindados, coaxiales, tiene sistemas de filtraje, de análisis y mide lo que halla, pero esa información la analiza, la filtra y luego la deduce. Por ejemplo, para hacer una medición manda una señal de 100 Hz y mide; luego manda otra señal de 150 Hz y vuelve a medir y puede seguir



enviando otras altas frecuencias hasta que los valores van siendo similares, forma una estadística y obtiene un promedio.

Los terrómetros son analógicos o digitales y deben contener cuatro carretes de cable calibre 14 AWG normalmente. Para enrollamiento rápido se recomienda construir un sistema devanador que permita reducir el tiempo de la medición.

También traen 4 electrodos de material con la dureza suficiente para ser hincados en la tierra con mazo. Son de una longitud aproximada de 60 cm y un diámetro de 16 mm. Además de lo anterior se hace necesario contar con una cinta no metálica de 50 m aproximadamente.

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

Como la medición obtenida por un terrómetro es puntual, se deben hacer mediciones en un sentido, en otro a 90° del primero, y, en el sentido de las diagonales.

En la medición de resistividad de un terreno, es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es una práctica común de una tabla con lecturas, el eliminar los valores que estén 50% arriba o abajo del promedio aritmético de todos los valores capturados.



Figura 3.15. Megger de Cuatro Terminales. Cortesía AVO International

### 3.6. PERFIL DE RESISTIVIDAD<sup>R4</sup>

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

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

La gráfica resultante de trazar el promedio de las mediciones de resistividad «p» contra distancia entre electrodos «a» se denomina perfil de resistividad aparente del terreno.

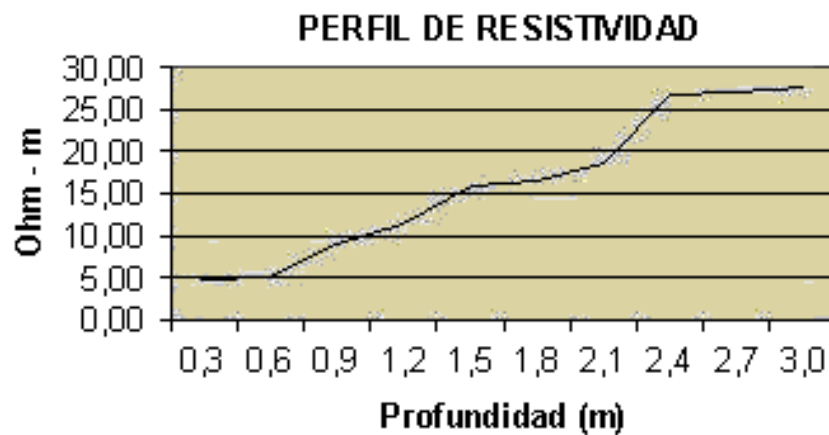


Figura 3.16. Perfil de resistividad.

#### 3.6.1. TIPOS DE PERFILES DE RESISTIVIDAD<sup>R4</sup>

##### 3.6.1.1. Perfil de resistividad ascendente<sup>R4</sup>

Capa superficial arcillosa y húmeda, capa inferior rocosa. Para simular su comportamiento se requiere de por lo menos utilizar los valores de 2 capas.



Figura 3.17. Perfil de resistividad ascendente.

### 3.6.1.2. Perfil de resistividad descendente<sup>R4</sup>

Capa superficial muy seca, capa inferior arenosa. Para simular su comportamiento se requiere de por lo menos utilizar los valores de 2 capas.



Figura 3.18. Perfil de resistividad descendente.

### 3.6.1.3. Perfil de resistividad plano<sup>R4</sup>

Terreno rocoso y seco. Para simular su comportamiento se puede utilizar la resistividad promedio.



Figura 3.19. Perfil de resistividad plano.

Existen programas para elaborar modelos del terreno con los datos de las mediciones. La Figura 3.20. muestra el programa *RESAP-Soil Resistivity Analysis* de la compañía Safe Engineering Services and Technologies Ltd.

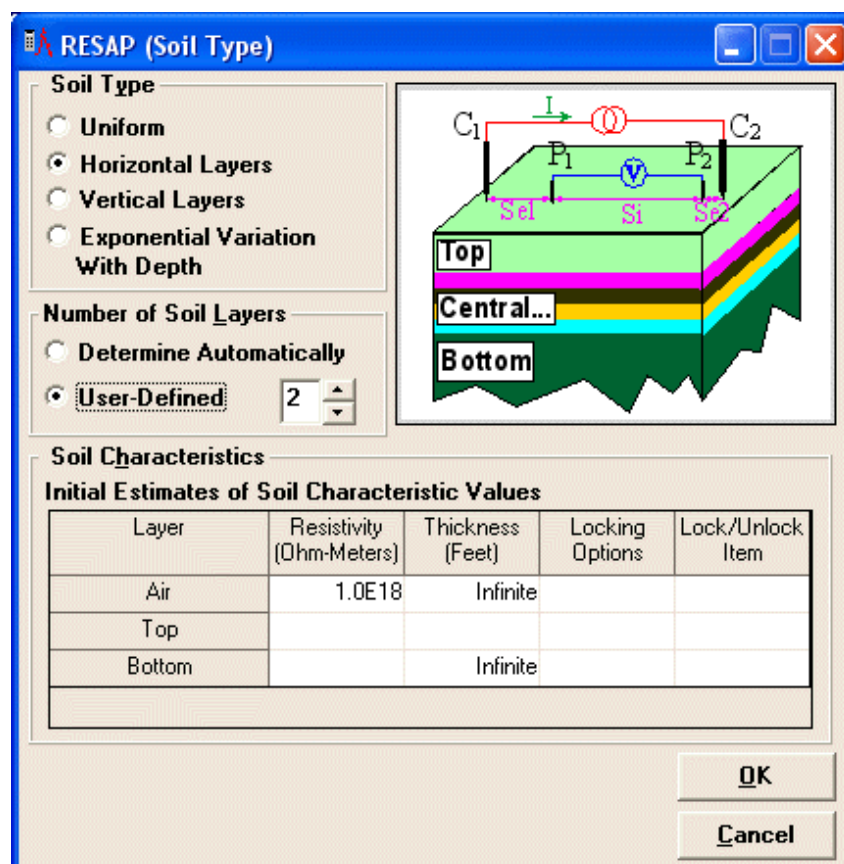


Figura 3.20. Ventana principal del programa RESAP.

## **CAPÍTULO 4.**

### **PRUEBAS, MEDICIONES Y RESULTADOS**

#### **4.1. PROBLEMAS PREVIOS A LA MEDICIÓN**

Cuando se va a diseñar un sistema de puesta a tierra se requiere obtener varias mediciones de campo entre ellas la obtención de la resistividad del terreno, el conocimiento de la temperatura del ambiente, de la hora en la que se efectúa la medición, entre otras acepciones, como ya se ha explicado anteriormente en los capítulos predecesores, es necesario para ello, superar los inconvenientes previos a dicha evaluación.

Estos problemas que son muy comunes y que suelen presentarse antes de efectuar trabajos de medición al aire libre en grandes dimensiones suelen aparecer en la determinación exacta del lugar en donde se procederá la investigación, así como la especificación cuantitativa y cualitativa de los equipos de medida, con el fin de remediar futuros errores en la toma de valores y al mismo tiempo lograr las mejores condiciones de trabajo posibles.

##### **4.1.1. ESPECIFICACIÓN DEL LUGAR A MEDIR**

###### **4.1.1.1. Ubicación general del lugar**

El nuevo aeropuerto internacional de Quito «NAIQ» se encuentra ubicado en la parroquia de Tababela perteneciente al distrito metropolitano de Quito, aproximadamente a 30 km de la capital por la ramal de la Panamericana que se despliega de la autopista Interoceánica desde la Y de Pifo en la parte nororiental de la ciudad y que continua por el conector Alpachaca dos kilómetros y medio hacia el norte. (Observar ANEXO N° 4).

#### 4.1.1.2. Coordenadas geográficas del lugar <sup>R26</sup>

Toda la pista, la terminal de pasajeros, en sí el nuevo aeropuerto internacional de Quito se establece casi en su mayoría a través del paralelo cero o línea ecuatorial, principalmente sobre las mediciones realizadas por la misión geodésica franco-española en el siglo XVIII, que sirvieron como soporte para el cálculo de la longitud del meridiano terrestre (punto base, pirámide de Caraburo al norte). Las coordenadas exactas de la nueva terminal aérea son las siguientes: 0 + 000 E 794829.295 N 9984582.8673 + 600 E 794674.017 N 9988179.517.

#### 4.1.1.3. Extensión del lugar <sup>R26</sup>

La pista futura tendrá longitudinalmente alrededor de 4100 m + 500 m al norte, un total de 4600 m de largo.

#### 4.1.1.4. Niveles ceraúnicos <sup>R27</sup>

Se llama con este nombre a la cantidad de tormentas eléctricas (en las que se escuchan truenos) que hay en un año. El número de estos fenómenos tiene indudable relación con el número de descargas que ocurren por unidad de superficie y unidad de tiempo. Es más representativo el número de descargas eléctricas por unidad de superficie (km<sup>2</sup>) y por año, que mide la probabilidad que tiene un punto del terreno de ser alcanzado por una descarga atmosférica.

En la zona del nuevo aeropuerto internacional de Quito, las mediciones realizadas durante algunos años (datos proporcionados por la DAC) arrojan un resultado de 8 a 11 descargas / km<sup>2</sup> año.

Dichos valores demuestran que se trata de un lugar que no se encuentra propenso a tener descargas en un año, dando mayor seguridad a los equipos que se instalen en el futuro y evitando gastos en protección de los instrumentos.

---

<sup>R26</sup> LARROSA, Fernando. "Información General del NAIQ" AECON Andrade Gutiérrez.

<sup>R27</sup> DAC "Dirección de Aviación Civil del Ecuador" (Archivos de Tormentas en la parroquia Tababela)

#### 4.1.2. EQUIPOS REQUERIDOS PARA LA MEDICIÓN

Gracias al asesoramiento y apoyo de los ingenieros Fausto Avilés y Mario Barba, principales encargados del Laboratorio de Alto Voltaje de la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional, se pudo acceder de manera ágil y satisfactoria a los equipos de medición de resistividad, entre ellos el terrómetro Erdungsmesser, las picas de cobre-acero y los cables aislados independientes, evitando de esta manera un gasto adicional en el alquiler o compra de los mismos.

##### 4.1.2.2. Terrómetro Erdungsmesser

El terrómetro requerido para las pruebas y las mediciones de campo correspondientes a la resistividad del terreno, en la Escuela Politécnica Nacional y en el nuevo aeropuerto internacional de Quito, respectivamente, corresponde al equipo analógico denominado Erdungsmesser de marca SIEMENS, cuyo dato de placa se observa en la Figura 4.1.

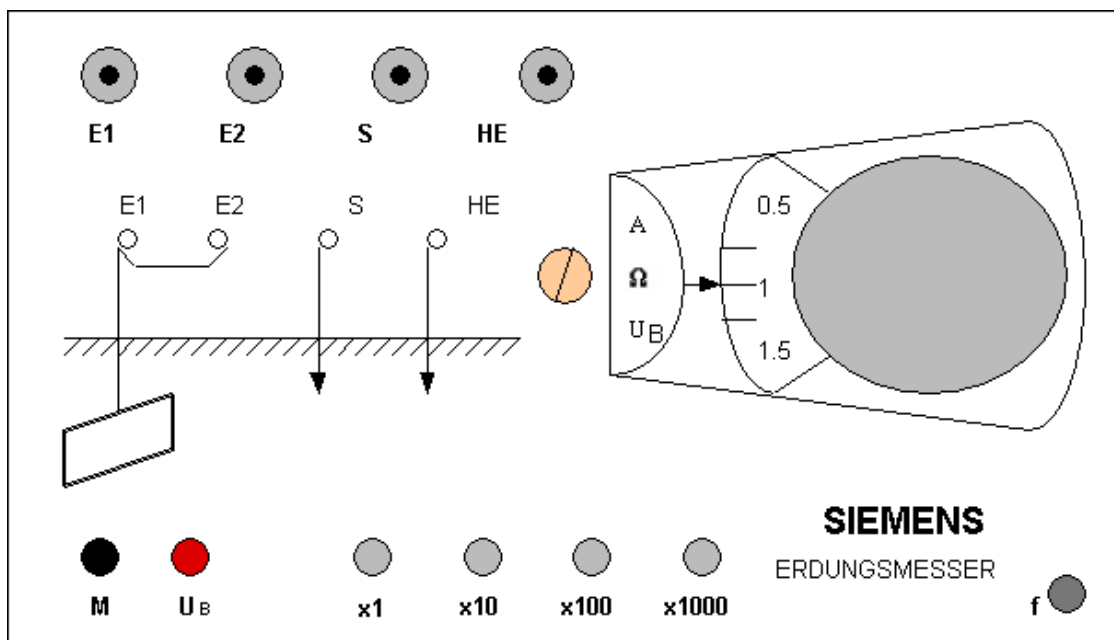


Figura 4.1. Dato de placa del Erdungsmesser (SIEMENS).

#### 4.1.1.1.1. Características técnicas del Erdungsmesser (SIEMENS)

Este equipo consta de cuatro baterías de 1.5 V cada una (6 V en total); una resistencia interna variable de 0.05 a 5  $\Omega$  divididas 0.05  $\Omega$  y numeradas cada 0.5  $\Omega$ ; una bobina que indica cada medición y el estado de la batería, ya sea si se pulsa el botón de medición M o el de comprobación  $U_B$ , respectivamente; además tiene cuatro bornes o tomas, dos de corriente  $E_1$  y  $H_E$  y dos de voltaje  $E_2$  y S (como se indicó en el inciso [3.5]) que se conectan a los electrodos de prueba mediante cables aislados; para tener una mejor precisión en la toma de mediciones, posee una escala de unidades, decenas, centenas y miles de ohmios.

En la Figura 4.1. se puede ver un tornillo central que tiene la finalidad de encerrar la bobina o nivelarla cuando el terreno presente muchas imperfecciones o declives muy pronunciados.

Este equipo tiene un regulador de frecuencia, el mismo que es requerido para mediciones de resistencia de puesta a tierra de electrodos ya enterrados o de sistemas de tierra ya establecidos.

#### 4.1.1.1.2. Funcionamiento del Erdungsmesser

Para comprobar que las baterías se encuentren en buen estado, se pulsa el botón  $U_B$  y se lo tiene aplastado, en la pantalla donde está la bobina se debe observar que ésta se dirige hacia abajo, directamente a la ubicación de la letra  $U_B$ ; caso contrario si no se mueve la bobina, las pilas deberán ser reemplazadas.

Verificando de esta manera que las baterías estén óptimas y cuando ya se hayan conectado los cables aislados a los bornes respectivos del aparato y a las picas enterradas en el terreno en la misma disposición respecto a su ubicación en el suelo; se procede a realizar la medición, para ello se pulsa el botón M y se observa hacia donde se dirige la bobina, si ésta se mueve para abajo del nivel de referencia, quiere decir que la resistencia del suelo es mayor a la del valor inicial



en el cual se encontraba la perilla en el momento de la pulsación de M, y si se mueve para arriba, lo contrario, es decir, que la resistencia del terreno medida por el aparato será menor a la inicial.

Así para encontrar el valor exacto de la resistencia del terreno en ohmios, se debe realizar una o varias mediciones o pulsaciones posteriores de M y modificaciones de la perrilla hasta que la bobina no se mueva y de esta manera coincida con el valor de la resistencia final que muestre la plantilla numerada.



Figura 4.2. Erdungsmesser utilizado.

Cabe mencionar que si la bobina se dirige por encima o por debajo del mínimo o máximo valor indicado en la pantalla, luego de haber presionado M, se debe utilizar los pulsadores de la escala que se encuentran en la parte inferior para determinar el valor exacto de la resistencia que se mide.

#### **4.1.1.2. Picas o electrodos para la medición**

Las picas de prueba o de medición son más pequeñas de lo normal, entre 50 y 70 cm, para facilitar su transporte, además son del mismo material que las varillas o electrodos utilizados comercialmente para las puestas a tierra, es decir de cobre-acero, si son de cobre mucho mejor para que logren una mejor conductividad.

Como se indicó en el capítulo anterior, para cumplir nuestro objetivo se utilizaron cuatro electrodos de medición (60 cm aproximadamente cada uno, para la

evaluación de campo en el NAIQ), pues en este proyecto solamente se requirió del método de Wenner para determinar la resistividad del terreno.

#### **4.1.1.3. Combo**

Para poder enterrar a la distancia correspondiente y consecutivamente cada una de las varillas en línea recta separadas la misma distancia una de la otra, es necesario ayudarse de un martillo de gran envergadura o de un combo, en este caso se requirió de uno de 4 libras.

#### **4.1.1.4. Cables**

Los electrodos enterrados en el suelo deben estar debidamente conectados mediante cables aislados a los bornes de corriente y voltaje del instrumento de medida respectivamente (# 12 AWG multifilar).

Con la finalidad de no tener cualquier tipo de contratiempo en el momento de las mediciones es preferible trabajar con ovillos de cables debidamente enrollados y fáciles de enrollar y desenrollar para hacer más confiable y eficiente el sondeo.

#### **4.1.1.5. Termómetro**

El instrumento para medir la temperatura del ambiente es el conocido termómetro, que para nuestro caso fue uno analógico o tradicional de mercurio, con escala decimal centígrada con un error del 0.1%. La temperatura también es indispensable para analizar el comportamiento de la resistividad.

#### **4.1.1.6. Reloj**

Se utilizó un reloj digital marca Casio para determinar la hora exacta en horas y minutos de cada medición, pues como se ha venido mencionado la hora del día es muy importante para entender el comportamiento de las mediciones.

## 4.2. PRUEBAS REALIZADAS

### 4.2.1. PRUEBA DE LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD

#### 4.2.1.1. Constatación del equipo de medida

Se creyó necesario realizar varias pruebas con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento de los equipos principalmente del terrómetro, y de esta manera ver que los resultados obtenidos después sean fiables.

La prueba del terrómetro se la realizó a los veinte y nueve días del mes de mayo del 2007, y se tomó como sitio las instalaciones deportivas de la Escuela Politécnica Nacional, específicamente los alrededores de la cancha de fútbol, para observar el funcionamiento del equipo y analizar las mediciones de resistividad del suelo, que sirvan de soporte y comparación con las posteriores de campo (nuevo aeropuerto).

Se tomó para ello, lecturas de resistividad utilizando el Erdungsmesser, aplicando el método de Wenner con el modo de medición de 4 polos, obteniéndose el valor de resistividad considerando la ecuación (3.2.). Estas se especifican en la siguiente tabla:

**Tabla 4.1. Mediciones de prueba de resistividad.**

Mediciones de Resistividad del Suelo						
<b>Ciudad</b>		Quito				
<b>Parroquia</b>		La Floresta				
<b>Lugar</b>		Escuela Politécnica Nacional				
<b>Método Utilizado</b>		Wenner (4 picas)				
<b>Equipo</b>		Erdungsmesser (Siemens)				
<b>Profundidad de Exploración</b>		2.0 m				
<b>Fecha</b>		29/05/2007				
<b>Sector</b>	<b>Re (<math>\Omega</math>)</b>	<b>a (m)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega.m</math>)</b>	<b>Temperatura (<math>^{\circ}C</math>)</b>	<b>Hora</b>	<b>Observaciones</b>
Isabel La Católica y Veintimilla	4.95	2.0	62.20	16	10:00	Suelo semihumedo

Isabel La Católica y Veintimilla	5.35	2.0	67.23	18	10:30	Suelo semihumedo
Isabel La Católica y Veintimilla	5.05	2.0	63.46	17	11:00	Suelo semihumedo
Isabel La Católica y Veintimilla	4.85	2.0	60.95	20	11:30	Suelo semihumedo
Isabel La Católica y Veintimilla	5.15	2.0	64.71	19	12:00	Suelo semihumedo

Se observa claramente que el equipo registró resistividades entre 60 y 65  $\Omega.m$ , razón por la cual se considera a este sector (EPN) como un terreno relativamente húmedo, valores que son normales considerando que esta época mantiene humedad acumulada de la etapa invernal y dando el inicio al verano; sin dejar de lado la hora del día en que fueron realizadas.

Pues bien el objetivo principal de estas mediciones no era establecer un valor peculiar de resistividad para este sitio, sino más bien una antesala de operación del equipo, el mismo que demostró actuar en perfectas condiciones.

#### 4.2.2. EVALUACIÓN GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DEL SECTOR

Estas pruebas se las realizaron en el año 2005 por parte de la CORPAQ (Corporación Aeropuerto de Quito) en el sector del nuevo aeropuerto, las mismas que se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla 4.2. Tabla de datos para la evaluación Geológica - Geotécnica.**

Evaluación Geológica - Geotécnica						
Ciudad	Quito					
Parroquia	Tababela					
Sector	Nuevo aeropuerto internacional de Quito					
Tramo	Alpachaca - Caraburo					
PROPIEDADES	CALIFICACIONES					PUNTOS
Compacidad o Consistencia	1 Compacto - duro	0.5 Medio		0 Suelto - suave		1.0
Clasificación SUCS	2 GW-GP-SW-SP	1.5 GM-GC-SM-SC	1 ML-CL	0.5 MH-CH	0 OL-OH-Pt	1.5

<b>Morfología</b>	2 Llano < 7%	1.5 Ondulado < 30%	1 Abrupto < 70%	0 MAbrupto > 70%	2.0			
<b>Riesgos Geológicos</b>	3 Ninguno	2 Pequeño	1 Grande	0 Inminente	2.0			
<b>Nivel Freático</b>	1 Improbable	0.5 Probable	0 Superficial	1.0				
<b>Drenaje</b>	1 Permeable	0.5 Semipermeable	0 Impermeable	0.5				
<b>Susceptibilidad a la Erosión</b>	2 Baja	1 Moderada	0 Alta	0				
<b>Estado del Terreno</b>	3 Seco	2 Húmedo	1 Saturado	0 Pantano	3.0			
<b>Vegetación</b>	2 Pastizales	1.5 Arbustos	0.5 Bosques	0 Selva	2.0			
<b>Condiciones de las Laderas</b>	3 Estables	2 Con caídas	1 Deslizamientos	0 Flujos	2.0			
<b>Estabilidad de Taludes</b>	3 Excelente	2.5 MBuena	2 Buena	1.5 Regular	1 Mala	0.5 MMalo	0 Pésimo	2.0
<b>Capac. Sobrante de la Subrasante</b>	3 Muy Bueno	2 Bueno	1 Regular	0.5 Malo	0 Muy Malo	1.0		
<b>Excavación en Roca</b>	2 0%	1.5 25%	1 50%	0.5 75%	0 100%	2.0		
<b>Accesibilidad a Minas</b>	2 Directa	1 Cercana	0 Lejana (> 10 km)	0				
<b>OBSERVACIONES:</b>		ZONA I: 30 – 24 PUNTOS ZONA II: 24 – 18 PUNTOS ZONA III: 18 – 12 PUNTOS ZONA IV: 12 – 6 PUNTOS ZONA V: 6 – 0 PUNTOS			<b>TOTAL: 20.0</b>			
<b><u>ZONA II = FAVORABLE</u></b>								

En la tabla anterior se puede observar que la contextura general del espacio en donde se construirá el nuevo aeropuerto de Quito se caracteriza por ser un lugar de condiciones áridas con poca vegetación, con tendencia a la erosión, obviamente plano sin accesos de agua, compacto y sin excavación en roca ni acceso a minas, entre las más importantes.

Teniendo como calificación total un puntaje de 20 puntos, estableciéndose en la zona II que lo identifica como un espacio territorial favorable para monitoreo y construcción, aunque las condiciones climáticas sean un poco adversas.

### **4.3. ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE RESISTIVIDAD**

#### **4.3.1. RESUMEN GENERAL**

Las mediciones de campo se realizaron entre mayo y julio del año 2007, frecuentándose la época de verano en los dos últimos meses y la terminación del invierno en el primero.

Inicialmente se realizaron mediciones casi simultáneas de resistividad en diferentes puntos de la entrada principal al conector vial Alpachaca, entre la vía Panamericana, alrededor del km 30 de la vía principal y dicha autopista.

Posteriormente a estos valores se determinaron las resistividades en un tramo del conector Alpachaca y finalmente en la zona franca del NAIQ alrededor de la futura pista del nuevo aeropuerto.

Para cada sector se tomaron medidas de resistividad en diferentes intervalos de tiempo en horas del día en donde existía mayor influencia del sol (entre 10 de la mañana y 5 de la tarde generalmente), con la finalidad de encontrar las curvas patrón correspondientes a cada zona (Observar el ANEXO N° 6).

Cabe indicar que el proceso realizado no permite definir un mapa de resistividades oficial, ya que sería necesario efectuar otras mediciones en otros meses del año para determinar la curva patrón de cada sector; sin embargo los resultados presentados en este estudio, son una buena aproximación, debido a que la mayoría de las mediciones, por no decir su totalidad fueron efectuadas en época seca, y por consiguiente bajo las peores condiciones en que se puede encontrar el terreno en cuanto a su resistividad.

De todos los valores encontrados se procederá a escoger el sitio con valor de resistividad más alta, la cual indicará la característica más desfavorable del terreno para la cual se deberá realizar el diseño, esto se lo detalla minuciosamente en el siguiente capítulo.

En la Tabla 4.3., se muestra el resumen de las mediciones de resistividad obtenidas, dichas lecturas se presentan detalladamente en el (ANEXO N° 5).

**Tabla 4.3. Resumen de las mediciones de resistividad de campo.**

Sector	Zona	Fecha	Hora	Temperatura Promedio (°C)	Resistividad Mínima (Ω.m)	Resistividad Máxima (Ω.m)
Entrada	Sur	04/06/07	14:00-17:00	26.8	31.4	49.0
Via	Km1	05/06/07	12:00-15:00	30.3	35.2	45.3
Via	Km2	15/06/07	13:00-17:00	28.0	37.7	49.0
Via	Km3	20/06/07	11:20-17:30	26.0	44.0	125.7
1	Cam.	10/07/07	13:27-14:57	29.4	132.0	314.2
2	Cam.	10/07/07	15:27-16:15	31.2	113.1	251.3
3-I	Pista	11/07/07	11:21-12:40	31.2	100.5	282.7
3-II	Pista	11/07/07	13:15-15:15	29.7	94.3	207.4
4-I	Pista	12/07/07	11:50-12:35	33.5	78.5	157.1
4-II	Pista	12/07/07	12:47-13:55	35.0	97.4	157.1
5	Pista	17/07/07	13:27-17:00	19.4	66.0	157.1
6-I	Pista	19/07/07	12:30-13:59	30.8	100.5	125.7
6-II	Pista	19/07/07	15:15-17:15	24.1	88.0	194.8
7	Pista	20/07/07	11:50-13:50	21.1	75.4	135.1
8	Term.	23/07/07	12:00-15:15	27.1	99.6	190.4

Las ubicaciones respectivas de las resistividades máximas y mínimas a lo largo del conector Alpachaca y de la pista del aeropuerto en general se encuentran debidamente especificadas en el ANEXO N° 7.

### 4.3.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS SECTORES ANALIZADOS

Para determinar el comportamiento de cada lugar analizado, correspondiente al sector del nuevo aeropuerto, es necesario especificar cada abreviatura expresada en el detalle del ANEXO N° 5, para ello se muestra cada equivalencia en la siguiente tabla, con el fin de interpretar de mejor manera los resultados obtenidos:

**Tabla 4.4. Simbología de las observaciones.**

SIMBOLOGÍA	
Símbolo	Descripción
RA	Resistividad alta > 200 $\Omega \cdot m$
RM	Resistividad media (100 – 200) $\Omega \cdot m$
RB	Resistividad baja < 100 $\Omega \cdot m$
SS	Suelo seco
SI	Suelo hidratado
SH	Suelo húmedo
CC	Clima cálido > 24°C
CT	Clima templado (18 – 24)°C
CF	Clima frío < 18°C
S	Soleado
N	Nublado
PN	Parcialmente nublado
LL	Lluvioso

#### 4.3.2.1. Zona Sur-Vía de Entrada (Conector Alpachaca)

En este sector ubicado a la entrada del nuevo aeropuerto, hacia el sur del mismo, exactamente en los alrededores de la vía que lo une desde el ramal de la Panamericana, se encontraron valores bajos de resistividad (entre 31 y 49  $\Omega \cdot m$ ), pues la geografía del terreno compacta pero a la vez húmeda e hidratada a pesar de tener en aquellos instantes un clima cálido y soleado, se debe principalmente a



la existencia de mucha vegetación, entre esta de árboles muy verdes y frondosos revitalizados por acequias y tomas de agua que pasan junto a ellos para distribuir el agua a los terrenos cultivables de la zona.

Se obtuvo una temperatura oscilante entre los 14 y 32°C, teniendo al final del primer día de medición y en la mayoría del segundo un ambiente nublado por eso la calificación de clima templado y parcialmente nublado, pero manteniéndose las altas temperaturas debido al inicio del verano. (Se asoció los dos días, pues se trata del mismo lugar, es decir la entrada y el primer kilómetro de la vía)

#### **4.3.2.2. Zona Sur-km 2 (Conector Alpachaca)**

En este caso también se asoció las dos partes del segundo kilómetro correspondientes al este y al oeste de la vía por el mismo criterio anterior, pero en estos predios se hallaron diferentes valores de resistividad, evaluados el día 15 de junio de 2008 para el este y el 20 del mismo mes para el oeste.

Las resistividades estuvieron entre 39 y 126  $\Omega\cdot m$ , es decir superando a las anteriores, tratándose de esta manera, de valores bajos y medios respectivamente. Teniéndose en este caso temperaturas similares al anterior sector (15 a 31°C), clima extenuante y humedad en los terrenos.

Es importante mencionar que en este sector así como en el anterior, se realizó el método de Wenner sin variar la distancia entre los electrodos de prueba (a solo 2 m de distancia) y sin modificar la profundidad del clavado de los mismos.

#### **4.3.2.3. Zona Campamento (Sector 1)**

Todas estas mediciones fueron realizadas el mismo día (10/07/2007) en las proximidades de las instalaciones del campamento, ubicadas al noroeste de la pista y envueltas en un medio diferente al de las estudiadas hasta el momento, arrojando las resistividades más altas de todo el proceso (132 - 314  $\Omega\cdot m$ ), clima cálido y soleado (29°C), independientemente de tener el suelo húmedo e

hidratado parcialmente, debido a unas leves precipitaciones acontecidas al día anterior. Además se fue modificando el proceso de medición al cambiar en cada toma la distancia de separación de las picas y la profundidad de empotramiento. Desde 10 hasta 2 m en intervalos de 2 y de 0.3 a 0.5 m, es así que para este caso a más de la curva patrón se pudo graficar el perfil de resistividad que se lo ve en la Figura 4.3. para 0.3 m y en la Figura 4.4. para 0.5 m.

**Tabla 4.5. Resistividad en función de la separación de los electrodos para  $b = 0.3$  m.**

Para $b = 0.3$ m	
a (m)	Resistividad ( $\Omega.m$ )
2,0	314,20
4,0	150,80
6,0	135,70
8,0	138,20
10,0	157,10

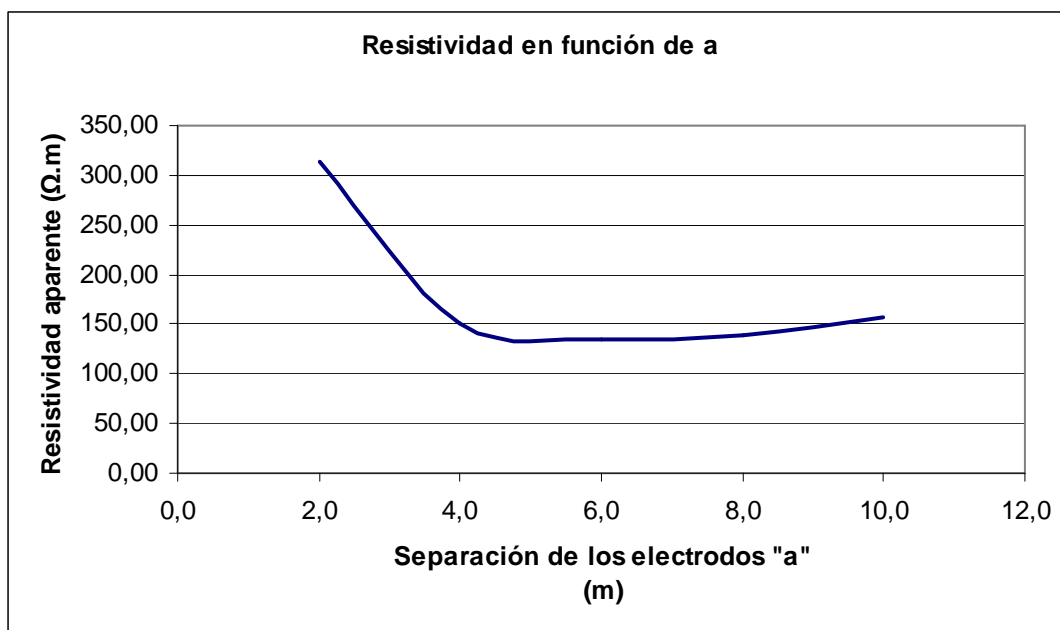


Figura 4.3.- Perfil de resistividad para  $b = 0.3$  m.

Como se puede observar en la gráfica, se trata para este sector, de un perfil de resistividad descendente (según [3.6.1.2.]), y por lo tanto, de una capa superficial muy seca, capa inferior arenosa. Para simular su comportamiento se requiere de por lo menos utilizar los valores de 2 capas.

**Tabla 4.6. Resistividad en función de la separación de los electrodos para  $b = 0.5\text{m}$ .**

Para $b = 0.5\text{ m}$	
a (m)	Resistividad ( $\Omega\cdot\text{m}$ )
2,0	301,6
4,0	148,3
6,0	131,9
8,0	130,7
10,0	135,1

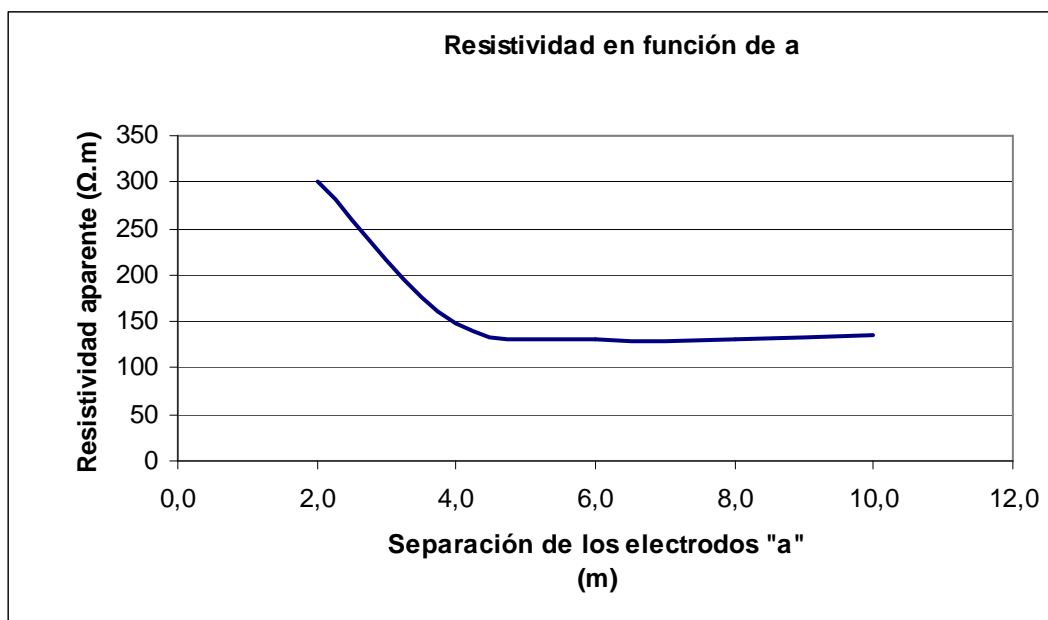


Figura 4.4.- Perfil de resistividad para  $b = 0.5\text{ m}$ .

Para esta profundidad de las varillas de medición, se observa la misma característica en su perfil, es decir descendente y se puede concluir también que

mientras se aumentó la profundidad de clavado de 0.3 a 0.5 m disminuyó la resistividad del terreno respectivamente, comportándose ésta, inversamente proporcional a la profundidad de empotrado de los electrodos de medición.

#### **4.3.2.4. Zona Campamento Noroeste (Sector 2)**

Al igual que el sector anterior que es a la vez adyacente, presenta también resistividades altas entre 113 y 251  $\Omega\cdot m$ , con características similares del terreno, con suelos muy secos, sin presencia de vegetación con excepción de plantas de característica árida y con temperatura elevada, es decir cálida y soleada (31°C), así como también la misma variación entre a y b respectivamente, por esta razón su perfil se comporta descendentemente.

#### **4.3.2.5. Zona Pista Noroeste y Norte (Sector 3-I)**

Al contrario que en los dos sectores anteriores en esta parte se realizaron las mediciones utilizando solamente dos valores de separación entre los electrodos de 2 y 10 m respectivamente (se utilizarán las dos separaciones de aquí en adelante para los demás sectores, con excepción del sector 5), conservando eso sí, las dos profundidades de introducción de las picas (0.3 y 0.5 m). Se realizó esto para agilizar la toma de valores y efectivizar el cronograma de actividades.

Los valores están entre 101 y 283 ohmios-metro (resistividades medias y altas) ubicados al final de la pista (norte, cerca de la pirámide de Caraburo, mayoría de los grupos GR), sector muy árido, características del terreno secas y arenosas silícicas, ambiente cálido y soleado, presentándose parcialmente nublado al medio día. Con una temperatura promedio de 31°C.

#### **4.3.2.6. Zona Pista Norte (Sector 3-II)**

Ubicadas en la parte norte y con características similares al sector 3-I con resistividades medias y altas entre 94 y 207  $\Omega\cdot m$ , sin embargo encontrándose el primer valor de resistividad bajo los 100  $\Omega\cdot m$ , esto debido a que la ubicación

exacta para esta medición, el nivel 3.8, se encontraba a pocos metros de un amplio reservorio de agua, razón por la cual se redujo a este valor la resistividad de campo, en los demás sitios campos muy áridos y sin presencia de vida vegetal.

Suelo seco, clima soleado, parcialmente nublado al medio día y totalmente nublado desde las 3 de la tarde, aproximadamente (30°C).

#### **4.3.2.7. Zona Pista Centro Oeste (Sector 4-I)**

Resistividades bajas y medias (79 - 157  $\Omega\cdot m$ ) medidas en la parte central de la pista con dirección al oeste, valores que se debieron principalmente a la ubicación de esta medición, el nivel 4.1, se encuentra en las cercanías de moderada vegetación muy verde y por ende con niveles de agua aledaños, sin embargo el comportamiento del medio y del terreno es el mismo que en los casos anteriores, es decir calientes y secos para el nivel 4.2 (grupos GR5 y GR6), además parcialmente nublados al medio día y a una temperatura promedio de 34°C.

#### **4.3.2.8. Zona Pista Centro Sur (Sector 4-II)**

Lugar de sondeo desde la parte central de la pista hacia el sur de la misma, mostrando resistividades medias (100 - 157  $\Omega\cdot m$ ) y una baja de 97  $\Omega\cdot m$ , valores que se deben por encontrarse adyacentemente al sector anterior, pues el nivel 4.3, se encuentra en las cercanías del nivel 4.1 (vegetación verde), pero del mismo modo el comportamiento del terreno es seco y su clima caliente y soleado (nivel 4.4 o grupo GR7) a lo largo del día con una temperatura promedio de 35°C, la más alta presentada en todo el estudio.

#### **4.3.2.9. Zona Pista Oeste (Sector 5)**

Mediciones realizadas en la parte oeste de la pista (terminal de pasajeros) y del campamento, con características diferentes a todos los sectores anteriores, debido a la presencia de lluvia (por ende mayoría de clima frío a lo largo del día),

con resistividades bajas y medias entre 66 y 157  $\Omega\cdot m$ , campos de terreno hidratados debido a las precipitaciones y presencia de poca vida vegetal.

También se tuvo clima templado y caliente al inicio de la jornada, pero siempre nublado, aproximadamente (19°C).

#### **4.3.2.10. Zona Pista Centro Sureste (Sector 6-I)**

Solo resistividades medias (101 - 126  $\Omega\cdot m$ ) medidas en la parte central de la pista dirigidas hacia el sureste, moderada vegetación de ambiente árido, comportamiento del medio y del terreno similar a los casos anteriores (grupos de corte de tierra GC3 y GC4), es decir calientes, secos, soleados y parcialmente nublados al medio día, encontrándose a una temperatura promedio de 31°C.

#### **4.3.2.11. Zona Pista Centro Este (Sector 6-II)**

En este lugar se encontró resistividades medias (100 - 195  $\Omega\cdot m$ ) y una baja de 88  $\Omega\cdot m$ , medidas en la parte central de la pista con dirección hacia el este, poca vegetación de ambiente árido, debido a la remoción de terreno correspondientes a los grupos GC1 y GC2, comportamiento del medio y del terreno similar a los sectores anteriores, es decir calientes, secos, soleados y parcialmente nublados al final de la tarde, presentando también clima templado desde las cuatro y media de la tarde hasta el final de la jornada, con una temperatura promedio de 24°C.

#### **4.3.2.12. Zona Pista Sur (Sector 7)**

Los valores están entre 75 y 135 ohmios-metro (resistividades bajas y medias) ubicados al final de la pista hacia el sur con la desembocadura del conector Alpachaca, correspondiente a los grupos GC5 y GC6), sector menos árido, pero de iguales características a los otros sectores, terreno seco y arenoso, pero con ambiente templado y soleado, presentándose parcialmente nublado desde la una de la tarde. Con una temperatura promedio de 21°C.

#### **4.3.2.13. Zona Terminal (Sector 8)**

Mediciones realizadas en la futura terminal de pasajeros del nuevo aeropuerto de Quito ubicado al sureste del campamento, con características diferentes a todos los sectores anteriores, por tratarse del terreno con mayor cantidad de filtrado de tierra, es decir con el mayor relleno de toda la pista, aproximadamente 3.5 millones de m<sup>3</sup> (grupos GR1-GR4, GR11, GR14, GR16 y GR17) con resistividades medias entre 100 y 190  $\Omega\cdot m$ , por ende terreno de diferente estratificación y comportamiento distinto de la corriente despachada por el aparato de medida, sin embargo los resultados obtenidos muestran valores que no se desvían de los determinados en anteriores lugares de la pista.

También se tuvo clima cálido, soleado y parcialmente nublado al final de la jornada, obteniéndose una temperatura promedio de 27°C, con la diferencia de que en este lugar se caracterizaba por no tener en su totalidad presencia de vida vegetal.

## **CAPÍTULO 5.**

### **DISEÑO DEL SISTEMA NORMALIZADO DE PUESTA A TIERRA**

#### **5.1. NORMATIVA DE REFERENCIA PARA PUESTAS A TIERRA**

Para efectos de diseñar las condiciones óptimas de un nuevo sistema de puesta a tierra, es necesario tomar como base teórica de referencia, normativas y reglamentos actualizados que gocen de credibilidad y rijan procedimientos técnicos aceptados a nivel internacional

Por este motivo hemos considerado como principales referencias las siguientes publicaciones:

- IEEE Std 80-2000
- Reglamento de seguridad NEC.
- Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) Colombia Capítulo II Artículo 15 «Puestas a Tierra»
- Otras Publicaciones.

A continuación se resumirá las partes más importantes de cada documento, haciendo énfasis en los criterios adoptados en la guía.

##### **5.1.1. IEEE Std 80-2000<sup>R8</sup>**

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

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



- a) Proporcionar un medio para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder ningún límite en el equipo y su operación.
- b) Asegurar que una persona cercana a una instalación eléctrica no se exponga al peligro de un choque eléctrico.

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

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

Cuando se ha terminado el diseño la norma sugiere algoritmos computacionales para la modelación de mallas de puesta a tierra.

### **5.1.2. REGLAMENTO DE SEGURIDAD NEC<sup>R28</sup>**

En el reglamento de seguridad del NEC (ecuatoriano) revisado por el INEN, establece en la sección 250 «Puestas a Tierra» varios literales que se dividen en puntos para la conexión de la puesta a tierra de:

- Circuitos de c.c. y c.a.
- Sistemas de c.c. y c.a. para varios niveles de voltaje.
- Generadores.
- Sistemas alimentados desde acometida.
- Edificaciones.
- Conductores que se deben aterrizar.
- Puesta a tierra de equipos.
- Tipos de alambre para la conexión.
- Conexiones equipotenciales.

---

<sup>R28</sup> NEC. Código eléctrico nacional (Ecuador). INEN

- Instalación del electrodo de puesta a tierra.
- Uso de la puesta a tierra de los pararrayos.
- Puesta a tierra complementaria.
- Calibre de conductor de puesta a tierra tanto para c.c. como para c.a.
- Continuidad del conductor de puesta a tierra de equipos, etc.

Para nuestro caso de estudio se detallará los artículos correspondientes al artículo 250-25 y al literal M «Puesta a tierra de instalaciones y circuitos de alta tensión (1 kV o más)»

**250-25.- Conductor que se debe poner a tierra en sistemas de corriente alterna.-** En sistemas de alambrado de c.a. en las prioridades, el conductor que se debe poner a tierra es el que se especifica en los siguientes apartados 1) a 5).

- a. Instalaciones monofásicas bifilares: un conductor.
- b. Instalaciones monofásicas trifilares: el conductor del neutro.
- c. Instalaciones polifásicas con un conductor común a todas las fases: el conductor de una fase.
- d. Instalaciones polifásicas en las que se deba poner a tierra una fase: el conductor de una fase.
- e. Instalaciones polifásicas en las que una fase se utilice como se indica en 2) anterior: el conductor de neutro.

**250-81.- Sistema de electrodos de puesta a tierra.-** Si existen en la propiedad, en cada edificio o estructura perteneciente a la misma, los elementos (a) a (d) que se indican a continuación y cualquier electrodo prefabricado instalado de acuerdo con lo indicado en 250-83(c) y (d), se deben conectar entre sí para formar el sistema de electrodos de puesta a tierra.

Se permite que el conductor del electrodo de puesta a tierra sin empalmes llegue hasta cualquier electrodo de puesta a tierra disponible en el sistema de electrodos

de puesta a tierra. Debe dimensionarse de acuerdo con el conductor para electrodo de puesta a tierra exigido entre todos los electrodos disponibles.

**Excepción 1:** Se permite empalmar el conductor del electrodo de puesta a tierra mediante conectadores a presión aprobados y listados para este fin o mediante el proceso de soldadura exotérmica.

La tubería metálica interior para agua situada a más de 1.5 m del punto de entrada en el edificio, no se debe utilizar como parte de la instalación del electrodo de puesta a tierra o como conductor para conectar electrodos que formen parte de dicha instalación.

**Excepción 2:** En las construcciones industriales y comerciales, cuando las condiciones de mantenimiento y supervisión aseguren que solo personal calificado atiende la instalación y la tubería metálica interior para agua que se vaya a utilizar como conductor este expuesta en toda su longitud.

**a) Tubería metálica subterránea para agua.-** Una tubería metálica subterránea para agua en contacto directo con la tierra a lo largo de 3 m o más (incluidos los ademes metálicos de pozos efectivamente conectados a la tubería) y con continuidad eléctrica (o continua eléctricamente mediante puenteo de las conexiones alrededor de juntas aislantes, o secciones aislantes de tubos) hasta los puntos de conexión del conductor del electrodo de puesta a tierra y de los puentes de unión. La continuidad de la tierra o de la conexión del puente de unión al interior de la tubería no se debe hacer a través de medidores de consumo de agua, filtros o equipo similares. Una tubería metálica subterránea para agua se debe complementar mediante un electrodo adicional del tipo especificado en 250-81 o 250-83. Se permite que este electrodo suplementario vaya conectado al conductor del electrodo de puesta a tierra, el conductor de la acometida puesto a tierra, la canalización de la acometida conectada a tierra o cualquier envolvente de la acometida puesto a tierra.

Cuando este electrodo suplementario sea prefabricado como se establece en 250-83 c) o d), se permite que la parte del puente de unión que constituya la única

conexión con dicho electrodo suplementario no sea mayor que un cable de cobre de  $13.3 \text{ mm}^2$  (6 AWG) o un cable de aluminio de  $21.15 \text{ mm}^2$  (4 AWG).

**Excepción 3:** Se permite que el electrodo suplementario vaya conectado al interior de la tubería metálica para agua en cualquier punto que resulte conveniente, como se explica en la Excepción 2 de 250-81.

**b) Estructura metálica del edificio.-** La estructura metálica del edificio, cuando esté puesta a tierra eficazmente.

**c) Electrodo empotrado en concreto.-** Un electrodo empotrado como mínimo 50 mm en concreto, localizado en y cerca del fondo de un cimiento o zapata que esté en contacto directo con la tierra y que conste como mínimo de 6 m de una o más varillas de acero desnudo o galvanizado o revestido de cualquier otro recubrimiento eléctricamente conductor, de no-menos de 13 mm de diámetro o como mínimo 6.1 m de conductor de cobre desnudo de tamaño nominal no inferior a  $21.15 \text{ mm}^2$  (4 AWG).

**d) Anillo de tierra.-** Un anillo de tierra que rodee el edificio o estructura, en contacto directo con la tierra y a una profundidad bajo la superficie no inferior a 800 mm que conste como mínimo en 6 m de conductor de cobre desnudo de ternario nominal no inferior a  $33.62 \text{ mm}^2$  (2 AWG).

**250-83. Electrodos especialmente contruidos.-** Cuando no se disponga de ninguno de los electrodos especificados en 250-81, se debe usar uno o más de los electrodos especificados en los incisos a continuación. Cuando sea posible, los electrodos contruidos especialmente se deben enterrar por debajo del nivel de humedad permanente. Los electrodos especialmente contruidos deben estar libres de recubrimientos no conductores, como pintura o esmalte. Cuando se use más de un electrodo para el sistema de puesta a tierra, todos ellos (incluidos los que se utilicen como varillas de pararrayos) no deben estar a menos de 1.8 m de cualquier otro electrodo o sistema de puesta a tierra. Dos o más electrodos de

puesta a tierra que estén efectivamente conectados entre sí, se deben considerar como un solo sistema de electrodos de puesta a tierra.

**a) Sistema de tubería metálica subterránea de gas.-** No se debe usar como electrodo de puesta a tierra un sistema de tubería metálica subterránea de gas.

**b) Otras estructuras o sistemas metálicos subterráneos cercanos.-** Otras estructuras o sistemas metálicos subterráneos cercanos, como tubería y tanques subterráneos.

**c) Electrodo de varilla o tubería.-** Los electrodos de varilla y tubo no deben tener menos de 2.4 m de longitud, deben ser del material especificado a continuación y estar instalados del siguiente modo:

1) Los electrodos consistentes en tubería o tubo (conduit) no deben tener un tamaño nominal inferior a 19 mm (diámetro) y, si son de hierro o acero, deben tener su superficie exterior galvanizada o revestida de cualquier otro metal que los proteja contra la corrosión.

2) Los electrodos de varilla de hierro o de acero deben tener como mínimo un diámetro de 16 mm. Las varillas de acero inoxidable inferiores a 16 mm de diámetro, las de metales no ferrosos o sus equivalentes, deben estar aprobadas y tener un diámetro no inferior a 13 mm.

3) El electrodo se debe instalar de modo que tenga en contacto con el suelo un mínimo de 2.4 m. Se debe clavar a una profundidad no inferior a 2.4 m excepto si se encuentra roca, en cuyo caso el electrodo se debe clavar a un ángulo oblicuo que no forme más de 45° con la vertical, o enterrar en una zanja que tenga como mínimo 800 mm de profundidad. El extremo superior del electrodo debe quedar a nivel del piso, excepto si el extremo superior del electrodo y la conexión con el conductor del electrodo de puesta a tierra están protegidos contra daño físico, como se especifica en 250-117.

**d) Electrodo de placas.-** Los electrodos de placas deben tener en contacto con el suelo un mínimo de 0.2 m<sup>2</sup> de superficie. Los electrodos de placas de hierro o

de acero deben tener un espesor mínimo de 6.4 mm. Los electrodos de metales no ferrosos deben tener un espesor mínimo de 1.52 mm.

**e) Electrodo de aluminio.-** No está permitido utilizar electrodos de aluminio.

**250-86. Varillas de pararrayos.-** No se deben usar conductores de puesta a tierra de los pararrayos ni tubos, varillas u otros electrodos fabricados utilizados para poner a tierra las bajadas de los pararrayos, en sustitución de los electrodos de tierra indicados en 250-83 para la puesta a tierra de sistemas eléctricos y de equipo. Esta disposición no impide cumplir los requisitos de conexión de los electrodos de puesta a tierra de diversos sistemas.

#### **M.- Puesta a tierra de instalaciones y circuitos de alta tensión (1kV o más)**

**250-150 Generalidades.-** Cuando se pongan a tierra instalaciones de alta tensión, deben cumplir todas las disposiciones aplicables a los artículos anteriores de esta sección y los siguientes artículos, en cuanto complementen y modifiquen los anteriores.

**250-151.- Sistema con neutro de derivado.-** Se permite usar como puesta a tierra de sistemas de alta tensión del neutro de un sistema derivado de un transformador de puesta a tierra.

**250-152.- Sistema con neutro sólidamente puesto a tierra.**

**a) Conductor de neutro.-** El nivel mínimo de aislamiento de conductores de neutro para sistemas sólidamente puestos a tierra debe ser de 600 V.

#### **Excepciones:**

- 1) Se permite usar conductores de cobre desnudos como neutro de la acometida y de las partes directamente enterradas de los circuitos de alimentación.
- 2) Se permite usar conductores desnudos como neutro de las instalaciones aéreas.

**b) Puestas a tierra múltiples.-** Se permite que el neutro de un sistema con neutro solidamente puesto a tierra en más de un punto en el caso de:

- Acometidas.
- Partes directamente enterradas de alimentadores cuyo neutro sea de cobre desnudo.
- Partes aéreas instaladas en el exterior.

**c) Conductor de puesta a tierra del neutro.-** Se permite que el conductor de puesta a tierra del neutro sea un conductor desnudo si está aislado de los conductores de fase y protegido contra daños físicos.

**250-153.- Sistema con neutro puesto a tierra a través de impedancia.-** Los sistemas con neutro puesto a tierra por medio de impedancia deben cumplir lo establecido en los siguientes apartados a) a d).

**a) Ubicación.-** La impedancia de puesta a tierra se debe intercalar en el conductor de puesta a tierra entre el electrodo de puesta a tierra del sistema de suministro y el punto neutro del transformador o generador de suministro.

**b) Identificación y aislamiento.-** Cuando se emplee el conductor neutro de un sistema con neutro puesto a tierra por medio de impedancia, se debe identificar así y debe estar totalmente aislado con el mismo aislamiento que los conductores de fase.

**c) Conexión con el neutro del sistema.-** El neutro del sistema no se debe poner a tierra si no es a través de la impedancia de puesta a tierra del neutro.

**d) Conductores de puesta a tierra de los equipos.-** Se permite que los conductores de puesta a tierra de los equipos sean cables desnudos y vayan conectados al cable de puesta a tierra y al conductor del electrodo de puesta a tierra del equipo de la acometida, prolongándolos hasta la tierra de la instalación.

### **5.1.3. REGLAMENTO DE SEGURIDAD TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE) COLOMBIA, CAPÍTULO II ARTÍCULO 15 "PUESTAS A TIERRA" <sup>R29</sup>**

En el Reglamento técnico de instalaciones eléctricas de Colombia en el capítulo II «Requisitos Técnicos Esenciales» artículo 15 "Puestas a Tierra" indica:

“Toda instalación eléctrica cubierta por el presente reglamento, excepto donde se indique expresamente lo contrario, debe disponer de un sistema de puesta a tierra, en tal forma que cualquier punto del interior o exterior, normalmente accesible a personas que puedan transitar o permanecer allí, no están sometidos a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales de soportabilidad cuando se presente una falla”.

Dicho reglamento especifica:

- Funciones de un sistema de puesta a tierra.
- Márgenes de soportabilidad del cuerpo humano.
- Diseño de puesta a tierra.
- Requisitos generales.
- Materiales.
- Valores de resistencia de puesta a tierra.
- Medición de parámetros relacionados con la puesta a tierra.
- Puestas a tierra temporales.

### **5.1.4. OTRAS PUBLICACIONES**

En otros reglamentos como el peruano, español o argentino, se puede observar que existen parámetros similares en cuanto a las regulaciones para los sistemas de puesta a tierra ya que la gran mayoría están basados en estándares internacionales como el de la IEEE, ANSI, IEC, etc.

---

<sup>R29</sup> Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) Colombia.



## **5.2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO E INSTALACIÓN DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA**

A medida que el uso de la energía eléctrica se extiende, se requiere ser más exigentes en cuanto a la normalización y reglamentación, con la finalidad de garantizar condiciones óptimas de seguridad en la operación de sistemas eléctricos.

La guía presentada a continuación recopila prácticas vigentes para el diseño y construcción de sistemas de puesta a tierra, recomendadas por normas y reglamentos internacionales, resumiendo aquellas de aplicación general que pueden ser aplicadas a nuestro medio.

En seguida se proporcionará toda la información correspondiente a materiales usados en Sistemas de Puesta a Tierra para sistemas de Distribución; así como, establecer procedimientos específicos para el correcto diseño y construcción de los mismos, que constituyen una referencia para la empresa y contratistas.

### **5.2.1. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA CENTROS DE TRANSFORMACIÓN**

#### **5.2.1.1. Diseño**

El diseño de sistemas de puesta a tierra se lo suele dividir en dos grupos para los equipos de transformación.

- Transformador aéreo.
- Cámara de transformación (subterránea).

##### *5.2.1.1.1. Transformadores aéreos*

En el caso de «transformadores aéreos» el diseño se lo debe realizar siguiendo el siguiente procedimiento.

### **a) Resistividad**

Para el diseño de un sistema de puesta a tierra es necesario conocer el valor de la resistividad del terreno donde se va a realizar la futura instalación del sistema.

Para ello es necesario efectuar mediciones de resistividad.

### **b) Materiales** <sup>R28</sup>

Es necesario saber que materiales se utilizarán para el diseño como son tipos de conductores y electrodos.

i) Para el caso de conductores de puesta a tierra:

Tabla NEC 250-122 Conductor de puesta a tierra de equipos.

Tabla NEC 250 -66 Conductor del electrodo de puesta a tierra (EN COBRE).

ii) Para el caso de electrodos de puesta a tierra:

La tabla del ANEXO N° 1 (Requisitos para electrodos de puesta a tierra) muestra los requisitos para electrodos de puesta a tierra que se han adoptado de las siguientes normas, SEC 60364-5-54, BS 7430, AS 1768, UNESA6501F, NTC 2050, siendo el más utilizado y al cual se rigen los cálculos la varilla (electrodo) de puesta a tierra Copperweld, 16 mm de diámetro x 1.80 m de longitud.

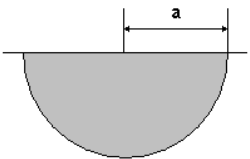
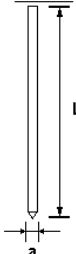
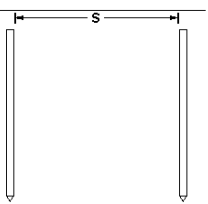
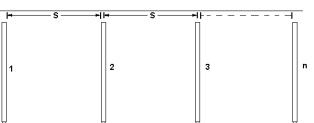
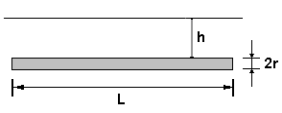
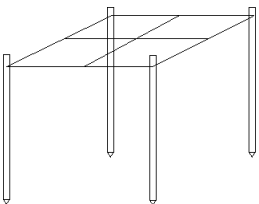
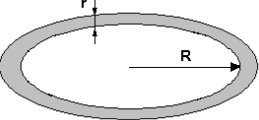
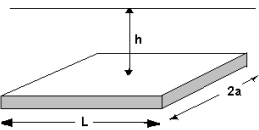
### **c) Resistencia de puesta a tierra** <sup>R30</sup>

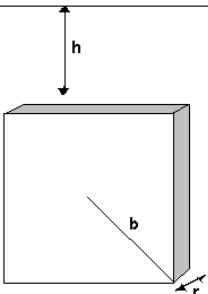
Una vez que se tiene el valor de resistividad en  $\Omega.m$ , y definido el material que se utilizará en el diseño se procederá al cálculo de la resistencia de puesta a tierra, teniendo como referencia el valor en  $\Omega$  al cual se quiera llegar, usando las formulaciones que se presentan en la tabla 5.1.

---

<sup>R30</sup> CASAS OSPINA, Favio. "Tierras Soporte de la Seguridad Eléctrica".

Tabla 5.1.- Fórmulas para el cálculo de resistencias de puesta a tierra en baja frecuencia. <sup>R30</sup>

Ítem	Simbología	Tipo de Sistema	Ecuación
1		Semiesfera, radio a	$RPT = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L}$
2		Electrodo vertical de longitud L y radio a	$RPT = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot Ln\left(\frac{2 \cdot L}{a}\right)$
3		2 electrodos a distancia S > L	$RPT = \frac{\rho}{2} \cdot \left(0.404 + \frac{0.16}{S} \cdot Ln(1.31)\right)$
4		N electrodos en línea recta S > 2L	$RPT = \frac{\rho}{N} \cdot \left(0.404 + \frac{0.16}{S} \cdot Ln(0.655 \cdot N)\right)$
5		Conductor horizontal de longitud L, enterrada h > 6r, r radio del conductor	$RPT = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(Ln\left(\frac{L}{r}\right) + Ln\left(\frac{L}{2 \cdot h}\right)\right)$
6		Electrodo en cada esquina A = Área total L = longitud total de conductor	$RPT = 0.443 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}} + \frac{\rho}{L}$
7		Anillo de conductor radio del anillo R radio del conductor r enterrada S/2	$RPT = \frac{\rho}{4 \cdot \pi^2 \cdot R} \cdot Ln\left(\frac{8 \cdot R}{r}\right)$
8		Placa horizontal h > 3a	$RPT = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(Ln\left(\frac{2 \cdot L}{a}\right) + Ln\left(\frac{L}{2 \cdot h}\right)\right)$

9		<p>Placa vertical  h = profundidad de enterramiento  b = diagonal / 2  r = espesor de la placa</p>	$RPT = \frac{\rho}{8 \cdot b} + \frac{\rho}{8 \cdot \pi \cdot h} \cdot \left( 1 + \frac{7}{24} + \frac{r^2}{4 \cdot h} \right)$
---	---	--	---

#### d) Construcción

En la normativa vigente de la Empresa el Eléctrica Quito S.A. (el que se la tratará en el siguiente apartado [5.2.2.]) se tienen las diferentes disposiciones tipo para la instalación de los sistemas de puesta a tierra, en las cuales nos hemos basado para realizar las correcciones necesarias con el fin de disminuir el valor de la resistencia de puesta a tierra.

#### e) Mantenimiento

En toda instalación eléctrica tenemos implícito un riesgo, de ahí la importancia de un tratamiento preventivo al problema.

Se recomienda realizar periódicamente mediciones de la resistencia de puesta a tierra, y si es el caso mejoraría mediante los siguientes procesos.

- Revisar los conectores (existencia de corrosión).
- Retirar conectores y reemplazarlos por solda exotérmica.
- Tratamiento químico para mejoramiento de suelos.

##### 5.2.1.1.2. Cámaras de transformación

Para el caso de «cámaras de transformación», es necesario tener una correcta distribución de potenciales en el suelo, debido a la cercanía con que se encuentra el personal de mantenimiento a todos los equipos que conforman dicha cámara;

es por ello que para la construcción de su sistema de puesta a tierra, resulta mejor el diseño de una malla de puesta a tierra, ya que se toma en cuenta parámetros como voltajes máximos tolerables de paso y de contacto.

La metodología que se recomienda para el diseño de mallas de puesta a tierra, es el propuesto según la Norma IEEE Std 80-2000, que se muestra a continuación.

Para el procedimiento de diseño se consideran los parámetros que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 5.2.- Parámetros a considerar en el procedimiento de diseño de mallas de puesta a tierra. <sup>R8</sup>**

Símbolo	Parámetro
$\rho$	Resistividad del suelo
$\rho_s$	Resistividad de la superficie del suelo
$3I_0$	Corriente simétrica de falla en la subestación por conductor de tipo A
A	Área total de la malla
$C_s$	Factor de decremento en la capa superficial
d	Diámetro del conductor de malla
D	Espacio entre conductores paralelos
$D_f$	Factor de decremento por Determinación de $I_G$
$D_m$	Máxima distancia entre dos puntos en la malla
$E_m$	Voltaje de malla
$E_s$	Voltaje de paso
$E_{step\ 50}$	Voltaje de paso tolerable para una persona de 50 kg de peso
$E_{step\ 70}$	Voltaje de paso tolerable para una persona de 70 kg de peso
$E_{touch\ 50}$	Voltaje de contacto tolerable para una persona 50 kg de peso
$E_{touch\ 70}$	Voltaje de contacto tolerable para una persona 70 kg de peso
h	Profundidad de los conductores de la malla
$h_s$	Espesor de la capa superficial
$I_G$	Máxima corriente de malla que fluye entre la malla y la tierra circundante
$I_g$	Corriente simétrica de malla
K	Factor de reflexión entre diferentes resistividades
$K_h$	Factor de corrección por profundidad, enterramiento de la malla
$K_i$	Factor de corrección por geometría de malla
$K_{ii}$	Factor por corrección por ubicación de electrodos tipo varilla

$K_m$	Factor de espaciamento para tensión de malla
$K_s$	Factor de espaciamento para tensión de paso
$L_c$	Longitud total de conductor de malla
$L_M$	Longitud efectiva por voltaje de malla ( $L_c + L_R$ )
$L_R$	Longitud total de la varilla
$L_v$	Longitud a cada ubicación de la varilla de tierra
$L_S$	Longitud efectiva por voltaje de paso
$L_T$	Longitud total efectiva del conductor del sistema de tierra.
$L_x$	Longitud máxima de conductor de malla en la dirección x
$L_y$	Longitud máxima de conductor de malla en la dirección y
$N$	Número de varillas
$n$	Factor de geometría
$n_R$	Numero de varillas localizadas en el área A
$R_g$	Resistencia de tierra del sistema
$S_f$	Factor de división de corriente de falla
$t_c$	Tiempo de despeje de falla por el tamaño de conductor de tierra
$t_f$	Tiempo de despeje de falla por determinación del factor de decremento
$t_s$	Duración del shock determinado por la corriente admisible por el cuerpo

### CONSTANTES

$\rho$  = Resistividad aparente del terreno tomado como un suelo uniforme ( $\Omega \cdot m$ ).

$I$  = Corriente de falla monofásica a tierra en el secundario (kA).

$I_o$  = Corriente de falla monofásica a tierra en el primario (A).

$T_c$  = Tiempo de despeje de fallas (s).

$K_f$  = Constante para diferentes materiales a diferentes temperaturas de fusión  $T_m$  y una temperatura ambiente de 40°C.

-Conductor a utilizar:

$$A_{mm^2} = \frac{I \cdot K_f \cdot \sqrt{t_c}}{1.9740} \quad [mm^2] \quad (5.1.)$$

-Voltajes de paso y contacto máximas tolerables. (Persona de 50 kg):

$$V_{paso\ tolerable} = \frac{(1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.116}{\sqrt{t_c}} \quad [V] \quad (5.2.)$$

$$V_{\text{contacto tolerable}} = \frac{(1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.116}{\sqrt{t_c}} \quad [V] \quad (5.3.)$$

-Voltajes de paso y contacto máximas tolerables. (Persona de 70 kg):

$$V_{\text{paso tolerable}} = \frac{(1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.157}{\sqrt{t_c}} \quad [V] \quad (5.4.)$$

$$V_{\text{contacto tolerable}} = \frac{(1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.157}{\sqrt{t_c}} \quad [V] \quad (5.5.)$$

Donde:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0.09} \quad (5.6.)$$

#### Determinación de la configuración inicial

-Longitud total del conductor:

$$L_T = L_c + N \cdot L_v \quad [m] \quad (5.7.)$$

Donde:

$$L_c = \left(\frac{L_x}{D} + 1\right) \cdot L_y + \left(\frac{L_y}{D} + 1\right) \cdot L_x \quad [m] \quad (5.8.)$$

para mallas cuadradas o rectangulares.

-Cálculo del área:

$$A = L_x \cdot L_y \quad [m^2] \quad (5.9.)$$

-Cálculo de la resistencia de puesta a tierra  $R_g$  en ohmios:

$$R_g = \rho \cdot \left( \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{20/A}} \right) \right) \quad [\Omega] \quad (5.10.)$$

-Cálculo del máximo potencial de tierra (GPR):

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad [V] \quad (5.11.)$$

Donde:

$$I_G = 0.9 \cdot I_0 \quad [A] \quad (5.12.)$$

Si  $GPR > V_{\text{contacto}}$  entonces deben calcularse los voltajes de malla y de paso en caso de falla.

-Cálculo de voltaje de malla en caso de falla:

$$V_{\text{malla}} = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \cdot \left( \frac{L_v}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot N \cdot L_v} \quad [V] \quad (5.13.)$$

Donde:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi \cdot ((2 \cdot n) - 1)} \right] \right] \quad (5.14.)$$

$K_{ii} = 1$  para mallas con electrodos de varilla a lo largo del perímetro, en las esquinas o dentro de la malla.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{2/n}} \quad (5.15.)$$



para mallas sin electrodos tipo varilla o con pocas varillas dentro de la malla.

-Luego:

$$K_h = \sqrt{1+h} \quad (5.16.)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \quad (5.17.)$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \quad (5.18.)$$

Donde:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad n_c = \left( \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right)^{\frac{0.7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}} \quad (5.19.)$$

$$L_p = (L_x + L_y) \cdot 2 \quad [m] \quad (5.20.)$$

para mallas cuadradas o rectangulares.

Si  $V_{malla} > V_{contacto}$  , se debe cambiar la configuración de la malla;

Si  $V_{malla} < V_{contacto}$  , se puede pasar a cambiar la tensión de paso.

-Cálculo de voltaje de paso en caso de falla:

$$V_{paso} = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{0.75 \cdot L_c + 0.85 \cdot N \cdot L_v} \quad [V] \quad (5.21.)$$

Donde:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} \cdot (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (5.22.)$$

*Si  $V_{paso} > V_{paso\ tolerable}$  , se debe cambiar la configuración de la malla;*

*Si  $V_{paso} < V_{paso\ tolerable}$  , el diseño a terminado.*

Cabe mencionar que el voltaje de paso esta en función de la resistividad del terreno, y en el caso de un diseño de la malla de puesta a tierra para una subestación, un alto voltaje de paso se lo puede evitar con materiales aislantes en este caso con una mayor capa de ripio u otro tipo de roca cuya resistividad sea alta.

### **a) Materiales**

Los materiales que se utilizarán en la construcción de la malla de puesta a tierra se presentan a continuación:

- Conductor de puesta a tierra (según la corriente de cortocircuito y el tiempo de despeje de fallas).
- Varilla (electrodo) de puesta a tierra Copperweld, 16 mm de diámetro x 1.80 m de longitud.
- Conectores para varillas de puesta a tierra.
- Junturas de las rejillas para la malla de puesta a tierra.

### **b) Mantenimiento**

Para el mantenimiento de las mallas de puesta a tierra se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

- Medición de resistencia de puesta a tierra.
- Medición de equipotencial.
- Medición de ajustes necesarios del sistema.
- Revisar los conectores (existencia de corrosión).
- Retirar conectores y reemplazarlos por suelda exotérmica.
- Tratamiento químico para mejoramiento de suelos.

## 5.2.2. **NORMATIVA VIGENTE DE LA EEQ S.A. PARA PUESTAS A TIERRA** <sup>R31</sup>

En la parte A de las normas para sistemas de distribución de la EEQ S.A. en el punto A-12.10.- «conexiones a tierra» establece que las conexiones a tierra del neutro se efectuarán, por lo menos en los siguientes puntos del sistema:

- a) Para redes de distribución en áreas urbanas: en los centros de transformación y en los dos terminales del circuito secundario más alejados del transformador.
- b) Para redes de distribución en áreas rurales: similar al literal a) y además para circuitos secundarios prolongados en puntos intermedios a intervalos de 200 m.
- c) Para circuitos primarios y líneas de distribución de 23 kV, con neutro continuo: a intervalos de aproximadamente 300 m en toda su longitud y además en los puntos terminales.

Para el diseño de la puesta a tierra la norma establece que el proyectista deberá seleccionar una de las disposiciones tipo para la conexión a tierra, que se muestra en la parte B, sección B -50, de acuerdo al valor de la resistividad del terreno, a fin de obtener un valor de resistencia de puesta a tierra inferior a 25  $\Omega$ .

En la parte B de las normas para sistemas de distribución de la empresa eléctrica Quito referente a «Estructuras Tipo», construcción de los sistemas de distribución sección B-50, señala las siguientes disposiciones tipo para las conexiones a tierra.

### 5.2.2.1. **Disposiciones tipo para líneas y redes de distribución**

#### **Notación:**

ta: Cable de puesta a tierra (conductor de cobre # 2-1/0 AWG).

tb: Conector para varilla de puesta a tierra.

---

<sup>R31</sup> Normas para sistemas de distribución de la EEQ S.A. parte A “Guía para diseño de las redes de distribución” y B referente a “Estructuras Tipo”. Construcción de los sistemas de distribución.

te: Contrapeso (conductor de cobre # 2 AWG).  
 td: Varilla de puesta a tierra, 16 mm  $\varnothing$  x 1,80 m

5.2.2.1.1. Disposición I (T1 -1 )

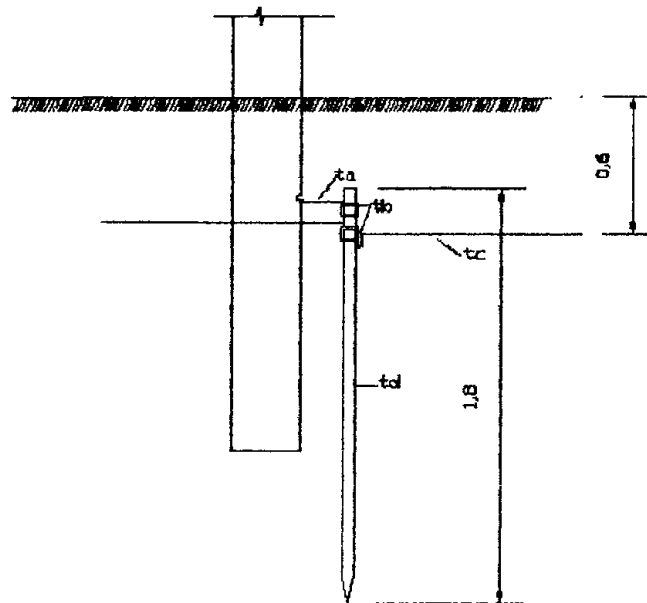


Figura 5.1.- Vista frontal de disposición T1-1.

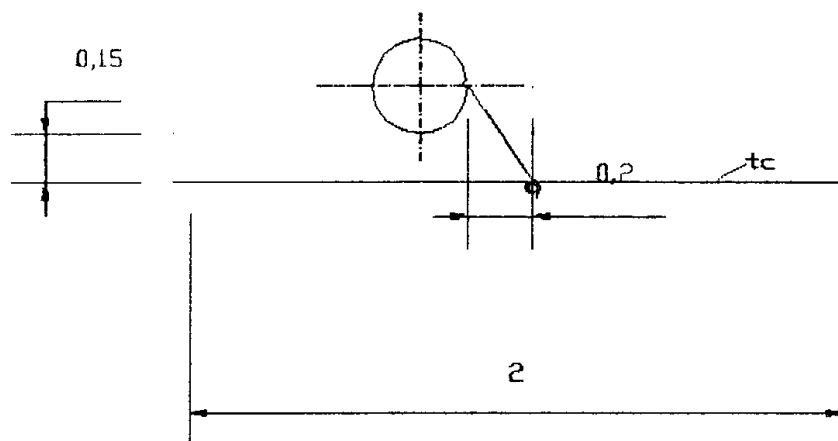


Figura 5.2.- Vista superior de disposición T1-1.

Para esta disposición de acuerdo a la norma (parte B) de la EEQ S.A. se admite una máxima resistencia de puesta a tierra de 25  $\Omega$ , se utiliza cuando la resistividad del terreno es de 100  $\Omega$ .m.

En la siguiente tabla se muestra la lista de materiales para esta disposición:

**Tabla 5.3.- Lista de materiales para la disposición T1-1 (1 varilla).**

Lista de materiales			
Ref	Unidad	Descripción	Cantidad
1	c/u	Varilla de puesta a tierra de Copperweld, 16 mm $\varnothing$ x 1.80 m	1
2	c/u	Grapa Copperweld para varilla de puesta a tierra	2
3	m	Contrapeso, conductor de cobre N°2 AWG	3
4	m	Conductor de cobre desnudo, suave, N°2 AWG	9
5	c/u	Conector paralelo para cobre-aluminio	1

5.2.2.1.2. Disposición II (T1 -2 )

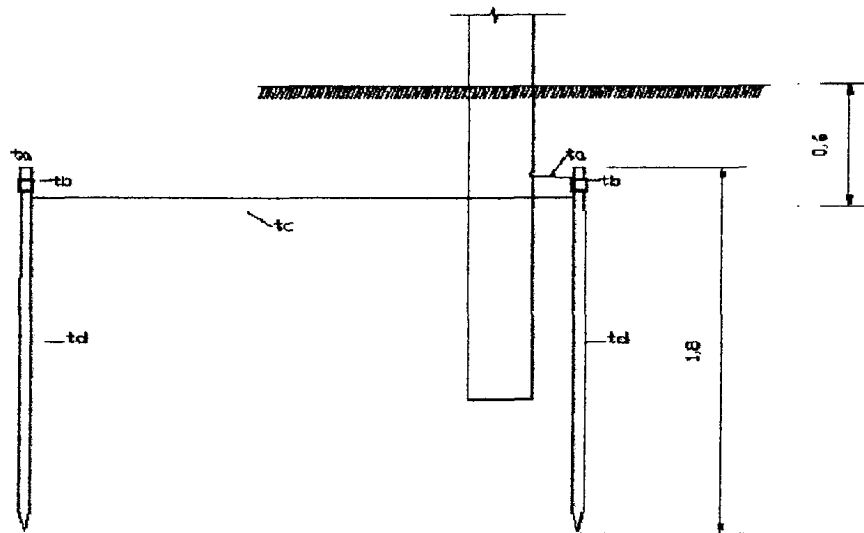


Figura 5.3.- Vista frontal de disposición T1-2.

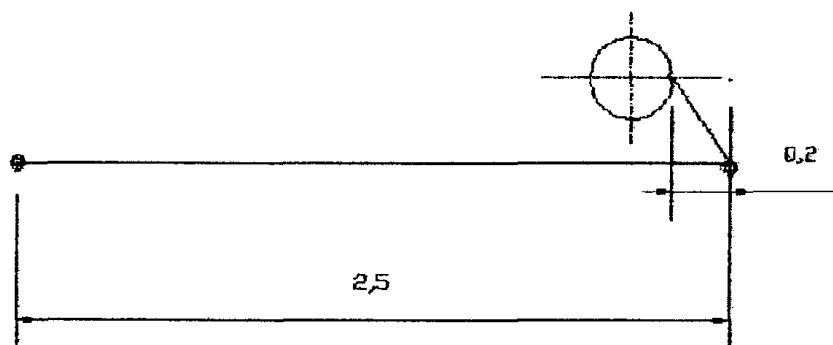


Figura 5.4.- Vista superior de disposición T1-2

Para esta disposición de acuerdo a la norma (parte B) de la EEQ S.A. se admite una máxima resistencia de puesta a tierra de  $25 \Omega$ , se utiliza cuando la resistividad del terreno es de  $130 \Omega.m$ .

En la siguiente tabla se muestra la lista de materiales para esta disposición:

**Tabla 5.4.- Lista de materiales para la disposición T1-2 (2 varillas).**

Lista de materiales			
Ref	Unidad	Descripción	Cantidad
1	c/u	Varilla de puesta a tierra de Copperweld, 16 mm $\varnothing$ x 1.80 m	2
2	c/u	Grapa Copperweld para varilla de puesta a tierra	2
3	m	Contrapeso, conductor de cobre N°2 AWG	3
4	m	Conductor de cobre desnudo, suave, N°2 AWG	9
5	c/u	Conector paralelo para cobre-aluminio	1

#### 5.2.2.1.3. Disposición III (T1 -3 )

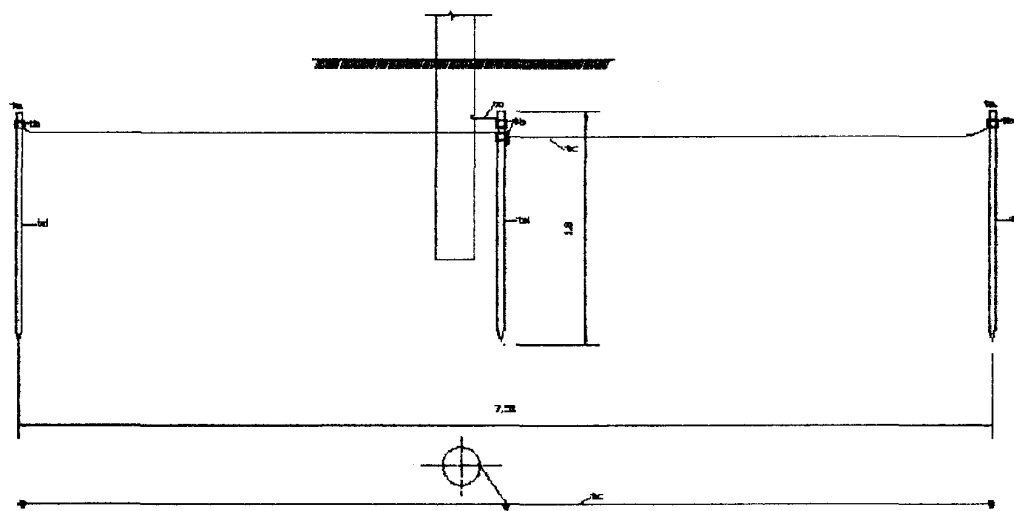


Figura 5.5.- Vista frontal y superior de disposición T1-3.

Para esta disposición de acuerdo a la norma (parte B) de la EEQ S.A. se admite una máxima resistencia de puesta a tierra de  $25 \Omega$ , se utiliza cuando la resistividad del terreno es de  $200 \Omega.m$ .

En la siguiente tabla se muestra la lista de materiales para esta disposición:

Tabla 5.5.- Lista de materiales para la disposición T1-3 (3 varillas).

Lista de materiales			
Ref	Unidad	Descripción	Cantidad
1	c/u	Varilla de puesta a tierra de Copperweld, 16 mm $\varnothing$ x 1.80 m	3
2	c/u	Grapa Copperweld para varilla de puesta a tierra	4
3	m	Contrapeso, conductor de cobre N°2 AWG	8
4	m	Conductor de cobre desnudo, suave, N°2 AWG	9
5	c/u	Conector paralelo para cobre-aluminio	1

5.2.2.1.4. Disposición tipo para instalación en seccionador tripolar para operación con carga (T3).

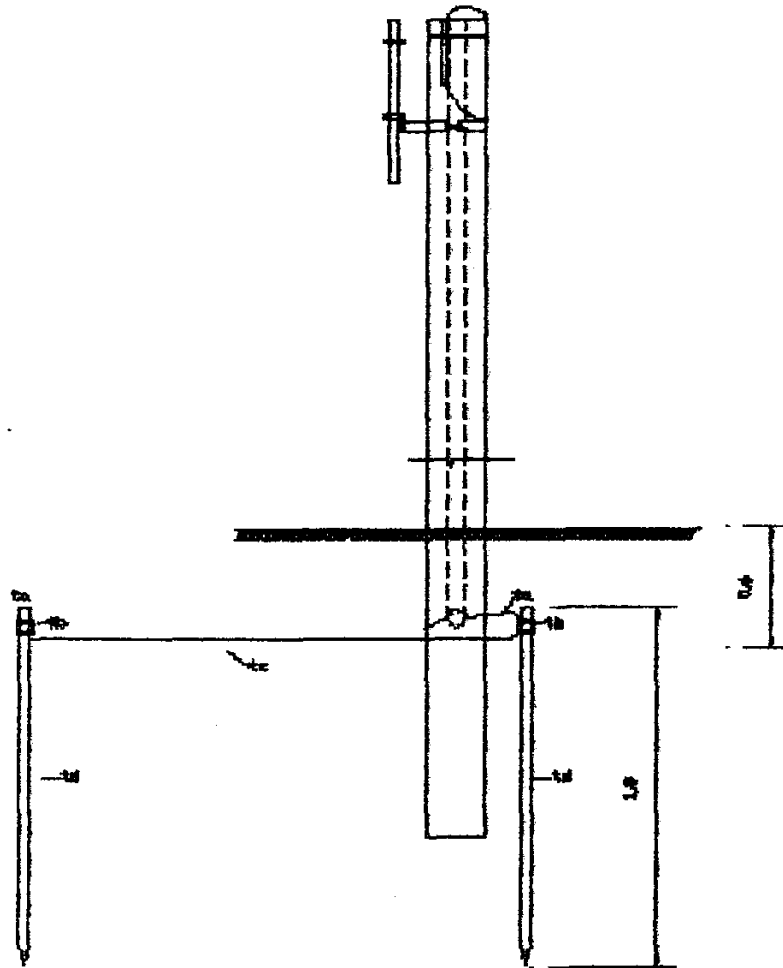


Figura 5.6.- Vista frontal de disposición T3

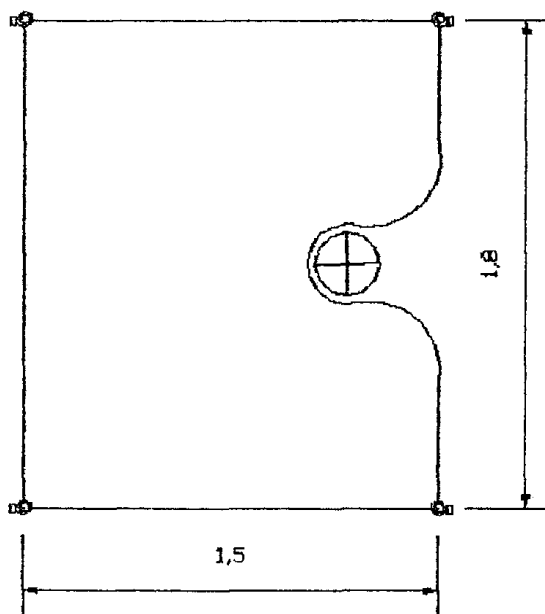


Figura 5.7.- Vista superior de disposición T3

La disposición tipo para la instalación en seccionador tripolar para operación con carga (T3) de la parte B de la norma de la EEQ SA, no especifica ningún valor para resistencia de puesta a tierra, ni condiciones de resistividad para su instalación.

En la siguiente tabla se muestra la lista de materiales para esta disposición:

Tabla 5.6.- Lista de materiales para la disposición T3.

Lista de materiales			
Ref	Unidad	Descripción	Cantidad
1	c/u	Varilla de puesta a tierra de Copperweld, 16 mm $\varnothing$ x 1.80 m	4
2	c/u	Grapa Copperweld para varilla de puesta a tierra	4
3	m	Contrapeso, conductor de cobre N°2 AWG	6
4	m	Conductor de cobre desnudo, suave, N°2 AWG	30

#### 5.2.2.2. Partidas de diseños

Cuando se realizan diseños de proyectos de distribución, las normas de la EEQ S.A. tienen requerimientos referentes a los sistemas de puesta a tierra los cuales deben ser expuestos en partidas de la siguiente manera:



#### 5.2.2.2.1. Partida I.- Conexiones a Tierra

En esta partida se exponen las disposiciones tipo que se utilizan para el diseño del proyecto las cuales fueron explicadas en el punto anterior.

- I-01.- Tipo T1-1
- I-02.- Tipo T1-2
- I-03.- Tipo T1-3
- I-04.- Tipo T3

#### **Descripción:**

La descripción de esta partida consiste en el transporte de materiales desde las bodegas de la empresa o suministro al sitio de implantación y la ejecución de los siguientes trabajos:

- Colocación de una o mas varillas de puesta a tierra de 1.80 m de longitud, enterrada 0.60 m bajo la superficie.
- Colocación y conexión del cable «contrapeso» y/o malla (conductor de cobre # 2 AWG), a las varillas de acuerdo a las disposiciones tipo indicadas en los diseños.
- Conexión del cable o de la malla de tierra al conductor neutro del sistema de distribución, mediante el cable principal de puesta a tierra.

#### **Medición:**

Para la medición de la resistencia de puesta a tierra la norma establece que se efectuará por cada disposición tipo, diferenciándose de acuerdo al número de varillas utilizadas.

#### 5.2.2.2.2. *Partida O.- Obras civiles para cámaras*

En la partida O se expone las obras civiles para la construcción de cámaras de transformación, y también la construcción de la malla de tierra; establece lo siguiente:

##### **Malla de Tierra:**

Consiste en la colocación de la malla y varillas de puesta a tierra de acuerdo a los diseños indicados en los planos, previéndose las derivaciones necesarias para las conexiones a tierra del neutro del transformador, y todas las partes metálicas de los equipos a instalarse.

#### 5.2.2.2.3. *Partida P.- Equipamiento de cámaras*

En la partida P también se establece la instalación de las conexiones a tierra del equipamiento de la cámara de transformación.

##### **Conexiones a tierra:**

Comprende la instalación de todas las conexiones del neutro del transformador, la carcasa del mismo y de todos los elementos metálicos requeridos a la malla de tierra instalada previamente.

### **5.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

#### **5.3.1. CONSIDERACIONES PRELIMINARES**

El análisis de las resistividades del capítulo anterior presentó una clasificación de varios sectores debidamente distribuidos en todo el sector del nuevo aeropuerto desde la vía de entrada al mismo hasta la pista, se trata específicamente de 13 zonas, cada una de ellas representa un patrón de resistividades, medidas a lo largo de un día determinado.

Teniendo en consideración lo expuesto anteriormente, se propone diseñar tomando como muestra estadística de los 13 lugares un porcentaje del 10% que equivale a 1.3 lugares, pero para involucrar los dos tipos de diseño para centros de transformación (aéreos y cámaras) así que se ha designado uno diferente para cada caso, considerando los más problemáticos de todos o de condiciones adversas y teniendo siempre en cuenta los valores de resistividad medidos.

### 5.3.2. DISEÑOS NORMALIZADOS CARACTERÍSTICOS PARA EL SECTOR DEL NUEVO AEROPUERTO DE QUITO

#### 5.3.2.1. Diseño de puesta a tierra para un transformador aéreo

##### 5.3.2.1.1. Sector: Campamento (I)

Se ha seleccionado este sector con la finalidad de involucrar el perfil de resistividad en función de la separación de los electrodos pues solo en este nivel se realizó dicha forma de medición. Por lo tanto como se estableció en el capítulo 4, se presenta una característica descendente por lo tanto la manifestación de por lo menos dos capas de terreno (suelo heterogéneo), enseguida, siguiendo los pasos del inciso [3.4.2.] para determinar  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_a$  y  $h$ .

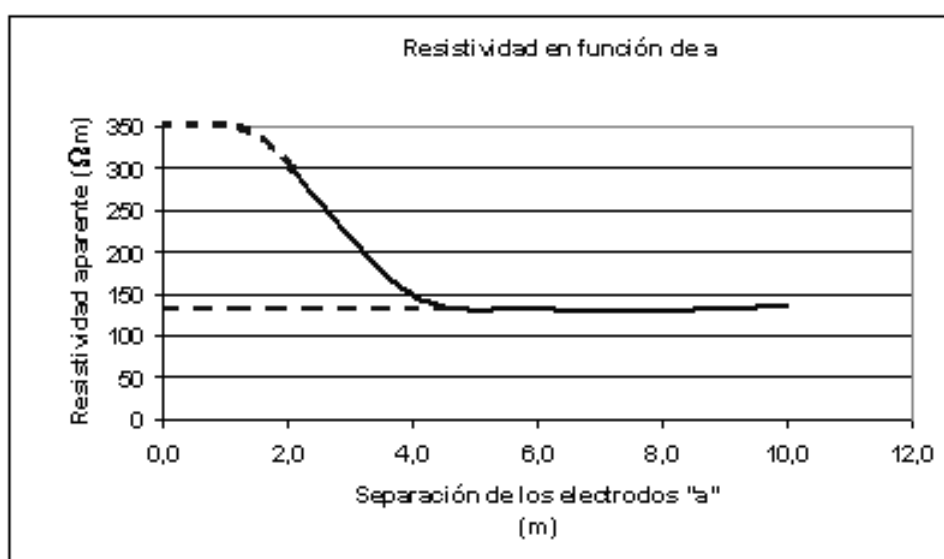


Figura 5.8.- Extrapolación del perfil de resistividad para  $b = 0.5$  m.

### 5.3.2.1.2. Proceso de diseño

Primero se extrapola la curva de la Figura 4.4. haciendo valores mucho más pequeños de «a» y también mucho más grandes, consiguiendo de esta manera en la Figura 5.8. las resistividades  $\rho_1 = 350 \Omega \cdot m$  y  $\rho_2 = 140 \Omega \cdot m$ .

A continuación se hace  $\rho_2 / \rho_1$ :

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{140}{350} = 0.4$$

Enseguida se ubica este valor en la grafica del ANEXO N° 2 (Método de Sunde), obteniéndose un valor de  $\rho_a / \rho_1 = 0.5$ ; luego despejando  $\rho_a$ .

$$\rho_a = 0.5 \cdot 350 = 175 \quad [\Omega \cdot m]$$

Con este valor se observa en la misma gráfica la abcisa correspondiente a 0.5, el mismo que es:  $a/h = 4$ .

Luego se ubica  $\rho_a$  en la curva del ANEXO N° 3, consiguiendo la coordenada del eje x, dando el resultado de  $a = 13$ .

Por último se utiliza la siguiente expresión para calcular la altura a la que se encuentra la capa inferior «h»:

$$h = \frac{a}{a/h} = \frac{13}{4} = 3.25 \quad [m]$$

Y de esta manera se ha determinado los parámetros de las dos capas de terreno.

Para la puesta a tierra se considerará la disposición de los electrodos del ítem N° 4 de la Tabla 5.1. y del mismo modo para coincidir con la propuesta tipo T1-3 de la normativa de la EEQ S.A. (tres varillas).

Entonces se procede a calcular la resistencia de puesta a tierra teniendo como único dato de diseño la resistividad aparente encontrada por el método de los dos suelos de Sunde, que es de  $175 \Omega \cdot m$ . Se tiene que la resistencia de puesta a tierra viene dada por la siguiente expresión:

$$R_{PT} = \frac{\rho}{N} \cdot \left( 0.404 + \frac{0.16}{S} \cdot \ln(0.655 \cdot N) \right)$$

Donde N es el número de electrodos en línea recta y  $S > 2L$ , por lo tanto:

$$R_g = R_{PT} = \frac{175}{3} \cdot \left( 0.404 + \frac{0.16}{4} \cdot \ln(0.655 \cdot 3) \right)$$

$$R_g = R_{PT} = 25.14 \approx 25 \quad [\Omega]$$

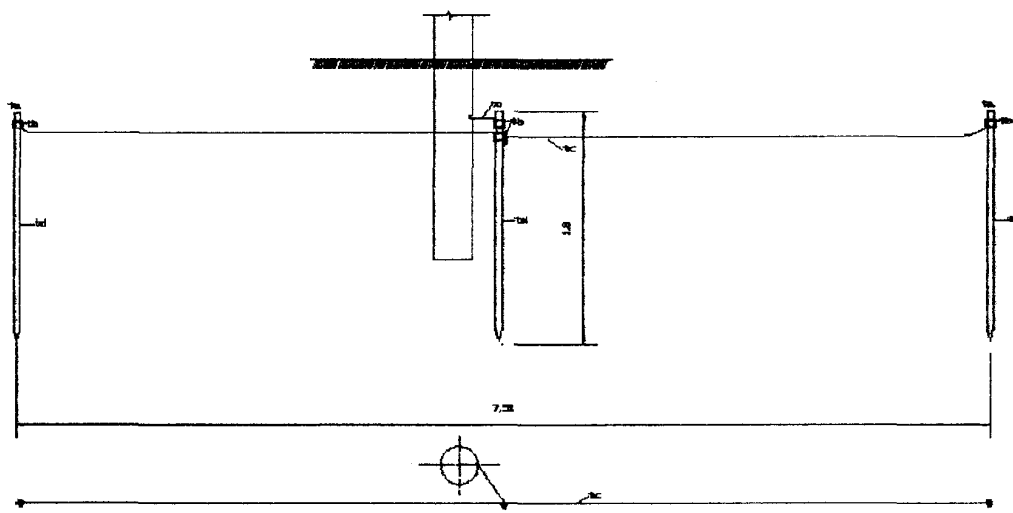


Figura 5.9.- Disposición T1-3 utilizada.

Sí cumple con la Norma (parte B) de la EEQ S.A. que admite una máxima resistencia de puesta a tierra de  $25 \Omega$ ., ya que con este diseño predeterminado se encontró su valor, pero llegando al límite.

Entonces se sugiere incrementar una varilla en dicha disposición para bajar la resistividad a  $19.4 \Omega$ , valor que es mucho más adecuado para la puesta a tierra.

Tabla 5.7.- Lista de materiales requeridos.

Lista de materiales			
Ref	Unidad	Descripción	Cantidad
1	c/u	Varilla de puesta a tierra de Copperweld, 16 mm $\varnothing$ x 1.80 m	3
2	c/u	Grapa Copperweld para varilla de puesta a tierra	4
3	m	Contrapeso, conductor de cobre N°2 AWG	8
4	m	Conductor de cobre desnudo, suave, N°2 AWG	9
5	c/u	Conector paralelo para cobre-aluminio	3

## 5.3.2.1.3. Análisis económico

## Materiales utilizados

Nº	Descripción	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo total(\$)
1	Varilla de puesta a tierra de Copperweld, 16 mm $\varnothing$ x 1.80 m	3	7.98	23.94
2	Grapa Copperweld para varilla de puesta a tierra	4	1.25	5.00
3	Contrapeso, conductor de cobre N°2 AWG	8	2.54	20.32
4	Conductor de cobre desnudo, suave, N°2 AWG	9	2.54	22.86
5	Conector paralelo para cobre-aluminio	3	0.88	2.64
			<b>TOTAL</b>	74.76

## Mano de obra

Nº	Descripción	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo total(\$)
1	Albañil	1	15	15
2	Ayudante	1	8	8
			<b>TOTAL</b>	23

## Herramientas utilizadas

Nº	Descripción	Cantidad	Valor (\$)	Depreciación (5%)
1	Alicate	1	14.5	0.76
2	Combo	1	9.65	0.48

3	Pala	1	6.76	0.34
4	Juego de Rachas	1	28.00	1.40
5	Barreta	1	16	0.80
			<b>TOTAL</b>	3.78

### Costo total de la obra

Razón	Costo (\$)
Materiales	74.76
Mano de obra	23.00
Herramientas	3.78
Ingeniería	250.00
Imprevistos	15.00
Subtotal	366.54
IVA	43.98
<b>TOTAL</b>	<b>410.52</b>

### 5.3.2.2. Cámara de transformación

#### 5.3.2.2.1. Sector: Pista Noroeste y Norte (3-I)

Se ha escogido este lugar para diseñar una malla de puesta tierra cuya área sea de  $128 \times 96 \text{ m}^2$ , para una subestación de 138 kV a 23 kV que sirva para cubrir la carga de todo el nuevo aeropuerto y de las parroquias aledañas como Tababela, Yaruquí, Checa y el Quinche. La resistividad más grande de este lugar se la ha seleccionado como aparente, suponiendo un suelo uniforme ( $\rho = 283 \Omega \cdot \text{m}$ ).

#### 5.3.2.2.2. Proceso de diseño

Como se ha mencionado en el apartado anterior, al tratarse de un sistema grande de puesta a tierra se debe requerir de la Norma IEEE Std 80-2000, entonces utilizando las consideraciones del inciso [5.2.1.1.2] se tienen los siguientes datos:

#### Datos de diseño:

Duración de la falla $I_f^*$	= 0.5 s
Impedancia de secuencia positiva equivalente del sistema $Z_1^*$	= $4.0 + j10.0 \Omega$ (138 kV)
Impedancia de secuencia cero equivalente del sistema $Z_0^*$	= $10.0 + j40.0 \Omega$ (138 kV)

Voltaje de línea-a-línea a la situación de peor-falla *	= 138000 V
Resistividad del suelo $\rho$ **	= 283 $\Omega \cdot m$
Resistividad de la piedra aplastado o ripio superficial $\rho_s$ *	= 2500 $\Omega \cdot m$
Espesor de la piedra aplastada $h_s$ *	= 0.10 m
La profundidad de entierro de la malla $h$ *	= 0.5 m
Área conectado con tierra disponible $A$ **	= 12288 m <sup>2</sup>
Impedancia del transformador, ( $Z_1$ y $Z_0$ ) *	0.034+j1.014 $\Omega$ (23 kV)
(20MVA de $Z=9\%$ a 138/23kV)	

\* Datos asumidos y/o recomendados por la norma.

\*\* Valores reales medidos respectivamente.

### Constantes:

$\rho$  = Resistividad aparente del terreno tomado como un suelo uniforme ( $\Omega \cdot m$ ).

$I$  = Corriente de falla monofásica a tierra en el secundario (kA).

$I_o$  = Corriente de falla monofásica a tierra en el primario (A).

$T_c$  = Tiempo de despeje de fallas (s).

$K_f$  = Constante para diferentes materiales a diferentes temperaturas de fusión  $T_m$  y una temperatura ambiente de 40°C.

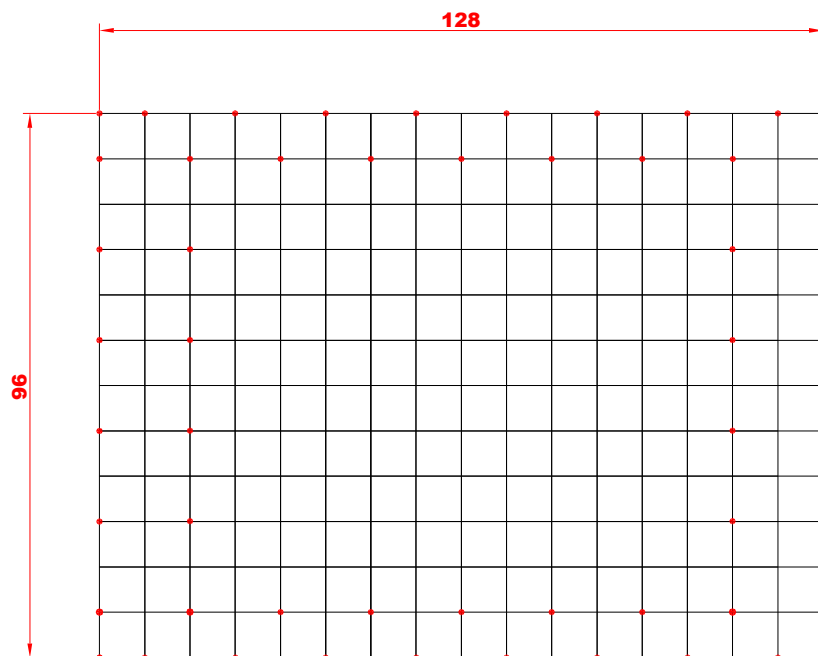


Figura 5.10.- Malla de puesta a tierra para una subestación de 138 a 23 kV, 128 x 96 m<sup>2</sup>, con 54 electrodos de tierra de 7.5 m c/u,  $D = 8$  m.



Primeramente se calcula la corriente de falla con la siguiente ecuación:

$$I_0 = \frac{E}{3 \cdot R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (5.23.)$$

Para falla en la barra de 138 kV:

$$3I_0 = \frac{3 \cdot (138000/\sqrt{3})}{3 \cdot (0) + (4 + 4 + 10) + j(10 + 10 + 40)} = 1096.436 - j3654.786 \quad [A]$$

$$|3I_0| = 3015.7 \quad [A]$$

$$X/R = 3.33$$

Reflejada al lado de 23 kV y suponiendo una conexión delta-y del transformador, solo la impedancia de secuencia positiva en 138 kV es transferida:

$$Z_1 = \left( \frac{23}{138} \right)^2 (4 + j10) + 0.034 + j1.014 \quad [\Omega]$$

$$Z_1 = 0.145 + j1.2917 \quad [\Omega]$$

$$Z_0 = 0.034 + j1.014 \quad [\Omega]$$

$$3I_0 = \frac{3 \cdot (23000/\sqrt{3})}{3 \cdot (0) + (0.145 + 0.145 + 0.034) + j(1.291 + 1.291 + 1.014)} = 989.36 - j10984.99 \quad [A]$$

$$|3I_0| = 11029.46 \quad [A]$$

$$X/R = 11.10$$

Conductor a utilizar, ecuación (5.1):

$$A_{mm^2} = \frac{I \cdot K_f \cdot \sqrt{t_c}}{1.9740} \quad [mm^2]$$

Utilizando la tabla del ANEXO N° 8, se escoge el valor de  $K_f = 7.06$  y multiplicando este por un factor de construcción para cables de cobre, igual a 2, se tiene:

$$A_{mm^2} = \frac{11.02946[kV] \cdot 7.06 \cdot 2 \cdot \sqrt{0.5}}{1.9740} = 55.78 \quad [mm^2]$$

Sección que se encuentra entre los cables 1/0 y 2/0 AWG, que por seguridad se selecciona siempre el calibre del inmediato superior, es decir se deberá utilizar el conductor 2/0 AWG cuya sección es  $67.42 \text{ mm}^2$  (Ver ANEXO N° 9) y cuyo diámetro mínimo es  $d_{\min} = 0.0065 \text{ m}$ , ahora aproximando se tiene  $d = 0.01 \text{ m}$ .

Voltajes de paso y contacto máximas tolerables (Persona de 70 kg) ecuaciones (5.4.) a la (5.6.):

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{283}{2500}\right)}{2 \cdot 0.1 + 0.09} = 0.7247$$

$$V_{\text{paso tolerable}} = \frac{(1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.157}{\sqrt{t_c}} = \frac{(1000 + 6 \cdot 0.7247 \cdot 2500) \cdot 0.157}{\sqrt{0.5}} = 2635.63 \quad [V]$$

$$V_{\text{contct tolerable}} = \frac{(1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.157}{\sqrt{t_c}} = \frac{(1000 + 1.5 \cdot 0.7247 \cdot 2500) \cdot 0.157}{\sqrt{0.5}} = 825.43 \quad [V]$$

Determinación de la configuración inicial:

Longitud total del conductor ecuaciones (5.7) y (5.8.):

$$L_c = \left(\frac{L_x}{D} + 1\right) \cdot L_y + \left(\frac{L_y}{D} + 1\right) \cdot L_x = \left(\frac{128}{8} + 1\right) \cdot 96 + \left(\frac{96}{8} + 1\right) \cdot 128 = 1632 + 1664 = 3296 \quad [m]$$

$$L_T = L_c + N \cdot L_v = 3296 + 54 \cdot 7.5 = 3701 \quad [m]$$

Cálculo del área (previamente ya dimensionada):

$$A = 128 \cdot 96 = 12288 \quad [m^2]$$

Cálculo de la resistencia de puesta a tierra  $R_g$  en ohmios ec. (5.10.):

$$R_g = \rho \cdot \left( \frac{1}{L_r} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1+h \cdot \sqrt{20/A}} \right) \right) = 283 \cdot \left( \frac{1}{3701} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot 12288} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1+0.5 \cdot \sqrt{20/12288}} \right) \right)$$

$$R_g = 1.2068 \quad [\Omega]$$

Cálculo del máximo potencial de tierra (GPR) ec.(5.11.) y (5.12.), para lo cual se toma la corriente referida al lado de 23 kV:

$$I_G = 0.9 \cdot I_0 = 0.9 \cdot 3015.7 = 2714.13 \quad [A]$$

$$GPR = 2714.13 \cdot 1.2068 = 3275.41 \quad [A]$$

Si  $GPR > V_{\text{contacto}}$  entonces se deben calcular los voltajes de malla y de paso en caso de falla, (efectivamente,  $3275.41 \text{ V} > 825.43 \text{ V}$ ):

Cálculo de voltaje de malla en caso de falla ec. (5.13.-5.19.):

$K_{ii} = 1$  para mallas con electrodos de varilla a lo largo del perímetro, en las esquinas o dentro de la malla.

$$K_h = \sqrt{1+h} = \sqrt{1+0.5} = 1.225$$

$$L_p = (L_x + L_y) \cdot 2 = (128 + 96) \cdot 2 = 448 \quad [m]$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} = \frac{2 \cdot 3296}{448} = 14.71$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{448}{4 \cdot \sqrt{12288}}} = 1.005$$

$$n_c = \left( \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right)^{\frac{0.7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}} = \left( \frac{128 \cdot 96}{12288} \right)^{\frac{0.7 \cdot 12288}{128 \cdot 96}} = 1$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c = 14.71 \cdot 1.005 \cdot 1 = 14.784$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n = 0.644 + 0.148 \cdot 14.784 = 2.832$$

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

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{8^2}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.01} + \frac{(8+2 \cdot 0.5)^2}{8 \cdot 8 \cdot 0.01} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.01} \right] + \frac{1}{1.225} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi \cdot ((2 \cdot 14.784) - 1)} \right] \right] = 0.771$$

$$V_{malla} = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \cdot \left( \frac{L_v}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot N \cdot L_v} = \frac{283 \cdot 2714.13 \cdot 0.771 \cdot 2.832}{3296 + \left[ 1.55 + 1.22 \cdot \left( \frac{7.5}{\sqrt{128^2 + 96^2}} \right) \right] \cdot 54 \cdot 7.5}$$

$$V_{malla} = 424.92 \quad [V]$$

Entonces se tiene  $V_{malla} < V_{contacto}$  ( $424.92 \text{ V} < 825.43 \text{ V}$ ), se puede pasar a cambiar la tensión de paso.

Cálculo de voltaje de paso en caso de falla:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} \cdot (1 - 0.5^{n-2}) \right] = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{2 \cdot 0.5} + \frac{1}{8+0.5} + \frac{1}{8} \cdot (1 - 0.5^{17.784-2}) \right] = 0.437$$

$$V_{\text{paso}} = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{0.75 \cdot L_c + 0.85 \cdot N \cdot L_v} = \frac{283 \cdot 2714.13 \cdot 0.437 \cdot 2.832}{0.75 \cdot 3296 + 0.85 \cdot 54 \cdot 7.5} = 337.54 \quad [V]$$

Si cumple con la norma pues  $V_{\text{paso}} < V_{\text{paso tolerable}}$ , ( $337.54 \text{ V} < 2635.63 \text{ V}$ ), en consecuencia el diseño a terminado correctamente.

### 5.3.2.2.3. Análisis económico

#### Materiales utilizados

Nº	Descripción	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo total(\$)
1	Varilla de puesta a tierra de Copperweld, 16 mm ø x 7.5 m	54	35	1912.21
2	Suelda Cadweld puesta a tierra	54	3.15	170
3	Conductor de cobre 2/0 AWG x m	3296	5.54	18259.84
4	Conector paralelo para cobre-varilla y conductor	67	0.88	58.96
5	Volquete de ripio	4	100	400
			<b>TOTAL</b>	20801.01

#### Mano de obra

Nº	Descripción	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo total(\$)
1	Albañil	10	100	1000
2	Ayudante	5	50	250
			<b>TOTAL</b>	1250

#### Costo total de la obra

Razón	Costo (\$)
Materiales	20801.01
Mano de obra	1250.00
Logística	100.00
Ingeniería	1500.00
Imprevistos	100.00
Subtotal	23351.01
IVA	2802.12
<b>TOTAL</b>	26553.13

## CAPÍTULO 6.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- Las condiciones del terreno, del medio ambiente o temperatura y principalmente de la estacionalidad del año influyen directamente en el valor medido de la resistividad del suelo, es decir se comporta muy variable con respecto a estas características, así en días calurosos (valores altos), con humedad o lluviosos (valores bajos).
- El sector del nuevo aeropuerto internacional de Quito tiene suelos con valores de resistividad relativamente medios y altos, en un rango de 30  $\Omega\cdot m$  a 315  $\Omega\cdot m$ . determinados en trece casos de mediciones distribuidos alrededor del área de la pista y en el vía de acceso a la misma.
- Las resistividades más altas de todo el proceso (132 - 314  $\Omega\cdot m$ ), se encontraron en el sector adyacente al campamento del nuevo aeropuerto, debido principalmente al clima cálido y soleado (29°C), independientemente de tener el suelo húmedo parcialmente (leves precipitaciones acontecidas al día anterior de la medición).
- En esta misma zona se fue modificando el proceso de medición al cambiar en cada toma la distancia de separación de las picas y la profundidad de empotramiento. Desde 10 hasta 2 m en intervalos de 2 y de 0.3 a 0.5 m, es así que para este caso a más de la curva patrón se pudo graficar el perfil de resistividad que considera a un suelo de diferentes capas.
- En cambio las resistividades más bajas se ubicaron en la entrada del conector Alpachaca, pues al contrario que en la pista, este sector se caracteriza por una

morfología del terreno totalmente diferente, más húmeda y con mayor presencia de vegetales y arbustos verdes. Intervalo de 30 a 45  $\Omega$ -m.

- Al efectuar las mediciones de resistividad se pudo observar también que mientras se aumentó la profundidad de clavado de los electrodos de medición de 0.3 a 0.5 m disminuyó la resistividad del terreno respectivamente, comportándose ésta, inversamente proporcional a la profundidad de empotrado.
- El diseño y el cálculo de la resistencia realizado para centro de transformación aéreo presenta una resistencia de puesta a tierra de 25  $\Omega$ , cumpliendo con la norma de la EEQ S.A. para puestas a tierra, sin embargo se ha calculado un valor de 19.4  $\Omega$  como óptimo para el diseño del mismo.
- El dimensionamiento e instalación del contrapeso en las estructuras tipo permite reducir el valor de resistencia de puesta a tierra a valores iguales o inferiores a 25  $\Omega$ , además que teóricamente garantiza una mejor distribución de las corrientes en el suelo.
- Para que el diseño de la malla de puesta a tierra consiga una resistencia  $R_g = 1.21 \Omega$  dentro de los estándares, se consideró una configuración con varillas en el contorno o perímetro y además en su interior formando un sector hueco inferior y más distribuido alrededor de la rejilla, con la finalidad de disminuir los picos de voltajes, ya sean de contacto o de paso en los intersticios de las uniones de los conductores y en las esquinas.
- Pero al mismo tiempo que se reduce el peligro en el área de la malla también aumenta el número de varillas, elevándose al mismo tiempo los costos de diseño, es así que en este caso los costos son sumamente superiores a los calculados para pequeñas puestas a tierra.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar cursos de capacitación en sistemas de puesta a tierra ya que es necesario conocer las diversas técnicas de medición de resistividad o de resistencia y también para poder manejar los nuevos instrumentos de medida que están en el mercado para la correcta utilización de los mismos.
- La normativa de la Empresa Eléctrica Quito S.A. está vigente desde 1979, por lo que se recomienda la actualización de las normas, tomando en cuenta el uso de las soluciones propuestas en este proyecto para las futuras instalaciones de sistemas de puesta a tierra que deben ser debidamente actualizados, es decir una revisión en la norma para valores mayores de 175  $\Omega$ .
- Para las mediciones de resistividad es recomendable utilizar el método de Wenner, debido a que sus resultados son confiables siempre y cuando los electrodos auxiliares estén enterrados a una profundidad aceptable entre 30 y 50 cm.
- Al efectuar mediciones de campo en áreas sumamente extensas es recomendable conseguir la ayuda de un ayudante y de un vehículo, con el fin conseguir mejores resultados y también para agilizar el proceso.
- Para tener un error menos significativo y tener menos inconvenientes en las mediciones de los suelos es necesario reemplazar los equipos analógicos por equipos digitales.
- Un sistema de puesta a tierra se debe diseñar para la condición de resistividad del suelo mas alta, sin embargo la no existencia de ésta información limita las exigencias del sistema de puesta a tierra, razón por la cual se sugiere la realización de un mapa de resistividades más detallado del que se ha elaborado y con líneas de equirresistividad como complemento al análisis realizado.



- De las propuestas de mejoramiento de resistencia de puesta a tierra, la inclusión de conductor de contrapeso es la de mejor resultado debido a la adición de poco material y facilidad de instalación, además que con la implementación de este, se mejora satisfactoriamente el valor de resistencia de puesta a tierra.
- Se recomienda aumentar una varilla más en la en la disposición T1-3 para bajar la resistividad de puesta a tierra, con lo cual se reduce de 25 a 19  $\Omega$ , o mejorar la resistividad del suelo, por ejemplo si de 175  $\Omega$  disminuyera a 168  $\Omega$  valores que son más adecuados para la puesta a tierra.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [R1] SEARS, F.; ZEMANSKY, M. University Physics. Tercera edición. Editorial Addison-Wesley publishing Co. & Aguilar S.A. ediciones. 1966.
- [R2] MARTÍNEZ R., Juan. "Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas". Editorial Paraninfo. Madrid España. 2000.
- [R3] PROCAINSA. "La corrosión". <http://www.procainsa.com/p-integral/p-integr.html>
- [R4] RUELSA. "Teoría y diseño de sistemas de tierras según las normas NOM e IEEE". <http://www.ruelsa.com/notas/tierras.html>.
- [R5] LIEBERT. "Tierras Aisladas". <http://www.liebert.com/tierras-aisladas.html>
- [R6] BENT, R. B. "Lightning and the hazards it produces for explosive facilities". ACS Symp. Series No. 96. 1979. p 81.
- [R7] DURHAM, M.O. "Submersible power supply considerations. Electric Submergible Pump Workshop". Society of Petroleum Engineers. Houston TX, April 1986.
- [R8] IEEE Std 80-2000. "Guide for Safety in AC Substation Grounding".
- [R9] PROCOBRE. "Sistema de Conexión a Tierra". [http://www.procobreperu.org/f\\_sisconex/.html](http://www.procobreperu.org/f_sisconex/.html).
- [R10] AGULLEIRO, Ignacio; MARTÍNEZ, Miguel. "Técnicas Modernas para la Medición de Sistemas de Puesta a Tierra Urbanas" Extracto.

- [R11] PROCAINSA. “Sistemas de Puesta a Tierra”  
[http://www.procainsa.com/ingenieriadeproteccioncatodicaysobretensiones\\_archivos\pt.htm](http://www.procainsa.com/ingenieriadeproteccioncatodicaysobretensiones_archivos\pt.htm)
- [R12] PROCAINSA. “Protección de Estaciones”.  
<http://www.procainsa.com/noticias/iberia-actualidad.html>
- [R13] Código NACE-TM-0497-1997 “Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems” Técnicas de medición.
- [R14] NOM. <http://www.procainsa.com/noticias/diario-oficial/nom-actualidad.html>
- [R15] IEEE Std 142-1991. “Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”. Green Book.
- [R16] IEEE Std 141-1993. “Electric Power Distribution for Industrial Plants”. 1986.
- [R17] ANSI/NFPA 780. “Lightning Protection Code”. National Fire Protection Association, Batterymarch Park, Quincy MA 12269.
- [R18] ANSI/NFPA 78-1989.
- [R19] NEC’. McGraw-Hill's National Electrical Code Handbook 1993. McGraw-Hill. New York NY.
- [R20] Effects of Electrical Grounding on Pipe Integrity and Shock Hazard. American Water Works Association, JOURNAL AWWA July 1998. Vol. 90, No. 7. págs. 40 – 52.
- [R21] Normas americanas: MIL-STD-1542B, MIL-HDBK-419 y MIL-STD-188-124.
- [R22] <http://www.members.tripod.com/JaimeVp/Electricidad/electric1.HTM>

[R23] NTE–IEP /1973.

[R24] FREIRE, Jaime. “Experimentación en Suelos para el Diseño de Mallas de Tierra”. E.P.N. 1978.

[R25] AYORA, Paúl. “Apuntes de Diseño de Alto Voltaje” Capítulo I (Instalaciones de Puesta a Tierra).

[R26] LARROSA, Fernando. “Información General del NAIQ” AECON Andrade Gutiérrez.

[R27] DAC “Dirección de Aviación Civil del Ecuador” (Archivos de Tormentas en la parroquia Tababela).

[R28] NEC. Código eléctrico nacional (Ecuador). INEN.

[R29] Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) Colombia.

[R30] CASAS OSPINA, Favio. “Tierras Soporte de la Seguridad Eléctrica”.

[R31] Normas para sistemas de distribución de la EEQ S.A. parte A “Guía para diseño de las redes de distribución” y B referente a “Estructuras Tipo”. Construcción de los sistemas de distribución.