



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

**TITULACIÓN DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**Metodología para el diseño de sistemas de puesta a tierra para baja
tensión**

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTORES: Cabrera Tituana, Ronny Israel.
Salinas Rojas, Emilio José.

DIRECTOR: Dávila Vargas, Fernando Marcelo, Ing.

LOJA – ECUADOR

2014

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

Ingeniero.

Fernando Marcelo Dávila Vargas

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación: "Metodología para el diseño de sistemas de puesta a tierra para baja tensión" realizado por Ronny Israel Cabrera Tituana y Emilio José Salinas Rojas, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, febrero de 2014

f).

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Nosotros, Cabrera Tituana Ronny Israel y Salinas Rojas Emilio José, declaramos ser los autores del presente trabajo de fin de titulación: Metodología para el diseño de sistemas de puesta a tierra para baja tensión, de la Titulación de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, siendo Fernando Marcelo Dávila Vargas director del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f).
Autor: Cabrera Tituana, Ronny Israel
Cédula: 1104700636

f).....
Autor: Salinas Rojas, Emilio José
Cédula: 1104898935

DEDICATORIA

Con mucho cariño dedico este logro a mis Madres Martha y María Esther, por ser el pilar fundamental y el apoyo incondicional en mi vida y formación profesional; a mi hermana Gabriela por darme el cariño y la fuerza necesaria para vencer las adversidades y seguir siempre hacia adelante; a mis hermanos José Luis y Javier por estar siempre en los malos y buenos momentos con su apoyo incondicional; y a mis adorados sobrinos Andy Gabriel y Martín Sebastián por ser la alegría de mi vida.

Emilio

A mis padres Manuel y María, y, a mis hermanos Fernando, Andy y Jhon; con todo mi cariño, que han hecho todo en la vida para que pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando más lo necesité, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

A IEEE, por ayudarme a crecer como persona y profesional, por el conocimiento, la experiencia y los amigos.

A la Fundación Misión Sonrisa por todas las lecciones de vida.

Con especial cariño y afecto a Manuel Jhared.

Ronny

AGRADECIMIENTO

A Dios por habernos permitido cumplir con esta meta en nuestras vidas.

A nuestros padres por formarnos y por el apoyo incondicional que nos dieron durante la realización de éste proyecto.

A la Universidad Técnica Particular de Loja, en su Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, a sus autoridades y en especial a los docentes que han sabido impartir sus conocimientos.

Al Ingeniero Marcelo Dávila, director del proyecto de fin de carrera, que con su tiempo, paciencia y dedicación nos orientó durante el presente trabajo de investigación.

A nuestras compañeras y compañeros por habernos brindado su amistad y apoyo incondicional en nuestra vida universitaria.

A todas las personas, amigos, familiares y empresas que de una u otra forma colaboraron con la realización de este proyecto de fin de carrera.

Emilio y Ronny.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARATULA	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABLAS	xvi
RESUMEN EJECUTIVO	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 1.....	6
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA ...	6
1.1. Introducción.	7
1.2. Definición de puesta a tierra.	7
1.3. Importancia de los sistemas de puesta a tierra.	8
1.3.1. Importancia de los SPT en la seguridad.....	10
1.3.2. Importancia de los SPT en la calidad de energía [4].	11
1.4. Conceptos relacionados con los SPT [1], [4], [6].....	15
1.5. Composición de una instalación de puesta a tierra [7].	17
1.5.1. El terreno.	18
1.5.2. Tomas de tierra.	18
1.5.3. Conductores de tierra.....	19
1.5.4. Bornes de puesta a tierra.	19
1.5.5. Conductores de protección.....	20
1.5.6. Conductores equipotenciales.	21
1.6. Características de los SPT de baja tensión.....	21
1.6.1. Sistemas de conexión del neutro y de las tierras en redes eléctricas de baja tensión.....	21
1.6.2. Requisitos generales de un sistema de puesta a tierra.	25
1.7. Resistividad de la tierra.	28
1.7.1. Características del suelo y resistividad.	28
1.7.2. Constitución del terreno en el tipo de suelo.	29
1.7.3. Influencia de factores externos en la resistividad del suelo.....	29

1.7.4.	Efectos de la temperatura sobre la resistividad del suelo.	31
1.7.5.	Métodos de medición de la resistividad del suelo.....	31
1.8.	Medición de resistencia de puesta a tierra.....	34
1.8.1.	Método de los dos Puntos o dos Polos [12].	34
1.8.2.	Método de los tres Puntos [13].	36
1.8.3.	Método de curva de caída de potencial [14].....	37
1.8.4.	Método de la regla del 62% [14].	38
1.9.	Técnicas para mejorar la resistencia de los sistemas de puesta a tierra.	39
1.9.1.	Características de un suelo artificial [15].	39
1.9.2.	Utilización de concretos especiales [15].	40
1.9.3.	Utilización de concretos conductivos [15].	41
1.9.4.	Introducción de electrodos al concreto [16].	42
1.9.5.	Tratamiento químico electrolítico del terreno de los pozos [17].	43
CAPÍTULO 2.....		59
2.	REVISIÓN DE LA NORMATIVA QUE RIGEN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.....	59
2.1.	Normativa nacional sobre los sistemas de puesta a tierra.	60
2.1.1.	Regulaciones del CONELEC	60
2.1.2.	Código Eléctrico Nacional Ecuatoriano (NEC).....	61
2.2.	Normativa internacional sobre sistemas de puesta a tierra.....	67
2.2.1.	IEC 61000-5-2. Reporte técnico de Compatibilidad Electromagnética.	67
2.2.2.	IEEE Std 80-2000.....	70
2.2.3.	IEEE Std 142 – 2007.	71
2.2.4.	IEEE Std 141 – 1993.	72
2.2.5.	A manera de conclusión: modelo referencial para el diseño de sistemas de puesta a tierra en baja tensión.....	73
CAPÍTULO 3.....		74
3.	DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA BAJA TENSIÓN	74
3.1.	Metodología de diseño de malla de puesta a tierra.	75
3.2.	Procedimiento de diseño.....	76
3.2.1.	Determinar el área y la resistividad del suelo sobre el que se diseñará la malla de puesta a tierra.	77
3.2.2.	Determinar el tamaño del conductor (sección).....	80
3.2.3.	Determinar los voltajes de toque y de paso tolerables.	82
3.2.4.	Determinar el diseño preliminar.....	84

3.2.5.	Determinar la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra.	85
3.2.6.	Determinar la corriente de la malla.	87
3.2.7.	Determinar la máxima potencia de tierra (GPR).....	88
3.2.8.	Determinar el voltaje de toque y de paso de la malla.	88
3.2.9.	Comparar el voltaje de toque de la malla con el voltaje de toque tolerable.	91
3.2.10.	Comparar el voltaje de paso de la malla con el voltaje de paso tolerable.	91
3.2.11.	Modificar el diseño.	91
3.2.12.	Proporcionar el diseño detallado.	93
3.3.	Diagrama de flujo de diseño de malla de puesta a tierra.	93
3.4.	Ejemplo de diseño de puesta a tierra.	96
3.4.1.	Determinar el área y la resistividad del suelo sobre el que se diseñará la malla de puesta a tierra.	96
3.4.2.	Determinar el tamaño del conductor (sección).....	97
3.4.3.	Determinar los voltajes de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano.	97
3.4.4.	Determinar el diseño preliminar.....	99
3.4.5.	Determinar la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra.	99
3.4.6.	Determinar la corriente de la malla.	100
3.4.7.	Determinar el GPR.	100
3.4.8.	Determinar el voltaje de toque y de paso de la malla.	100
3.4.9.	Comparar los voltajes tolerables con los voltajes de malla.....	102
3.4.10.	Proporcionar el diseño detallado de la malla.	102
CAPÍTULO 4.....		104
4. DIAGNÓSTICO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN BAJA TENSIÓN EXISTENTES EN EL CAMPUS UTPL		104
4.1.	Análisis de operación del equipo de medición Fluke 1625 [26].....	105
4.1.1.	Características generales.....	105
4.1.2.	Especificaciones técnicas y generales del Fluke 1625, Earth/GroundTester.	106
4.1.3.	Procedimiento de las mediciones.....	107
4.1.4.	Mediciones de control de seguridad.	108
4.1.5.	Medición de interferencias - Voltajes y frecuencias.....	108
4.1.6.	Medición de resistividad del terreno.	109

4.1.7.	Medición de resistencia de la conexión a tierra.....	110
4.2.	Mediciones de los sistemas de puesta a tierra en cada edificio del campus UTPL.....	116
4.2.1.	Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado en el edificio de Unidades productivas.....	116
4.2.2.	Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado al edificio de Aulas.	124
4.2.3.	Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado al edificio de Administración Central.....	129
4.2.4.	Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado al edificio del Octógono.....	136
4.2.5.	Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado al centro de convenciones.	143
4.2.6.	Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado a la Cafetería.....	150
4.2.7.	Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado al edificio de Laboratorios.	156
4.2.8.	Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado a la Planta ECOLAC.....	162
4.2.9.	Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado a la Planta CERART.....	168
4.3.	Resumen de mediciones de los sistemas de puesta a tierra en el campus UTPL.....	171
CAPÍTULO 5.....		172
5. PLAN DE MEJORAS Y ACCIONES CORRECTIVAS SOBRE POSIBLES IMPLEMENTACIONES DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN CADA EDIFICIO DEL CAMPUS UTPL		172
5.1.	PLAN DE MEJORAS DEL EDIFICIO DE UNIDADES PRODUCTIVAS.	175
5.1.1.	Análisis Técnico: Diseño.....	175
5.1.2.	Análisis Económico: Presupuesto.....	178
5.2.	PLAN DE MEJORAS DEL EDIFICIO DE AULAS.	179
5.2.1.	Análisis Técnico: Diseño.....	179
5.2.2.	Análisis Económico: Presupuesto.....	183
5.3.	PLAN DE MEJORAS DEL EDIFICIO DE ADMINISTRACIÓN CENTRAL... ..	184
5.3.1.	Análisis Técnico: Diseño.....	184
5.3.2.	Análisis Económico: Presupuesto.....	190
5.4.	PLAN DE MEJORAS DEL EDIFICIO DEL OCTÓGONO.	191

5.4.1.	Análisis Técnico: Diseño.....	191
5.4.2.	Análisis Económico: Presupuesto.....	197
5.5.	PLAN DE MEJORAS DEL CENTRO DE CONVENCIONES.	198
5.5.1.	Análisis Técnico: Diseño.....	198
5.5.2.	Análisis Económico: Presupuesto.....	204
5.6.	PLAN DE MEJORAS DE LA CAFETERÍA.	205
5.6.1.	Análisis Técnico: Diseño.....	205
5.6.2.	Análisis Económico: Presupuesto.....	211
5.7.	PLAN DE MEJORAS DEL EDIFICIO DE LABORATORIOS.....	212
5.7.1.	Análisis Técnico: Diseño.....	212
5.7.2.	Análisis Económico: Presupuesto.....	218
5.8.	PLAN DE MEJORAS DE LA PLANTA ECOLAC.....	219
5.8.1.	Análisis Técnico: Diseño.....	219
5.8.2.	Análisis Económico: Presupuesto.....	225
5.9.	PLAN DE MEJORAS DE LA PLANTA CERART.	226
5.9.1.	Análisis Técnico: Diseño.....	226
5.9.2.	Análisis Económico: Presupuesto.....	228
5.10.	Mantenimiento del sistema de puesta a tierra.....	230
5.10.1.	Inspección de la puesta a tierra	231
5.10.2.	Examen de la puesta a tierra	231
	CONCLUSIONES	233
	RECOMENDACIONES	236
	BIBLIOGRAFÍA	238
	ANEXO 1.....	241
	PAPER: Metodología para el diseño de sistemas de puesta a tierra en baja tensión.....	241

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de un sistema de puesta a tierra.....	9
Figura 1.2. Seguridad al personal que brinda un SPT	11
Figura 1.3. Corriente de fuga a tierra.....	12
Figura 1.4. Interfaces de un solo terminal y de señal diferencial. Arriba: Transmisión de un solo terminal. Abajo: Transmisión diferencial.....	13
Figura 1.5. Compatibilidad electromagnética.....	14
Figura 1.6. Representación esquemática de un SPT.....	17
Figura 1.7. Conductores de tierra.....	19
Figura 1.8. Borne de puesta a tierra.....	20
Figura 1.9. Conductores de protección.....	20
Figura 1.10. Esquema de distribución tipo TN-S.....	23
Figura 1.11. Esquema de distribución tipo TN-C.....	23
Figura 1.12. Esquema de distribución tipo TN-C-S.....	24
Figura 1.13. Esquema de distribución tipo TT.....	24
Figura 1.14. Esquema de distribución tipo IT.....	25
Figura 1.15. Conexión a tierra de un edificio.....	26
Figura 1.16. Mala conexión a tierra de un edificio – disposición 1.....	27
Figura 1.17. Mala conexión a tierra de un edificio – disposición 2.....	27
Figura 1.18. Medición de resistividad del suelo – Método de Wenner.....	32
Figura 1.19. Medición de resistividad del suelo – Método de Schlumberger – Palmer.....	33
Figura 1.20. Medición de resistencia de puesta a tierra – Método de los dos puntos.....	35
Figura 1.21. Medición de resistencia de puesta a tierra – Método de los tres puntos.....	37
Figura 1.22. Medición de resistencia de puesta a tierra – Método de curva de caída de potencial.....	38
Figura 1.23. Medición de resistencia de puesta a tierra – Método de la regla del 62%.....	39
Figura 1.24. Técnicas para mejorar la resistencia de los SPT - Uso de concretos especiales.....	41
Figura 1.25. Concreto conductivo Favigel con electrodo horizontal.....	42
Figura 1.26. Concreto conductivo Favigel con electrodo vertical.....	42
Figura 1.27. Introducción de electrodos al concreto.....	43
Figura 1.28. Caída de tensión con resistividad de bentonita de 2.5 ohm-m.....	44
Figura 1.29. Caída de tensión con resistividad de bentonita de 5 ohm-m.....	44
Figura 1.30. Aplicación del thor-gel – Relleno de pozo.....	46
Figura 1.31. Aplicación del thor-gel – Aplicación de sustancias disueltas en agua.....	46
Figura 1.32. Aplicación del thor-gel – Colocar una caja de registro de concreto con tapa.....	47
Figura 1.33. Comportamiento de la resistividad del suelo con cada dosis de Thor-Gel.....	48
Figura 1.34. Cantidad de bolsas de GEM requeridas para electrodos verticales.....	49

Figura 1.35. Cantidad de bolsas requeridas para cable horizontal.....	49
Figura 1.36. Pasos para la aplicación de GEM en un SPT.	51
Figura 1.37. Comparación del cemento conductor GEM y la arcilla de bentonita.	52
Figura 1.38. Medidas para colocar una varilla copperweld.	52
Figura 1.39. Ángulos para la utilización de varillas copperweld.	53
Figura 1.40. Polvo iniciador de la soldadura exotérmica.....	53
Figura 1.41. Compuesto de soldadura exotérmica.....	54
Figura 1.42. Platos soportes de la soldadura exotérmica.	54
Figura 1.43. Molde de grafito abierto y cerrado de la soldadura exotérmica.	55
Figura 1.44. Molde de grafito abierto y cerrado.	55
Figura 1.45. Materiales complementarios de la soldadura exotérmica.....	55
Figura 1.46. Pasos para una soldadura exotérmica.....	56
Figura 1.47. Esquema de un electrodo electrolítico.	58
Figura 2.1. Concepto erróneo de los "dedicados", o "aislados" tomas de tierra "independientes"	68
Figura 2.2. El concepto de una única puesta a tierra.	69
Figura 2.3. Configuración recomendada para la conexión de puestas a tierra.....	69
Figura 3.1. Curva de resistividad aparente versus espaciamiento entre las puntas de medición.....	78
Figura 3.2. Método gráfico de Sunde para calcular la profundidad de la capa superficial.....	79
Figura 3.3. Diseño preliminar de malla de puesta a tierra.	85
Figura 3.4. Malla de sistema de puesta a tierra con barras verticales en las esquinas.	92
Figura 3.5. Malla de sistema de puesta a tierra con barras verticales en algunas uniones del perímetro.....	92
Figura 3.6. Malla de sistema de puesta a tierra con barras verticales en el perímetro.....	93
Figura 3.7. Diagrama de bloques de la secuencia de pasos para el diseño de la malla de puesta a tierra.	94
Figura 3.8. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Ejemplo.....	99
Figura 4.1. Kit Fluke1625.....	105
Figura 4.2. Medición de interferencias – Voltajes y frecuencias.....	108
Figura 4.3. Medición de la resistividad del terreno.....	109
Figura 4.4. Medición de la resistencia de la conexión a masa- Método.	110
Figura 4.5. Medición de resistencia de la conexión a masa de tres y cuatro polos – Proceso.....	111
Figura 4.6. Medición de 3 o 4 polos de resistencias de electrodos de masa individuales.	112
Figura 4.7. Medición de resistencia de tierra sin estacas.....	114
Figura 4.8. Medición de resistencia de tierra sin estacas – Distancia entre pinzas.	115
Figura 4.9. Diseño del SPT de las instalaciones en general del edificio de Unidades productivas.....	117
Figura 4.10. Diseño del SPT del centro de cómputo del edificio de Unidades productivas.....	118

Figura 4.11. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del edificio de Unidades productivas.	119
Figura 4.12. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Edificio de Unidades productivas.	120
Figura 4.13. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Unidades productivas.	122
Figura 4.14. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Unidades productivas.	122
Figura 4.15. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Unidades productivas.	123
Figura 4.16. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del edificio de Aulas.	125
Figura 4.17. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Edificio de Aulas.	126
Figura 4.18. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Aulas.	128
Figura 4.19. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Aulas.	128
Figura 4.20. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Aulas.	129
Figura 4.21. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del edificio de Administración Central.	131
Figura 4.22. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Edificio de Administración Central.	132
Figura 4.23. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Administración Central. Fuente: Elaborado por los autores.	134
Figura 4.24. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Administración Central.	134
Figura 4.25. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Administración Central.	135
Figura 4.26. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del edificio del Octógono.	138
Figura 4.27. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Edificio del Octógono.	139
Figura 4.28. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio del Octógono. Fuente: Elaborado por los autores.	141
Figura 4.29. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio del Octógono.	141
Figura 4.30. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio del Octógono.	142
Figura 4.31. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del centro de convenciones.	145
Figura 4.32. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - CC.	146

Figura 4.33. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del centro de convenciones. Fuente: Elaborado por los autores...	148
Figura 4.34. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del centro de convenciones.	148
Figura 4.35. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio del centro de convenciones.	149
Figura 4.36. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno de la Cafetería.	151
Figura 4.37. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Cafetería.	152
Figura 4.38. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la cafetería.	154
Figura 4.39. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la cafetería.	154
Figura 4.40. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la Cafetería.....	155
Figura 4.41. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del edificio de Laboratorios.	157
Figura 4.42. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Edificio de Laboratorios.....	158
Figura 4.43. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Laboratorios.....	160
Figura 4.44. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Laboratorios.....	160
Figura 4.45. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Laboratorios.....	161
Figura 4.46. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno de la Planta ECOLAC.	163
Figura 4.47. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Planta ECOLAC.	164
Figura 4.48. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la Planta ECOLAC.....	166
Figura 4.49. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la Planta ECOLAC.....	166
Figura 4.50. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la Planta ECOLAC. Fuente: Elaborado por los autores.	167
Figura 4.51. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno de la Planta CERART.	169
Figura 5.1. Acciones correctivas del SPT del edificio de Unidades Productivas. .	177
Figura 5.2. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Edificio de Aulas. .	180
Figura 5.3. Acciones correctivas del SPT del edificio de Aulas.....	182
Figura 5.4. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Edificio de Administración Central.	186
Figura 5.5. Acciones correctivas del SPT del edificio de Administración Central. .	189
Figura 5.6. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Edificio del Octógono.	193

Figura 5.7. Acciones correctivas del SPT del edificio del Octógono.....	196
Figura 5.8. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Centro de convenciones.	200
Figura 5.9. Acciones correctivas del SPT del edificio de Unidades Productivas. .	203
Figura 5.10. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Cafetería.....	207
Figura 5.11. Acciones correctivas del SPT de la Cafetería de la UTPL.....	210
Figura 5.12. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Edificio de Laboratorios.	214
Figura 5.13. Acciones correctivas del SPT del edificio de Laboratorios.	217
Figura 5.14. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Planta ECOLAC.	221
Figura 5.15. Acciones correctivas del SPT de la Planta de lácteos ECOLAC.	224
Figura 5.16. Acciones correctivas del SPT de la Planta CERART.	229

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Variación de la resistividad con el tipo de suelo	28
Tabla 1.2. Resistividad de tipos de suelos	29
Tabla 1.3. Efecto de la humedad sobre la resistividad del suelo	30
Tabla 1.4. Efecto de la sal sobre la resistividad del suelo	30
Tabla 1.5. Efecto de la temperatura sobre la resistividad del terreno	31
Tabla 1.6. Dosis de THOR-GEL según la naturaleza del suelo.....	47
Tabla 1.7. Dosificación de cemento GEM en función de la resistividad del terreno.	49
Tabla 1.8. Resultados de resistividad del terreno aplicando cemento GEM.	50
Tabla 1.9. Uniones de cable, platina, pieza metálica, varilla, pica mediante solda exotérmica.	57
Tabla 2.1. Conductor del electrodo de tierra de instalaciones de c.a.	65
Tabla 3.1. Valores de resistividad en típicos suelos superficiales	80
Tabla 3.2. Calibre de conductores en diferentes estándares.....	81
Tabla 3.3. Constante k_f para diferentes tipos de material del conductor	81
Tabla 3.4. Valores típicos del factor de decremento para un $X/R=10$	87
Tabla 3.5. Parámetros de diseño del procedimiento de diseño de la malla de puesta a tierra.....	95
Tabla 3.8. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio de Unidades productivas.....	103
Tabla 4.1. Especificaciones técnicas de las funciones del Fluke 1625, Earth/GroundTester.....	107
Tabla 4.2. Especificaciones de ambiente, mecánicas y generales del Fluke 1625, Earth/GroundTester.....	107
Tabla 4.3. Ficha de mediciones realizadas en el edificio de Unidades productivas.	120
Tabla 4.4. Ficha de mediciones realizadas en el edificio de Aulas.	126
Tabla 4.5. Ficha de mediciones realizadas en el edificio de Administración Central.	132
Tabla 4.6. Ficha de mediciones realizadas en el edificio del Octógono.....	139
Tabla 4.7. Ficha de mediciones realizadas en el Centro de convenciones.....	146
Tabla 4.8. Ficha de mediciones realizadas en la Cafetería.	152
Tabla 4.9. Ficha de mediciones realizadas en el edificio de Laboratorios.	158
Tabla 4.10. Ficha de mediciones realizadas en la planta ECOLAC.....	164
Tabla 4.11. Ficha de mediciones realizadas en la planta CERART.....	170
Tabla 4.12. Resumen los resultados de las mediciones realizadas en los edificios del campus UTPL.....	171
Tabla 5.1. Plan de mejoras y acciones correctivas en los SPT de los edificios del campus UTPL.	173
Tabla 5.2. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio de Unidades productivas.....	178
Tabla 5.3. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio de Aulas	181

Tabla 5.4. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio de Aulas.....	184
Tabla 5.5. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio de Administración Central.	188
Tabla 5.6. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio de Administración Central.	191
Tabla 5.7. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio del Octógono.	195
Tabla 5.8. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio del Octógono.	198
Tabla 5.9. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el Centro de convenciones	202
Tabla 5.10. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del Centro de convenciones.	205
Tabla 5.11. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para la Cafetería. .	209
Tabla 5.12. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT de la Cafetería.	212
Tabla 5.13. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio de Laboratorios.	216
Tabla 5.14. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio de Laboratorios.	219
Tabla 5.15. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para la Planta ECOLAC.	223
Tabla 5.16. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT de la Planta ECOLAC.	226
Tabla 5.17. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT de la Planta CERART.	230

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente trabajo se describe el proceso metodológico para el diseño de sistemas de puesta a tierra en baja tensión, para ello se define un marco referencial basado en las recomendaciones IEEE Std. 80, IEEE Std. 141 e IEEE Std. 142. Se plantea un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta en el campus UTPL, para ello se realiza un diagnóstico del estado actual de los sistemas de puesta a tierra en cada edificio de la UTPL, y, se propone un plan de acciones correctivas para los edificios que presenten anomalías.

PALABRAS CLAVES: diseño de sistemas de puesta a tierra, medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra, metodología de diseño de mallas de puesta a tierra.

ABSTRACT

This paper describes the methodological process for the design of earthing systems in low voltage, for it is defined a framework based on the recommendations of IEEE Std 80, IEEE Std 141 and IEEE Std 142. It provides an example of application of the methodology proposed in the campus UTPL, for this is made diagnosis of the current state of grounding systems in each building, and a corrective action plan is proposed for buildings showing abnormalities.

KEYWORDS: system design grounding, resistance measurement of grounding systems, design methodology grounding grids.

INTRODUCCIÓN

Para que un sistema de energía eléctrica opere adecuada y continuamente, con un desempeño seguro de las protecciones y además garantizar la seguridad de las personas es de vital importancia un adecuado sistema de puesta a tierra (SPT).

A pesar de existir normas donde se especifican la correcta instalación, utilización y mantenimiento no se acostumbra su utilización tras la falsa creencia que la puesta a tierra es sencilla y no merece darle una importancia mayor.

El tener un valor alto de resistencia de puesta a tierra trae efectos significativos al sistema de energía eléctrica como son: daño en transformadores, electrocución de personas y animales por elevados gradientes de potencial y la pérdida de cantidades significativas de dinero en potencia y energía para las empresas distribuidoras. Por lo tanto, cualquier instalación de puesta a tierra deberá ser obligatoriamente comprobada y monitoreada, y en caso de no cumplir con las condiciones mínimas de seguridad de operación, el sistema debe ser corregido.

En este marco, considerando que un óptimo sistema de puesta a tierra es imprescindible para el correcto funcionamiento de un sistema de energía eléctrica, y, que todos los sistemas de puesta a tierra del campus UTPL no han tenido un monitoreo periódico, el trabajo pretende proponer una metodología de diseño de sistemas de puesta a tierra y diagnosticar el estado actual de los sistemas de puesta a tierra para futuras correcciones en el suministro de energía eléctrica de cada uno de los edificios del campus UTPL, con el fin de salvaguardar la integridad del personal del campus UTPL y de los equipos conectados al sistema eléctrico.

El presente trabajo se estructuró en cinco capítulos. En el primer capítulo se realiza un estado del arte sobre los sistemas de puesta a tierra y su importancia tanto en la seguridad de personas y equipos como en la calidad de energía. Se revisan los principales métodos de medición de resistividad y resistencia de la tierra. Finalmente se revisan las principales técnicas para mejorar la resistencia de los sistemas de puesta a tierra.

En el segundo capítulo se realiza un estado del arte sobre la normativa que rigen los sistemas de puesta a tierra. Se hará énfasis en las normas IEEE Std. 80, IEEE Std. 141 e IEEE Std. 142.

El tercer capítulo se propone una metodología de diseño de mallas de puesta a tierra para baja tensión, la cual servirá como base para las futuras correcciones que se hagan en los sistemas de puesta a tierra.

El cuarto capítulo trata sobre el funcionamiento del equipo de medición de resistencia de puesta a tierra, Fluke 1625, sus principales métodos de operación y medición. Principalmente en éste capítulo se presentan los resultados de las mediciones de resistividad del terreno y resistencia de cada uno de los sistemas de puesta a tierra de los edificios de la UTPL.

En el quinto capítulo se propone un plan de mejoras y acciones correctivas, realizando un análisis técnico (diseño) y económico (presupuesto) en cada uno de los sistemas de puesta a tierra del campus UTPL. El plan de mejoras incluye sugerencias sobre el mantenimiento de los sistemas de puesta a tierra, a mediano y a largo plazo.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Elaborar una metodología para el diseño de óptimos sistemas de puesta a tierra en baja tensión.

Objetivos específicos

- Establecer la línea base sobre los sistemas de puesta a tierra en baja tensión, su importancia en la seguridad y la calidad de energía, tecnologías de implementación y metodologías de medición.
- Definir un modelo referencial, para el diseño de sistemas de puesta a tierra, basado en la normativa existente.
- Diagnosticar el estado actual de los sistemas de puesta a tierra existentes en cada uno de los edificios del campus UTPL.
- Elaborar un plan de mejoras y acciones correctivas sobre posibles implementaciones de sistemas de puesta a tierra en cada edificio con anomalías.

CAPÍTULO 1

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

1.1. Introducción.

Para que un sistema de energía eléctrica opere adecuada y continuamente, con un desempeño seguro de las protecciones y además garantizar la seguridad de las personas es de vital importancia un adecuado sistema de puesta a tierra (SPT).

El sistema de puesta a tierra de una instalación es una parte crítica de la infraestructura eléctrica y puede condicionar la viabilidad futura de las actividades que se desarrollen en el mismo. Un óptimo sistema de puesta a tierra es necesario para proteger vidas humanas y animales, proteger instalaciones y equipos contra posibles daños, limitar perturbaciones electromagnéticas y para asegurar una buena calidad de energía.

Existen dos parámetros importantes a la hora de diseñar o realizar mantenimiento de un sistema de puesta a tierra: resistividad del suelo y resistencia del SPT. Estas mediciones son muy importantes para verificar la efectividad de una puesta a tierra recientemente construida o para detectar cambios como parte de una rutina de mantenimiento.

Este capítulo describe el estado del arte sobre los sistemas de puesta a tierra, su importancia en la seguridad y la calidad de energía, tecnologías de implementación y metodologías de medición.

1.2. Definición de puesta a tierra.

Según el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) un sistema de puesta a tierra (SPT) es una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra [1].

El Código Eléctrico Nacional (NEC por sus siglas en inglés) del Ecuador [2], define un SPT como una conexión intencional a tierra, mediante una conexión de impedancia suficientemente baja y con capacidad de conducción de corriente suficiente para evitar la aparición de tensiones que puedan provocar riesgos a personas o a los equipos conectados.

La Norma eléctrica chilena (NCH Elec) de instalaciones de consumo en baja tensión [3] define dos tipos de puesta a tierra en baja tensión: puesta a tierra de servicio y puesta a tierra de protección.

- Se entenderá por tierra de servicio la puesta a tierra de un punto de la alimentación, en particular el neutro del empalme en caso de instalaciones conectadas en BT o el neutro del transformador que alimente la instalación en caso de empalmes en media o alta tensión, alimentados con transformadores monofásicos o trifásicos con su secundario conectado en estrella.
- Se entenderá por tierra de protección a la puesta a tierra de toda pieza conductora que no forma parte del circuito activo, pero que en condiciones de falla puede quedar energizada. Su finalidad es proteger a las personas contra tensiones de contacto peligrosas.

Entonces un sistema de puesta a tierra (SPT) consiste en la conexión de equipos eléctricos y electrónicos a tierra, para evitar que se dañen nuestros equipos en caso de una corriente transitoria peligrosa. Un SPT Está compuesto por un conjunto de elementos que permiten vincular con tierra el conductor de protección. Esta toma se realiza mediante electrodos, dispersores, placas, cables, alambres, mallas metálicas, cuya configuración (Ver Fig. 1.1) y materiales cumplan con las normas respectivas.

1.3. Importancia de los sistemas de puesta a tierra.

El sistema de puesta a tierra de una instalación es una parte crítica de la infraestructura eléctrica y puede condicionar la viabilidad futura de las actividades que se desarrollen en el mismo. Es necesario que sea capaz de soportar corrientes de defecto de corta duración de varios cientos de amperios, corrientes permanentes de unos pocos amperios y corrientes vagabundas de alta frecuencia, haciendo que retornen de la fuente a tierra con una caída de tensión próxima a cero para las corrientes de ruido y sin riesgo de daños para las corrientes de defecto. Al mismo tiempo protege al personal y a los equipos alojados en el edificio cuando se produzcan rayos en el sistema de puesta a tierra interconectado [4].

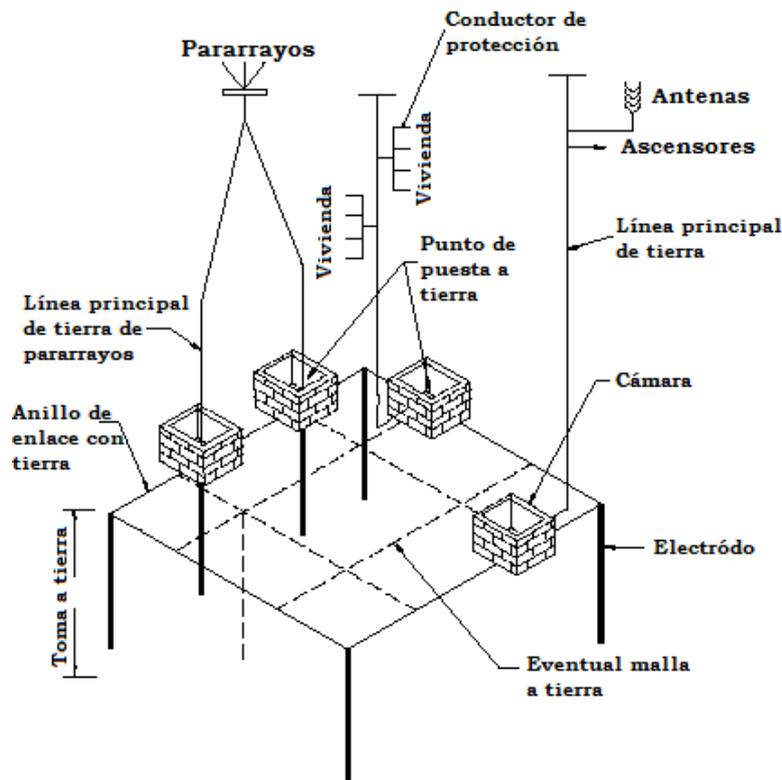


Figura 1.1. Esquema de un sistema de puesta a tierra.

Fuente: <http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/>

docencia/EMC/trabajos_02_03/Proteccion_contra_descargas_atmo
sfericas/12/12.htm

El diseño del sistema de puesta a tierra de un edificio, incluyendo el sistema de protección contra rayos, requiere gran atención si deben cumplirse todos los objetivos. Como es habitual, lo mejor y más económico es que se haya diseñado correctamente desde el principio, teniendo en cuenta la vida útil del edificio y, siempre que sea posible, el posible destino del mismo durante esa vida útil. La adecuación, una vez que el edificio está ocupado, será siempre una labor costosa [4].

Un sistema de puesta a tierra es una parte esencial de las redes de energía, tanto en los niveles de alta como de baja tensión. Se necesita un buen sistema de puesta a tierra para [4], [5]:

- La protección de edificios e instalaciones contra rayos;
- Proporcionar una plataforma equipotencial sobre la cual pueda operar equipo electrónico;
- La seguridad de vidas humanas y animales, limitando las tensiones de paso y de contacto a valores seguros;

- la compatibilidad electromagnética (EMC), esto es, para la limitación de las perturbaciones electromagnéticas;
- el correcto funcionamiento de la red de suministro de electricidad y para asegurar una buena calidad de energía.

1.3.1. *Importancia de los SPT en la seguridad.*

El sistema de puesta a tierra se diseña normalmente para cumplir dos funciones de seguridad. La primera es establecer conexiones equipotenciales. Toda estructura metálica conductiva expuesta que puede ser tocada por una persona, se conecta a través de conductores de conexión eléctrica. La mayoría de los equipos eléctricos se aloja en el interior de cubiertas metálicas y si un conductor energizado llega a entrar en contacto con éstas, la cubierta también quedará temporalmente energizada. La conexión eléctrica es para asegurar que, si tal falla ocurriese, entonces el potencial sobre todas las estructuras metálicas conductivas expuestas sea virtualmente el mismo. En otras palabras, la conexión eléctrica igual al potencial en el interior del local, de modo que la diferencia de potencial resultante es mínima. De este modo, se crea una “plataforma” equipotencial [5].

Otra función de seguridad de un sistema de puesta a tierra es garantizar que, en el evento de una falla a tierra, toda corriente de falla que se origine, pueda retornar a la fuente de una forma controlada (Ver Fig. 1.2). Por una forma controlada se entiende que la trayectoria de retorno está predeterminada, de tal modo que no ocurra daño al equipo o lesión a las personas. La impedancia del sistema de tierra debiera ser lo bastante baja de modo que pueda fluir suficiente corriente de falla a tierra para que operen correctamente los dispositivos de protección, los cuales a su vez provocarán la operación de interruptores o fusibles para interrumpir el flujo de corriente [5].

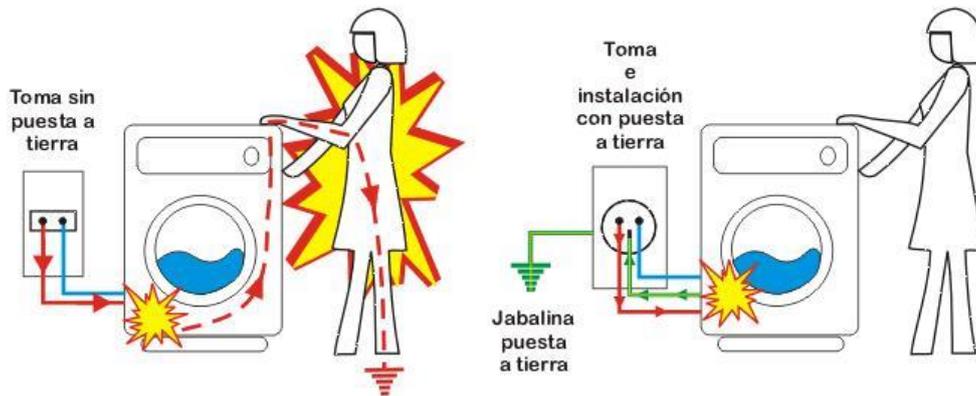


Figura 1.2. Seguridad al personal que brinda un SPT – Izq.: Sin puesta a tierra – Der.: Con puesta a tierra.

Fuente: <http://colmenarezjl.blogspot.com/2012/06/sistema-de-puesta-tierra-spat.html>

1.3.2. **Importancia de los SPT en la calidad de energía [4].**

Un SPT cumple las siguientes funciones en cuanto a calidad de energía:

- Llevan las corrientes de defecto a tierra, permitiendo así la actuación de las protecciones contra sobrecorrientes.
- Llevan las corrientes de fuga de retorno a tierra.
- Actúan como un plano de referencia para la señal, de tal forma que las interfaces de señal de los equipos interconectados puedan operar correctamente.
- Mantienen la Compatibilidad Electro-Magnética (EMC)
- Derivan corrientes de ruido desde los filtros RFI de vuelta a tierra.

1.3.2.1. *Corriente de defecto.*

Se comprende que se deba planificar la instalación con una adecuada protección contra las corrientes de defecto. Con una protección contra sobre intensidades y corrientes de defecto, que haya sido diseñada adecuadamente, se limitará la duración de la corriente de defecto así como la energía que “se deja pasar” sin sobrepasar los valores seguros. Así se actúa en el diseño de una instalación normal. En este contexto los criterios críticos son la resistencia absoluta respecto a tierra, la resistencia de bucle de la fuente, el cableado y el conductor de protección.

1.3.2.2. Corrientes de fuga.

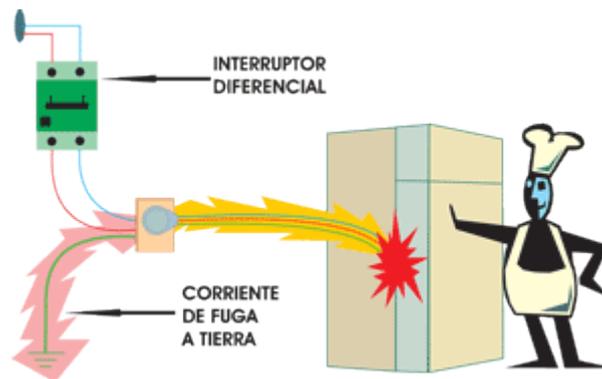


Figura 1.3. Corriente de fuga a tierra.

Fuente: <http://www.electricistabsas.com.ar/puesta.htm>

Éstas se generan en los filtros destinados a reducir la FI y, si bien la contribución de cada equipo es pequeña, su suma combinada puede ser importante. Estas corrientes se originan en un divisor de tensión capacitivo para toda la tensión de alimentación y por tanto presentan una tensión de fuente en circuito abierto mitad de la tensión de alimentación.

La consideración más importante para las corrientes de fuga es la continuidad del conductor de protección. Las corrientes son relativamente pequeñas, de tal forma que la resistencia no es el problema, pero el riesgo de descarga si se rompe la conexión es muy elevado.

1.3.2.3. Plano de referencia de la señal.

Para que el conductor protección pueda actuar como un referente de tensión, de tal forma que los equipos interconectados puedan funcionar correctamente, se necesita una impedancia muy baja para un amplio margen de frecuencias. Aquí la preocupación es que la totalidad del sistema de puesta a tierra representado por el conjunto de conductores de protección deberá aparecer como si fuera una superficie equipotencial, en otras palabras: en todo el margen de frecuencias considerado y en toda la superficie del edificio, entre dos puntos cualesquiera, la diferencia de potencial debe ser cero. En la práctica, esto no significa que a diferencia de potencial deba ser realmente cero, sino que debe ser lo suficientemente baja (de unos pocos volts) para no provocar ninguna disfunción en los equipos instalados.

La siguiente figura (Ver Fig. 1.4) muestra interfaces normales con un solo terminal y diferenciales. Una interfaz de terminal único utiliza un único conductor de señal y una

ruta de retorno a tierra. Como es natural, cualquier diferencia de potencial entre las tierras locales en el transmisor y en el receptor estará en serie con la señal y es probable que provoque una perturbación en los datos. La solución aparentemente más sencilla de añadir otro conductor de señal entre los dos puntos de tierra no es factible, pues por éste circularía una elevada corriente indefinida que podría provocar interferencias y posibles daños.

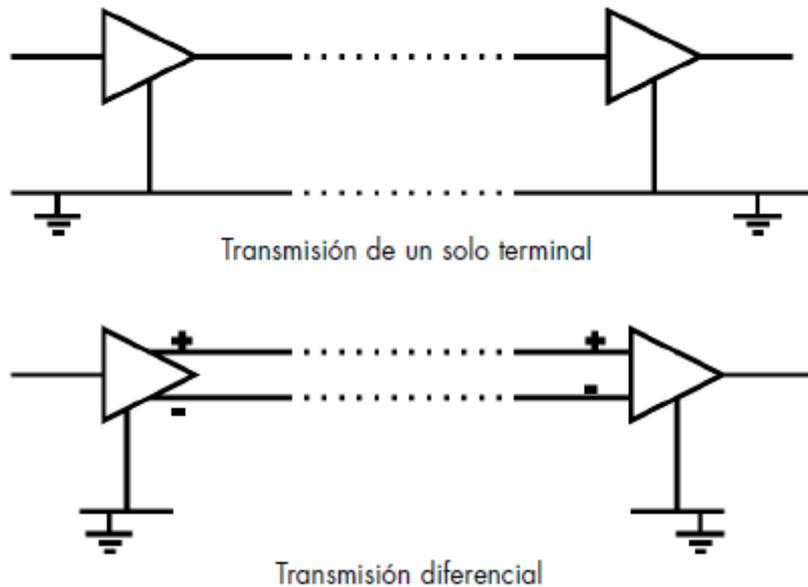


Figura 1.4. Interfaces de un solo terminal y de señal diferencial. Arriba: Transmisión de un solo terminal. Abajo: Transmisión diferencial.

Fuente: <http://www.axoled.com/wp-content/uploads/2013/05/6-1-Puesta-a-Tierra.pdf>

Una interfaz diferencial utiliza dos conductores de señal y los datos se envían como una diferencia de tensión entre ellos. Lo ideal es que el receptor solamente sea sensible a la tensión diferencial entre las líneas de señal e insensible a la tensión en modo común. En la práctica esto no es así y la tensión en modo común debe limitarse a un nivel de quizás uno o dos órdenes de magnitud más de lo necesario para una interfaz de un solo terminal. La relación entre la sensibilidad diferencial y la sensibilidad en modo común recibe el nombre de relación de rechazo en modo común (CMRR) y se expresa en dB de tensión. En otras palabras, el uso de interfaces diferenciales, aunque ayuda a reducir la tasa de errores, no alivia realmente los requisitos del sistema de conductores de protección.

Debe considerarse que lo importante no es la impedancia absoluta del sistema respecto a tierra sino la impedancia (dentro de un amplio margen de frecuencias) entre diferentes puntos en el conductor de protección.

1.3.2.4. Compatibilidad electromagnética.

Cada equipo eléctrico o electrónico tiene una cierta radiación electromagnética. Análogamente, también es sensible, en mayor o menor medida, a la radiación electromagnética (Ver Fig. 1.5). Cuando todos los equipos funcionan simultáneamente, el nivel acumulado de radiación en el entorno debe ser muy inferior al nivel que puede afectar al funcionamiento de los equipos que trabajan en dicho entorno.

El mantenimiento de la compatibilidad electromagnética requiere un exquisito cuidado en el diseño y en la realización de la instalación del sistema de puesta a tierra. La ingeniería eléctrica actual se ha abandonado el concepto de sistemas de puesta a tierra separados y las normativas internacionales actuales prescriben un sistema de puesta a tierra global.

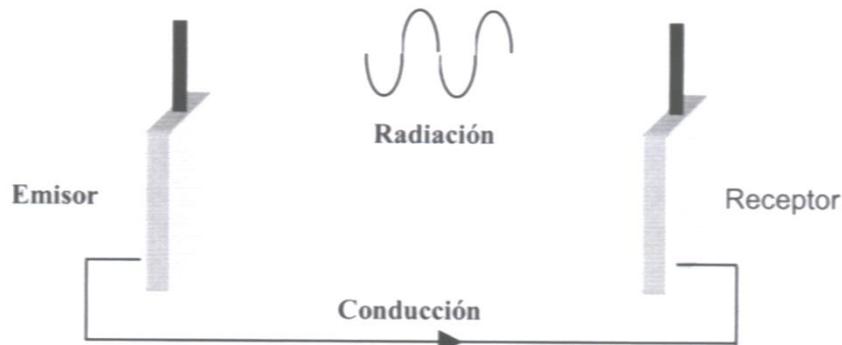


Figura 1.5. Compatibilidad electromagnética.

Fuente: http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_01_02/EMI_Biomedicina/10.html

El concepto de tierra única significa que los conductores de protección, conductores de puesta a tierra, armarios y los recubrimientos y pantallas de los cables de datos o potencia están todos interconectados. También las piezas estructurales de acero, tuberías de agua y gas forman parte del sistema.

Para reducir las interferencias en los equipos, los enlaces de puesta a tierra entre las pantallas o armaduras de los cables y otras estructuras de puesta a tierra deben ser lo más cortos que sea posible. Los cables de conexión entre las estructuras metálicas hacen que estas estructuras metálicas actúen como conductores de puesta a tierra en paralelo.

1.4. Conceptos relacionados con los SPT [1], [4], [6].

Bajante: Elemento conectado eléctricamente entre los pararrayos y la puesta a tierra respectiva, cuya función es conducir las corrientes de rayo que puedan incidir sobre la instalación que se va a proteger y disminuir los efectos del campo magnético en interior de una instalación.

Conductor de puesta a tierra: Es aquel que se utiliza para conectar un equipo o el circuito puesto a tierra de cableado a uno o varios electrodos de puesta a tierra.

Conductor de puesta a tierra aislado: Es el mismo conductor o canalización que los conductores de fase. El conductor se encuentra aislado de la canalización y de todos los puntos de tierra a lo largo del recorrido.

Conductor de puesta a tierra del equipo: Es aquel utilizado para conectar elementos no portadores de corriente tales como canalizaciones y partes metálicas de equipos al electrodo de puesta a tierra del tablero principal o secundario de un sistema derivado separado.

Conductor a comprensión: Dispositivo que establece una conexión entre dos o más conductores o entre uno o más conductores y un terminal, por medio de presión mecánica, sin utilizar soldadura.

Conectado (puesto) a tierra: Significa conectado efectivamente con tierra, de manera tal que el camino a tierra tenga la capacidad necesaria y la impedancia suficientemente baja como para que en todo momento, y bajo las condiciones probables más severas, la corriente a través del conductor de conexión a tierra no provoque tensiones dañinas:

- Entre los conductores de conexión a tierra y las superficies conductoras expuestas vecinas que están en buen contacto con tierra;
- Entre los conductores de conexión a tierra y superficies vecinas de la tierra misma.

Conexión equipotencial: Unión permanente de partes metálicas para formar una conexión eléctricamente conductora que asegure la continuidad eléctrica de cualquier corriente que pueda circular.

Electrodo de puesta a tierra: Es un cuerpo metálico conductor desnudo que va enterrado y su función es establecer el contacto con la tierra física.

Malla de puesta a tierra: Sistema conformado por un arreglo de conductores desnudos interconectados entre sí, dispuestos sobre un área específica o enterrado en el suelo. Normalmente contiene barras o jabalinas conectadas en el perímetro y su interior con el objeto de incrementar la capacidad de puesta a tierra y proveer al sistema de puntos de conexión para equipos y dispositivos.

Puesta a tierra: Camino conductivo permanente y continuo con capacidad suficiente para conducir a tierra cualquier corriente de falla probable que le sea impuesta por diseño, de impedancia suficientemente baja para limitar la elevación de tensión sobre el terreno y facilitar la operación de los dispositivos de protección en el circuito.

Puesto a tierra eficazmente: Conexión intencional a tierra, mediante una conexión de impedancia suficientemente baja y con capacidad de conducción de corriente suficiente para evitar la aparición de tensiones que puedan provocar riesgos a personas o a los equipos conectados.

Resistencia de tierra: Es la resistencia que nos ofrece el terreno hacia la corriente en un sistema de puesta a tierra, esta resistencia depende de la resistividad del terreno y área de los conductores.

Resistividad del terreno: Es la propiedad del terreno que se opone al paso de la corriente eléctrica, la resistividad varía de acuerdo a las características del terreno.

Sistema de puesta a tierra: Comprende todos los conductores, conectores, abrazaderas, placas de conexión a tierra o tuberías, y electrodos de puesta a tierra por medio de los cuales una instalación eléctrica es conectada a tierra.

Tensión a tierra: En circuitos conectados a tierra, es la tensión entre una parte viva no puesta a tierra y una parte conectada a tierra, o en circuitos no conectados a tierra, es la mayor tensión existente en el circuito.

Tensión de contacto: Diferencia de potencial que, durante una falla, se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se puede alcanzar al extender un brazo.

Tensión de paso: Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por un paso (aproximadamente un metro), en la dirección del gradiente de tensión máximo.

Tierra aislada: Es un conductor de tierra con aislamiento que se conecta a algún equipo, este conductor se coloca en la misma soportería donde se encuentran los cables de energía.

Ventana de tierra: Sección a través de la cual, todos los conductores de tierra, incluyendo las canalizaciones metálicas, entran en un área específica. Usualmente se utiliza en sistemas de comunicaciones a través de los cuales el sistema de puesta a tierra del edificio se conecta en un área donde pudieran no existir conexiones a tierra.

1.5. Composición de una instalación de puesta a tierra [7].

Un sistema de puesta a tierra consta de las siguientes partes (Ver Fig. 1.6):

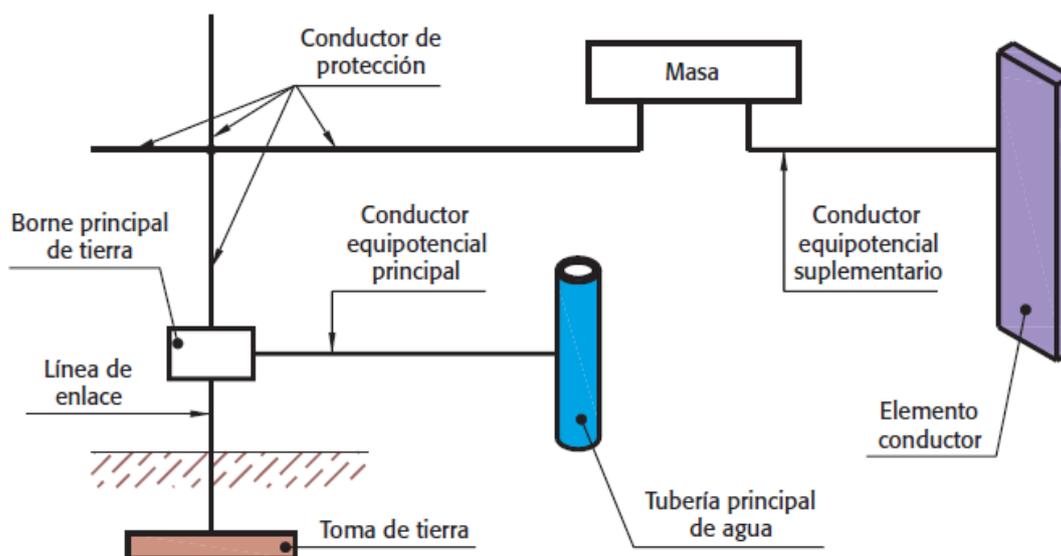


Figura 1.6. Representación esquemática de un SPT.

Fuente: <http://www.marcombo.com/Descargas/8496334147->

INSTALACIONES%20EL%C3%89CTRICAS%20DE%20INTERIOR/UNIDAD%2010.pdf

- El terreno.
- Tomas de tierra.
- Conductor de tierra o línea de enlace con el electrodo de puesta a tierra.
- Borne principal de tierra.
- Conductor de protección.
- Conductor de unión equipotencial principal.
- Conductor de equipotencialidad suplementaria.
- Masa.
- Elemento conductor.
- Canalización metálica principal de agua.

1.5.1. *El terreno.*

El terreno es el encargado de disipar las corrientes de fuga o de defecto y las de origen atmosférico. La resistencia al paso de la corriente entre los electrodos y el terreno define la resistividad del mismo, permitiéndonos conocer su comportamiento eléctrico. Un buen contacto entre ellos, facilita el paso de la corriente eléctrica, mientras que un mal contacto la dificulta. A este valor que define la bondad del contacto se le denomina resistencia de paso a tierra y se mide en ohmios. Así pues, a la hora de dimensionar los electrodos sobre un terreno dado, el valor de la resistencia de paso deberá ser el menor posible. En el mercado, es posible encontrar una serie de aplicaciones solares portables para actuar como cargadores, algunas en fase de experimentación, y, otras con indicadores de desempeño muy atractivos.

1.5.2. *Tomas de tierra.*

Se entiende por toma de tierra la parte de la instalación encargada de canalizar, absorber y disipar las corrientes de defecto o de origen atmosférico que son conducidas a través de las líneas principales de tierra. Los electrodos utilizados para la toma de tierra son muy variados, los más frecuentes están formados por:

- Barras y tubos.
- Platinas y conductores desnudos.
- Placas.
- Anillos o mallas metálicas constituidas por los elementos anteriores.

- Armaduras de hormigón enterradas; con excepción de las armaduras pretensadas.
- Otras estructuras enterradas que se demuestre que son apropiadas.

El tipo, los materiales utilizados y la profundidad de enterramiento de las tomas de tierra, deben ser tales que, la posible pérdida de humedad del suelo, la corrosión y la presencia del hielo u otros factores climáticos, no aumenten su resistencia eléctrica por encima del valor previsto. La profundidad nunca será inferior a 0,50 m. Las canalizaciones metálicas de otros servicios nunca deben utilizarse como tomas de tierra por razones de seguridad.

1.5.3. Conductores de tierra.

Se conoce como línea de enlace o conductores de tierra a los que conectan al conjunto de electrodos o anillo con el borne principal o punto de puesta a tierra (Ver. Fig 1.7.). El conexionado entre los componentes de las tierras debe realizarse con sumo cuidado para garantizar una buena conducción eléctrica y evitar daños en los conductores o los electrodos.



Figura 1.7. Conductores de tierra.

Fuente:<http://www.marcombo.com/>

1.5.4. Bornes de puesta a tierra.

Los bornes de puesta a tierra forman el punto de unión entre la toma de tierra y el circuito de puesta a tierra de un edificio. Como muestra la Fig. 1. 8., el punto de puesta a tierra está formado por un sistema de placas y tornillos que permite la conexión y desconexión del edificio con la toma de tierra. El punto de puesta a tierra se aloja en el

interior de una arqueta de características y dimensiones apropiadas. Al borne principal de tierra se conectan los siguientes conductores:

- Los de tierra.
- Los de protección.
- Los de unión equipotencial principal.
- Los de puesta a tierra funcional, si son necesarios.

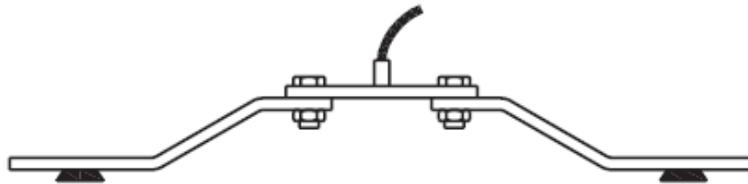


Figura 1.8. Borne de puesta a tierra.

Fuente: <http://www.marcombo.com/Descargas/8496334147-INSTALACIONES%20EL%C3%89CTRICAS%20DE%20INTERIOR/UNIDAD%2010.pdf>

1.5.5. Conductores de protección.

Los conductores de protección unen las masas de una instalación y los elementos metálicos que puedan existir, como cañerías, calderas, etc. y cualquier otra masa importante del edificio, con las líneas de tierra (Ver Fig. 1.9).



Figura 1.9. Conductores de protección.

Fuente: <http://www.afinidadelectrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=247>

En todos los casos, los conductores de protección que no forman parte de la canalización de alimentación serán de cobre con una sección, al menos, de:

- 2,5 mm², para conductores de protección protegidos mecánicamente.
- 4 mm², para conductores de protección sin proteger.

Cuando el conductor de protección sea común a varios circuitos, la sección de ese conductor debe dimensionarse en función de la mayor sección de los conductores de fase. Como conductores de protección pueden utilizarse:

- Conductores en los cables multiconductores o conductores aislados o desnudos que posean una envolvente común con los conductores activos.
- Conductores separados desnudos o aislados.

Sobre los conductores de tierra y en lugar accesible, debe preverse un dispositivo que permita medir la resistencia de la toma de tierra. Este dispositivo puede estar combinado con el borne principal de tierra, debe ser desmontable mediante un útil, tiene que ser mecánicamente seguro y debe asegurar la continuidad eléctrica.

1.5.6. Conductores equipotenciales.

En una instalación de tierras, se denominan conductores equipotenciales a aquellos que conectan eléctricamente todas las masas metálicas de la estructura de un edificio o de un recinto, con el fin de evitar diferencias de potencial entre ellas. El conjunto forma una red equipotencial unida a la red de tierra del edificio. Todas las redes equipotenciales de las diferentes viviendas estarán conectadas entre sí y con la toma de tierra del edificio. En las instalaciones a tierra hay dos tipos de conductores equipotenciales: el principal y el suplementario.

1.6. Características de los SPT de baja tensión.

1.6.1. Sistemas de conexión del neutro y de las tierras en redes eléctricas de baja tensión.

Para la determinación de las características de las medidas de protección contra choques eléctricos en caso de defecto (contactos indirectos) y contra sobreintensidades, será preciso tener en cuenta el esquema de distribución empleado.

Según el Reglamento Electrotécnico para baja tensión (España) – REBT [8] la denominación se realiza con un código de letras con el significado siguiente:

Primera letra: Se refiere a la situación de la alimentación con respecto a tierra.

- T = Conexión directa de un punto de la alimentación a tierra.
- I = Aislamiento de todas las partes activas de la alimentación con respecto a tierra o conexión de un punto a tierra a través de una impedancia.

Segunda letra: Se refiere a la situación de las masas de la instalación receptora con respecto a tierra.

- T = Masas conectadas directamente a tierra, independientemente de la eventual puesta a tierra de la alimentación.
- N = Masas conectadas directamente al punto de la alimentación puesto a tierra (en corriente alterna, este punto es normalmente el punto neutro).

Otras letras (eventuales): Se refieren a la situación relativa del conductor neutro y del conductor de protección.

- S = Las funciones de neutro y de protección, aseguradas por conductores separados.
- C = Las funciones de neutro y de protección, combinadas en un solo conductor (conductor CPN).

1.6.1.1. Esquema TN.

Los esquemas TN tienen un punto de la alimentación, generalmente el neutro o compensador, conectado directamente a tierra y las masas de la instalación receptora conectadas a dicho punto mediante conductores de protección. Se distinguen tres tipos de esquemas TN según la disposición relativa del conductor neutro y del conductor de protección: Esquema TN-S, Esquema TN-C, Esquema TN-C-S.

1.6.1.1.1. Esquema TN-S

En el que el conductor neutro y el de protección son distintos en todo el esquema (Ver Fig. 1.10).

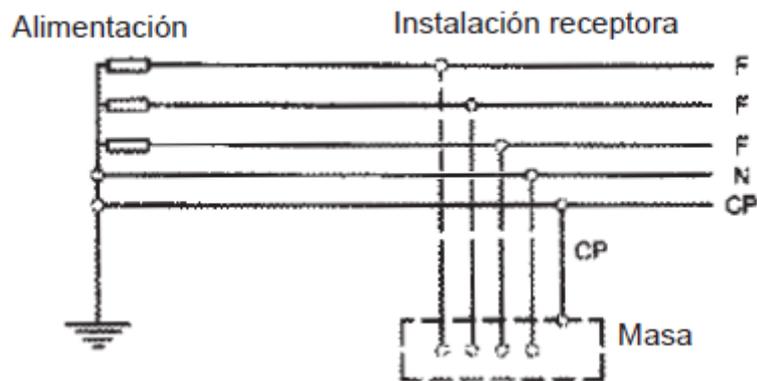


Figura 1.10. Esquema de distribución tipo TN-S.

Fuente: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fc79b244a8a80856c125791a003d18c1/\\$file/REBT-2011.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fc79b244a8a80856c125791a003d18c1/$file/REBT-2011.pdf)

1.6.1.1.2. Esquema TN-C

En el que las funciones de neutro y protección están combinados en un solo conductor en todo el esquema (Ver Fig. 1.11).

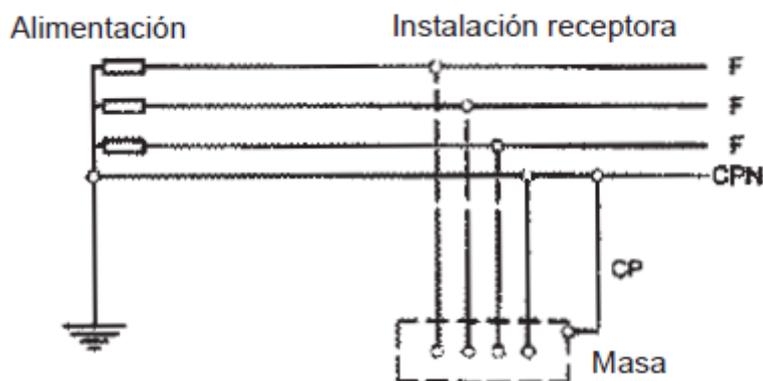


Figura 1.11. Esquema de distribución tipo TN-C.

Fuente: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fc79b244a8a80856c125791a003d18c1/\\$file/REBT-2011.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fc79b244a8a80856c125791a003d18c1/$file/REBT-2011.pdf)

1.6.1.1.3. Esquema TN-C-S

Esquema TN-C-S: En el que las funciones de neutro y protección están combinadas en un solo conductor en una parte del esquema (Ver Fig. 1.12).

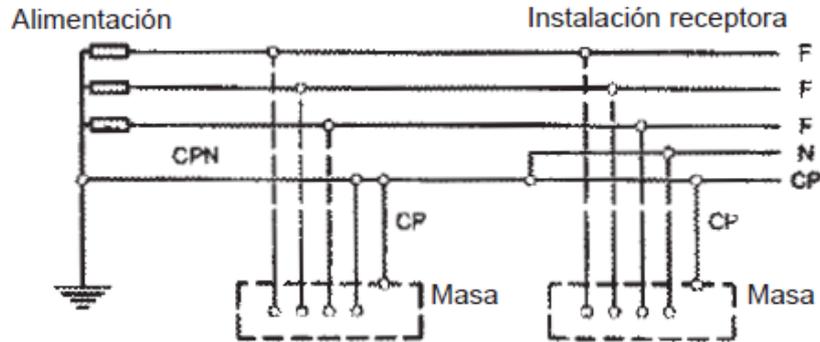


Figura 1.12. Esquema de distribución tipo TN-C-S.

Fuente: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fc79b244a8a80856c125791a003d18c1/\\$file/REBT-2011.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fc79b244a8a80856c125791a003d18c1/$file/REBT-2011.pdf)

1.6.1.2. Esquema TT.

El esquema TT tiene un punto de alimentación, generalmente el neutro o compensador, conectado directamente a tierra. Las masas de la instalación receptora están conectadas a una toma de tierra separada de la toma de tierra de la alimentación (Ver Fig. 1.13).

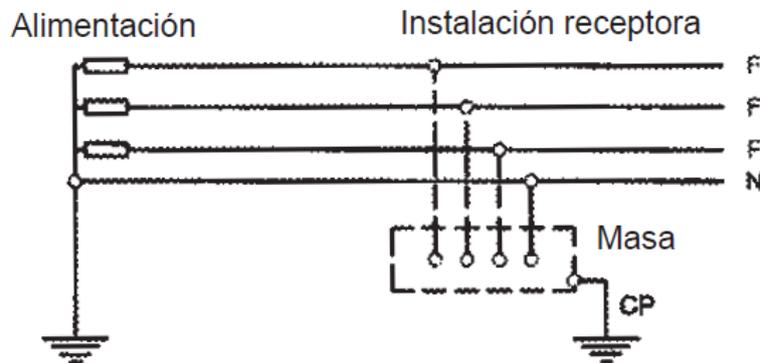


Figura 1.13. Esquema de distribución tipo TT.

Fuente: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fc79b244a8a80856c125791a003d18c1/\\$file/REBT-2011.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fc79b244a8a80856c125791a003d18c1/$file/REBT-2011.pdf)

En este esquema las intensidades de defecto fase-masa o fase-tierra pueden tener valores inferiores a los de cortocircuito, pero pueden ser suficientes para provocar la aparición de tensiones peligrosas.

1.6.1.3. Esquema IT.

El esquema IT no tiene ningún punto de la alimentación conectado directamente a tierra. Las masas de la instalación receptora están puestas directamente a tierra (Ver Fig. 1.14).

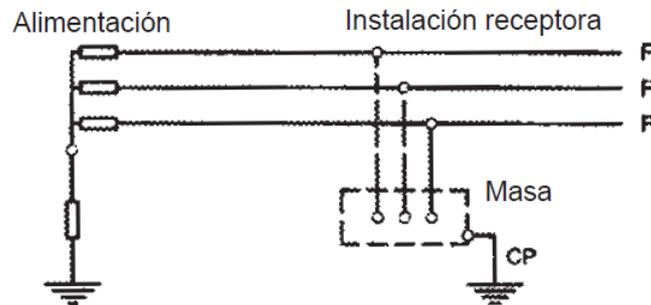


Figura 1.14. Esquema de distribución tipo IT.

Fuente: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fc79b244a8a80856c125791a003d18c1/\\$file/REBT-2011.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fc79b244a8a80856c125791a003d18c1/$file/REBT-2011.pdf)

1.6.2. Requisitos generales de un sistema de puesta a tierra.

Los elementos metálicos que no forman parte de las instalaciones eléctricas, no podrán ser incluidos como parte de los conductores de puesta a tierra. Este requisito no excluye el hecho de que se deben conectar a tierra, en algunos casos. Tierras naturales como tuberías de agua, estructuras metálicas, etc. no deben ser utilizadas como electrodo de puesta a tierra, pero si conectadas a este electrodo [9].

Los elementos metálicos principales que actúan como refuerzo estructural de una edificación deben tener una conexión eléctrica permanente con el sistema de puesta a tierra general. Las conexiones que van bajo el nivel del suelo en puesta a tierra, deben ser realizadas mediante soldadura exotérmica [9].

1.6.2.1. Requisitos de SPT de viviendas.

En instalaciones domiciliarias, para verificar las características del electrodo de puesta a tierra y su unión con la red equipotencial, se debe dejar al menos un punto de conexión accesible e inspeccionable. Cuando para este efecto se construye una caja de inspección, sus dimensiones deben ser mínimo de 30 cm x 30 cm, o de 30 cm de diámetro si es circular y su tapa debe ser removible [9].

Por su parte, en las instalaciones domiciliarias en general se conectarán a la toma de tierra:

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

1.6.2.2. Requisitos de SPT de edificios.

Cuando por requerimientos de un edificio existan varias puestas a tierra, todas ellas deben estar interconectadas eléctricamente, según el criterio adoptado la Comisión Electrotécnica Internacional en la norma IEC- 61000-5-2 [10] (Ver Fig. 1.15):

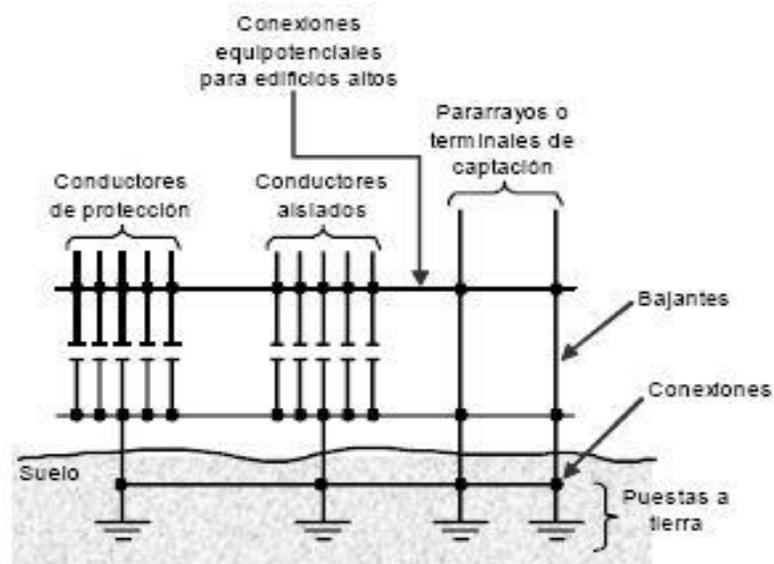


Figura 1.15. Conexión a tierra de un edificio.

Fuente: http://www.camaraconstruccionquito.ec/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=137&Itemid=38&lang=es

Así mismo, para una misma edificación quedan expresamente prohibidos los sistemas de puesta a tierra que aparecen en las Figuras 1.16 y 1.7, según criterio adoptado de la IEC 61000-5-2.

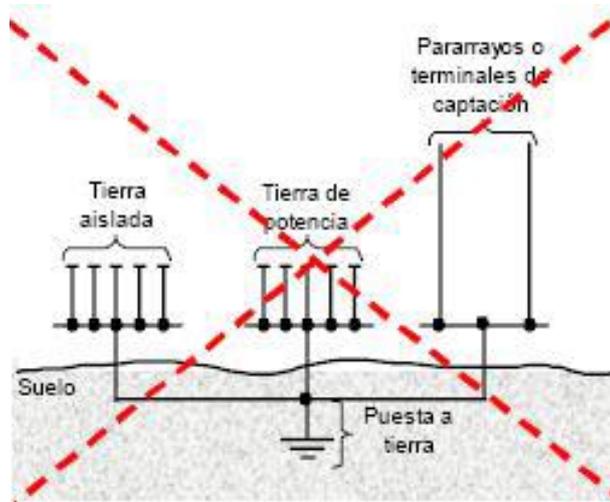


Figura 1.16. Mala conexión a tierra de un edificio – disposición 1.

Fuente: http://www.camaraconstruccionquito.ec/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=137&Itemid=38&lang=es

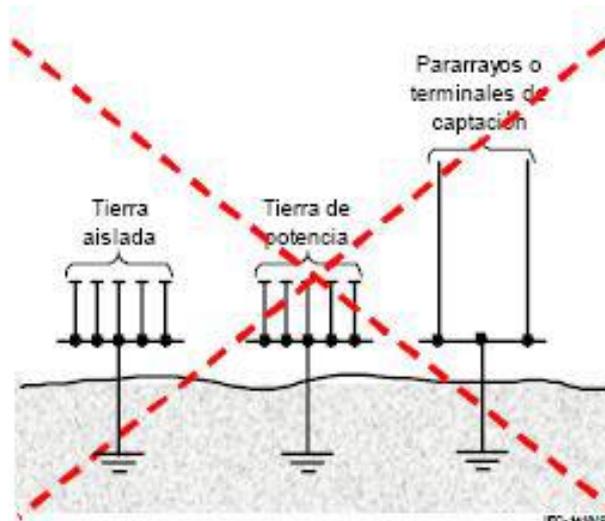


Figura 1.17. Mala conexión a tierra de un edificio – disposición 2.

Fuente: http://www.camaraconstruccionquito.ec/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=137&Itemid=38&lang=es

1.7. Resistividad de la tierra.

Se denomina resistividad del terreno a la propiedad que tiene para conducir la electricidad, y es conocida como la resistencia específica del terreno. La resistividad es uno de los parámetros más importantes en el fenómeno de conducción de corriente en el suelo, tiene por lo tanto un rol de primera importancia en un sistema de puesta a tierra.

1.7.1. Características del suelo y resistividad.

Los principales factores que determinan la resistividad del suelo son:

- Tipo de suelo
- Composición química y concentración de sales contenidas en el suelo
- Humedad del suelo
- Granulometría del material que compone el suelo y su distribución
- Compactación del suelo

La resistividad es muy influenciada por la presencia de agua, y como la resistividad del agua varía grandemente con la temperatura, es razonable admitir que la resistividad del suelo varia con la temperatura. La resistividad baja cuando la temperatura aumenta. Así mismo la resistividad baja cuando las sales y la humedad del suelo aumentan.

El tipo de suelo es muy importante en la determinación del valor de la resistividad, pero el valor de ésta para los diversos tipos de suelo no es tan claramente definido. Siendo así, a partir de mediciones, se pueden establecer fajas de variación de resistividad por tipo de suelo, como se muestra en la Tabla 1.1 [11].

Tabla 1.1. Variación de la resistividad con el tipo de suelo

Tipo de suelo	Resistividad (Ωm)
Suelos vegetales húmedos	10 a 50
Arcillas, gredas y linos	20 a 60
Arenas arcillosas	80 a 200
Fangos, turbas	150 a 300
Arenas	250 a 500
Suelos pedregosos	300 a 400
Rocas	1000 a 10000

Fuente: <http://xa.yimg.com/kq/groups/27513372/1142298908/name/TRABAJO+SEMINARIO.doc>

1.7.2. Constitución del terreno en el tipo de suelo.

La química del terreno, al igual que la cantidad y la calidad de las sales minerales dentro del mismo pueden influir de modo notable en su resistividad. Los terrenos lluviosos o arcillosos con acentuadas capas de humos, son aquellos que presentan las resistividades más bajas y las menores variaciones en el tiempo.

Los terrenos arenosos, pedregosos y rocosos, presentan resistividad muy elevada y varían sus características en el tiempo en límites muy amplios, según la temperatura y la humedad. En la Tabla 1.2 se pueden observar valores de resistividad de los materiales más importantes que construyen los terrenos sobre la resistividad del suelo [12].

Tabla 1.2. Resistividad de tipos de suelos

Terreno	Resistencia (Ω) 5/8 x 1.5 m			Resistividad Ωcm^3		
	Prom.	M/N	MAX.	Prom.	M/N	MAX.
Relleno, ceniza, escoria, desechos de salmuera.	14	3.5	42	2.370		
Arcilla, pizarra, suelo pedregoso, marga.	24	2	98	4.060	340	
FUDEM con proporciones variables de arena y ripio.	93	6	800	15800	1000	135000
Ripio, arena, piedras pequeñas cantidades de arcilla, marga	554	35	2.700	94000	59000	458000

Fuente: <http://hugarcapella.files.wordpress.com/2010/03/manual-de-puesta-a-tierra.pdf>

1.7.3. Influencia de factores externos en la resistividad del suelo.

Las variaciones de resistividad de acuerdo a la profundidad, puede ser modificada debido a los distintos estados de humedad del terreno, por ejemplo, después de un largo periodo de sequía, un temporal humedece la capa superficial del terreno, dejando seca la capa inferior, la mayor parte de la corriente que eventualmente se distribuye hacia los dispersores, influirá únicamente la capa superficial.

La cantidad de humedad y el contenido de sales del terreno afectan radicalmente su resistividad. La cantidad de agua en el terreno varía, de acuerdo al tipo de clima, época del año, y naturaleza del subsuelo. En la Tabla 1.3 se refleja el efecto de la humedad en la resistividad del Terreno, se exhiben los efectos típicos del agua sobre el terreno [12].

Tabla 1.3. Efecto de la humedad sobre la resistividad del suelo

Contenido de humedad % por peso Resistividad Ωcm	Terreno superficial	Arcilla arenosa
0.0	1000×10^6	1000×10^6
2.5	250000	150000
5.0	165000	43000
10	53000	22000
15	21000	13000
20	12000	10000
30	10000	8000

Fuente: <http://hugarcapella.files.wordpress.com/2010/03/manual-de-puesta-a-tierra.pdf>

Hay que tener presente que el agua en su estado puro tiene una resistividad infinitamente alta, pero expuesta a las sales presentes en el terreno, o disueltas en agua, bajan la resistividad del terreno de forma considerable.

Si analizamos en forma análoga la humedad y los efectos que causan las sales en el terreno, podemos percibir que basta con una pequeña cantidad de sal para reducir la resistividad del terreno de manera significativa, en la Tabla 1.4 podemos observar cómo afecta la sal a la resistividad del terreno [12].

Tabla 1.4. Efecto de la sal sobre la resistividad del suelo

% de sal agregada por peso de humedad	Resistividad Ωcm
0.0	10700
0.1	1800
1.0	460
5.0	190
10	130
20	100

Fuente: <http://hugarcapella.files.wordpress.com/2010/03/manual-de-puesta-a-tierra.pdf>

En la Tabla 1.5 podemos observar que al no tener presencia de sal sobre el suelo que se va a trabajar, su resistividad está alrededor de los 10,7 k Ω -cm, mientras que con la presencia de sal, podemos apreciar un decrecimiento drástico, que se puede determinar por un factor de 1000 veces del valor original, al tener 20% de intervención de sal en la humedad del suelo. Este efecto puede ser útil para proporcionar un buen electrodo de baja resistencia, en lugar de un sistema de electrodos elaborado.

1.7.4. Efectos de la temperatura sobre la resistividad del suelo.

Dos hechos importantes conducen a la conclusión de que un incremento en la temperatura disminuirá la resistividad del suelo:

- El agua presente en el terreno determina principalmente su resistividad
- Un incremento en la temperatura disminuye la resistividad del agua.

En la Tabla 1.5 se puede apreciar la influencia de la temperatura en la resistividad del terreno. En ésta podemos observar que al momento de trabajar con agua congelada, el valor de la resistividad aumenta notablemente, esto debido al alto valor de resistividad del hielo, y si la temperatura sigue decreciendo bajo el punto de congelación, se logrará obtener valores sumamente altos de resistividad [12].

Tabla 1.5. Efecto de la temperatura sobre la resistividad del terreno

Temperatura		Resistividad Ωcm
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	
20	68	7200
10	50	9900
0 -5	32 (agua)	13800
	32 (agua)	30000
	23	79000
-15	14	330000

Fuente:

<http://hugarcapella.files.wordpress.com/2010/03/manual-de-puesta-a-tierra.pdf>

1.7.5. Métodos de medición de la resistividad del suelo.

La medición de resistividad es útil para los siguientes propósitos:

- Estimación de la resistencia de Puesta a Tierra de una estructura o un sistema
- Estimación de gradientes de potencial incluyendo voltajes de toque y paso
- Cálculo del acoplamiento inductivo entre circuitos de potencia y comunicación cercanos
- Diseño de sistemas de protección catódica

1.7.5.1. Método de Wenner [12].

Este método fue desarrollado por Frank Wenner del US Bureau Of Standards en 1915 (F. Wenner, A Method of Measuring Earth Resistivity; Bull, National Bureau of Standards, Bull 12(4) 258, s 478-496; 1915/16).

A continuación se describe gráficamente el método de Wenner. Los electrodos deben ser colocados en línea recta a una misma distancia entre ellos, a , y a una misma profundidad, b . Las mediciones dependerán de la distancia entre electrodos y del contacto de estos con la tierra. La distancia b no debe exceder un décimo de la distancia a (Ver Fig. 1.18).

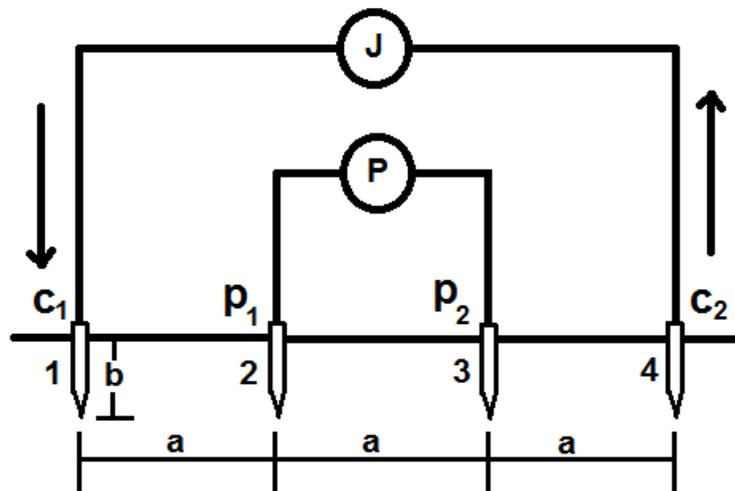


Figura 1.18. Medición de resistividad del suelo – Método de Wenner.

Figura realizada por los autores.

El método consiste en inyectar una corriente conocida por los electrodos de prueba C1 y C2. Entre los electrodos de prueba P1 y P2 se mide la diferencia de potencial resultante de la inyección de corriente anterior. Con estos datos se puede calcular la resistencia y el valor de la resistividad del terreno, a una profundidad, b , será:

$$\rho = 2\pi * a * R \quad \text{si } b \ll a \quad (1.1)$$

ρ = Resistividad promedio a la profundidad, b , (Ohm-cm)

π = Constante 3.141592

A = Distancia entre electrodos (cm)

R = Resistencia medida

Como los resultados de la medición son normalmente afectados por materiales metálicos enterrados, se recomienda realizar la medición varias veces cambiando el eje de los electrodos unos 90°. Cambiando la profundidad y distancia de los electrodos se puede tener un valor de resistividad más aproximado al real y con ello un mejor diseño del sistema de puesta a tierra a construir.

La medición de la resistividad del suelo es comúnmente distorsionada por la existencia de corrientes de tierra y sus armónicas. Para corregir esto, muchos equipos tienen un sistema de control de frecuencia que permite seleccionar la frecuencia de medición con la menor cantidad de ruido y así obtener una medición clara.

1.7.5.2. Método de Schlumberger-Palmer [13].

En este arreglo, al igual que en el de Wenner, los electrodos de emisión (corriente) y medición (tensión) están situados en línea recta, la variante de este arreglo radica en que la separación entre electrodos es, aunque simétrica, desigual para la correspondiente entre los electrodos de tensión y entre estos y los de corriente.

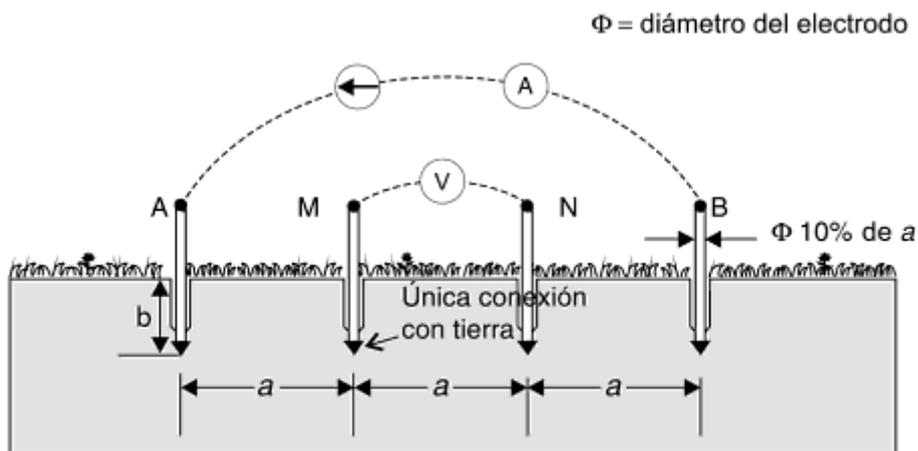


Figura 1.19. Medición de resistividad del suelo – Método de Schlumberger – Palmer.

Fuente: Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos.

El procedimiento para obtener el modelo del terreno, consiste en separar progresivamente los electrodos, alrededor de un punto central permanente, denominado punto de máxima exploración. La fórmula con la cual se calcula la resistividad aparente del terreno es:

Dónde:

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (1.2)$$

c: Es la separación entre el electrodo de corriente y su correspondiente de tensión.

d: Es la separación entre los electrodos de tensión.

R: Resistencia medida por el telurómetro [Ω]

1.8. Medición de resistencia de puesta a tierra.

La tecnología actual establece claramente que no existe artificio o medición indirecta alguna que sustituya la medición directa de la resistencia de puesta a tierra con una técnica adecuada. Estas mediciones son muy importantes para verificar la efectividad de una puesta a tierra recientemente construida o para detectar cambios como parte de una rutina de mantenimiento.

La medición de la resistencia o impedancia de puesta a tierra así como los gradientes de potencial en la superficie de la tierra debido a corrientes de tierra es necesaria por diferentes razones, entre ellas:

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

1.8.1. Método de los dos Puntos o dos Polos [12].

En este método se mide el total de la resistencia del electrodo en estudio más la resistencia de un electrodo auxiliar. La resistencia del electrodo auxiliar se considera muy pequeña comparada con la del electrodo en estudio y por tanto el resultado de la medición es tomado como la resistencia del electrodo en estudio.

Normalmente este método se utiliza para determinar la resistencia de un electrodo simple en un área residencial donde se tiene además un sistema de suministro de agua que utiliza tuberías metálicas sin conexiones o aislantes plásticos (electrodo auxiliar). La resistencia del sistema de suministro de agua en el área se asume muy pequeña (alrededor de 1 Ohm) en comparación con la resistencia máxima permitida para un electrodo simple (alrededor de 25 Ohm).

Este método tiene algunos inconvenientes, como el hecho de que cada vez más los sistemas de suministro de agua utilizan tuberías plásticas; con lo que se hace más difícil conseguir una tierra auxiliar. Por otra parte no siempre se conoce el recorrido de las tuberías de agua, por lo que las áreas de resistencia del electrodo en estudio y las del electrodo auxiliar podrían solaparse; dando como resultado errores en la lectura. Además, el método de los dos polos puede llevar a grandes errores cuando se intenta medir la resistencia de un electrodo simple de pocos Ohmios.

Los terminales C1 y P1 y los terminales C2 y P2 son unidos mediante un puente para realizar esta medición (Ver Fig. 1.20). En equipos modernos el puente es realizado internamente por ellos al seleccionar el tipo de medición o método que se desea realizar.

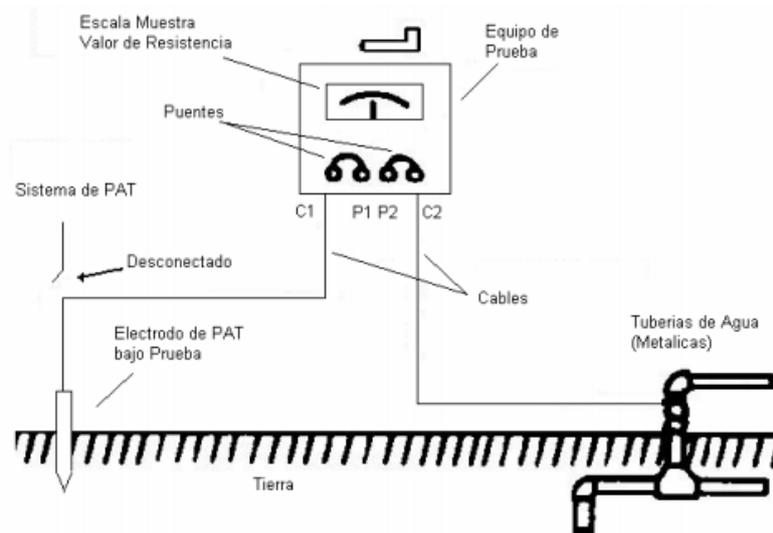


Figura 1.20. Medición de resistencia de puesta a tierra – Método de los dos puntos.

Fuente: <http://www.lu3hba.com.ar/ARTICULOS%2010/Medicion%20de%20Sistema%20de%20Puesta%20a%20Tierra.pdf>

1.8.2. Método de los tres Puntos [13].

En este método se utilizan dos electrodos auxiliares con resistencias R_y y R_z respectivamente (Ver Fig. 1.21). Estos dos electrodos se colocan de tal forma que conformen un triángulo con el electrodo en estudio. Se miden las resistencias entre cada electrodo y los otros dos y se determina la resistencia del electrodo en estudio, R_x , mediante la siguiente fórmula:

$$R_x + R_y + 0 = R_1$$

$$R_x + 0 + R_z = R_2$$

$$0 + R_y + R_z = R_3$$

$$R_x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2} \quad (1.3)$$

En este método se tratan de utilizar electrodos auxiliares que se presuman sean de resistencia similar al electrodo en estudio para obtener mejores resultados. Igualmente, se clavan los electrodos auxiliares de modo tal que queden todos los electrodos lo suficientemente alejados y no se solapen las áreas de influencia de la resistencia de cada uno y evitar resultados absurdos. Se recomienda una distancia entre electrodos de 8 metros o más cuando se estudie un electrodo simple.

En este método existen influencias marcadas por objetos metálicos enterrados y no existe forma de eliminar dicha influencia. Tampoco es muy efectivo a la hora de evaluar valores bajos de resistencia o valores de resistividad muy altos del terreno involucrado donde la resistencia de contacto de los electrodos sea apreciable. Otra desventaja es que en este método se considera que el terreno es completamente homogéneo. Por estas razones este método es poco utilizado. Sin embargo, puede ser útil cuando existen limitaciones de espacio y no se pueden colocar los electrodos en línea recta para realizar una medición con el método de caída de potencial.

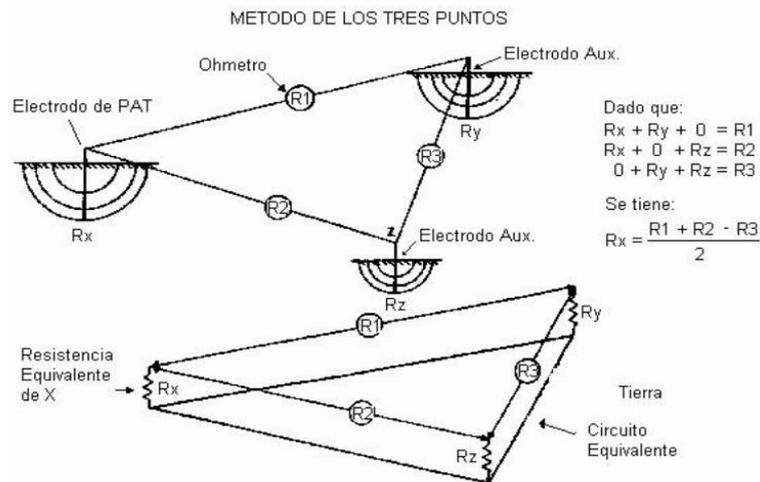


Figura 1.21. Medición de resistencia de puesta a tierra – Método de los tres puntos.

Fuente: <http://www.lu3hba.com.ar/ARTICULOS%2010/Medicion%20de%20Sistema%20de%20Puesta%20a%20Tierra.pdf>

1.8.3. Método de curva de caída de potencial [14].

Si se hace una investigación de campo, o sea, se clava el electrodo de corriente a una cierta distancia, de manera que se esté fuera de la zona de influencia de la puesta a tierra incógnita y luego se mide el valor de resistencia de puesta a tierra, variando la distancia del electrodo de tensión, se puede observar que existe una zona de potencial plana, equivalente a un valor constante de resistencia. Ese es, por tanto, el verdadero valor de la resistencia de una puesta a tierra.

Para que el método sea más simple se puede reducir el número de medidas a tres. Si se hace un promedio de ellas y el valor de cada medida se encuentra dentro del error aceptable para la medición (por ejemplo 5%), comparándola con el promedio, entonces, el valor "oficial" promedio hallado es el verdadero valor de la resistencia de puesta a tierra. Si se determina la mayor dimensión de la puesta a tierra (L), se puede decir que una distancia apropiada es cuando está entre 5 y 6 veces dicha dimensión (Ver Fig. 1.22).

Cuando se deduce la dimensión de la puesta a tierra, se da un valor a esta profundidad (o extensión si fuera horizontal) se multiplica por 5 y allí se clava el electrodo de corriente. Luego se realizan las tres mediciones, se verifica que el error esté por debajo de lo previsto y se determina que ése es el valor. Pero si los

resultados no estuvieran dentro del error previsto se debe distanciar el electrodo de corriente mucho más, pues significa que no se está en la zona plana de potencial. Si las distancias no permiten extenderse más, se debe aplicar otro método.

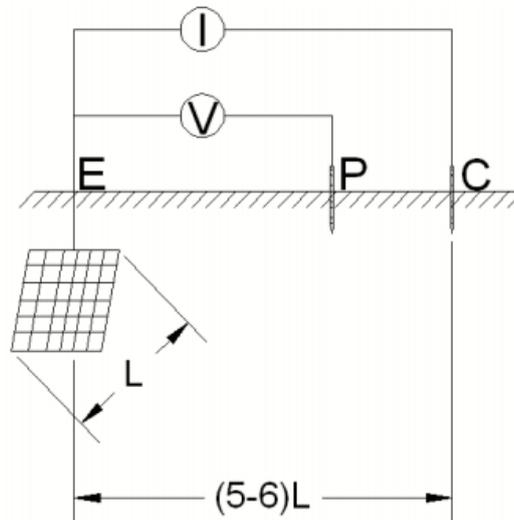


Figura 1.22. Medición de resistencia de puesta a tierra – Método de curva de caída de potencial.

Fuente: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5021/1/T-ESPEL-0868.pdf>

1.8.4. Método de la regla del 62% [14].

Desarrollado por G. F. Tagg y publicado en el "Proceeding of the IEEE volumen III No. 12 de diciembre de 1964". El autor menciona que las zonas de influencia de puestas a tierra pueden ser tan grandes que para evitar la superposición de estas áreas, quien va a medir debe tomar distancias considerables entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra por evaluar. Es fundamental para el método, que las áreas de influencia no se superpongan entre sí. Se basa en tomar la puesta a tierra como una semiesfera, con la que se obtiene el valor de 0,6180.

Este método requiere las mismas distancias que el anterior. La distancia entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra por evaluar debe ser entre 5 y 6 veces la mayor dimensión de la puesta a tierra o el diámetro equivalente. Aunque la empresa Fluke en la descripción sobre la utilización del equipo telurómetro Fluke 1625 menciona, que para este método habitualmente, una separación de 20 metros es suficiente. La diferencia con el método de la caída de potencial está en que el punto donde se debe tomar el valor verdadero de la resistencia de puesta a tierra, es con el electrodo de tensión a 0,618 de C (~0,62).

El método, como se aplica actualmente, recomienda hacer tres mediciones, siendo la primera con el electrodo de tensión al 62% de la distancia del de corriente y las otras dos a +/-10% de ese punto, si los valores obtenidos no varían en más de un 10% el valor verdadero de las resistencias es el obtenido en el punto del 62% y no el obtenido como promedio, si varían en más de 10% entonces de debe incrementar la distancia del electrodo de corriente C2 (Ver Fig. 1.23).

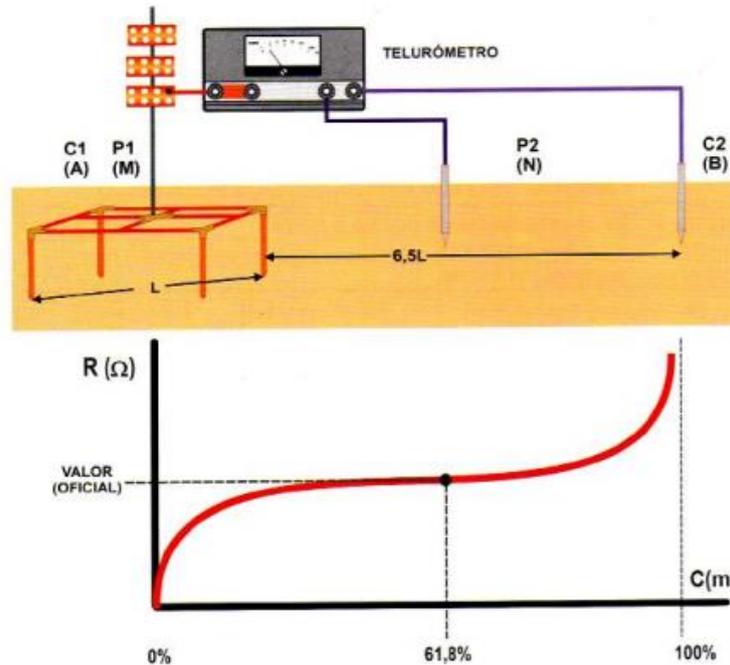


Figura 1.23. Medición de resistencia de puesta a tierra – Método de la regla del 62%.

Fuente: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5021/1/T-ESPEL-0868.pdf>

1.9. Técnicas para mejorar la resistencia de los sistemas de puesta a tierra.

1.9.1. Características de un suelo artificial [15].

Para mejorar la resistividad del terreno donde se va a instalar el sistema de puesta a tierra los terrenos pueden ser cambiados en su totalidad. Cuando los terrenos son rocosos, pedregosos, calizas, granito, etc., que son terrenos de muy alta resistividad y pueden cambiarse parcialmente cuando el terreno está conformado por componentes de alta resistividad, mejorando significativamente la resistividad.

Se recomienda que el terreno cambiado para el sistema de puesta a tierra tenga un contorno de hasta $0,5\text{m}^3$ por electrodo, esto depende de las recomendaciones del fabricante del suelo artificial.

El porcentaje de reducción en estos casos es difícil de deducir, debido a los factores que intervienen, como son resistividad del terreno natural, resistividad del terreno de reemplazo total o parcial, adherencia por la compactación y limpieza del electrodo.

Para lugares de alta resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma total, el porcentaje puede estar entre 50 a 70 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de media resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma parcial o total, el porcentaje de reducción puede estar como sigue:

- Cambio parcial de terreno: Reducción de 20 a 40 % de la resistencia de puesta a tierra.
- Cambio total del terreno: Reducción de 40 a 60 % de la resistencia de puesta a tierra.
- Para terrenos de baja resistividad donde se cambiará el terreno de los pozos en forma parcial, el porcentaje de reducción puede estar entre 20 a 40 % de la resistividad natural del terreno.

1.9.2. Utilización de concretos especiales [15].

El concreto húmedo se comporta en esencia como un electrolito con resistividad del orden de $100\ \Omega\text{m}$. Por otra parte, el concreto secado al horno tiene una resistividad de $109\ \Omega\text{m}$, lo que indica que es un aislante bastante bueno. Este gran aumento de resistividad que obtiene el concreto al quitarle el agua significa que la corriente eléctrica fluye a través del material húmedo principalmente por medios electrolíticos, es decir, mediante los iones que contiene el agua evaporable. Por tanto, puede esperarse que cualquier aumento de agua y de iones presentes disminuyen la resistividad de la pasta de cemento y, de hecho, la resistividad decrece al aumentar la relación agua/cemento o con aditivos.

A pesar de que la gran mayoría de los aditivos no reducen la resistividad del concreto de manera confiable y significativa, existen algunos eficaces para este propósito. Un caso ya estudiado para disminuir la resistencia del concreto, es añadiendo negro de humo de acetileno (del 2 al 3% por peso del cemento).

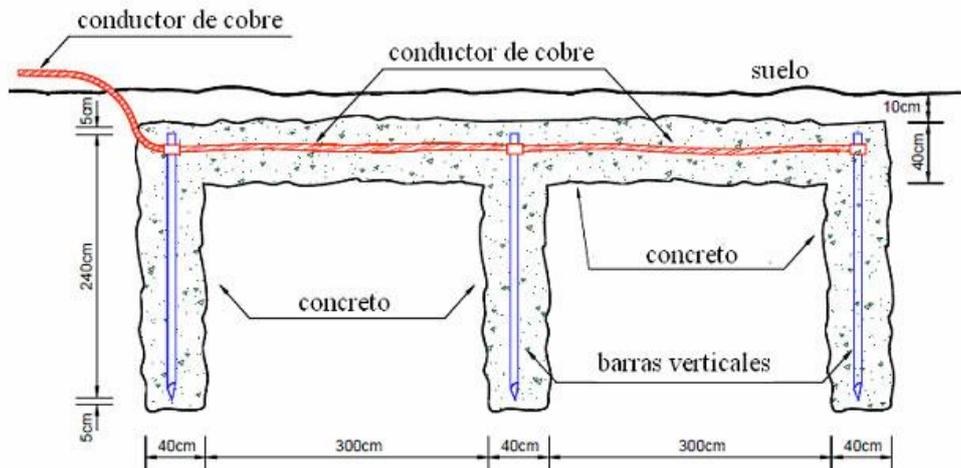


Figura 1.24. Técnicas para mejorar la resistencia de los SPT - Uso de concretos especiales.

Fuente: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000300016&script=sci_arttext

1.9.3. Utilización de concretos conductivos [15].

El concreto es una mezcla en la que intervienen arena, cemento, grava y agua. Cuando se construye una fundición de concreto reforzado, los mecanismos de conducción eléctrica son electrolíticos y arcos eléctricos con evidentes efectos de polarización. Todo indica que si se supera una energía crítica se presentarán daños severos en el concreto, por lo que toma gran relevancia el cálculo de densidades de corriente si se pretende construir puestas a tierra en concreto. Se estima entonces que una densidad de corriente menor a 5 A/cm^2 , no dañará fundiciones en concreto, pero si se excede de 15 A/cm^2 sí hay daño. Según datos experimentales se pueden mejorar las condiciones de un concreto al adicionarle suelo artificial Favigel en proporción de 15% (Ver Fig. 1.25 y Fig. 1.26), en el que la mezcla se comportó como un cemento puzolánico, es decir, el fraguado es más lento pero la resistencia mecánica se aumentó.

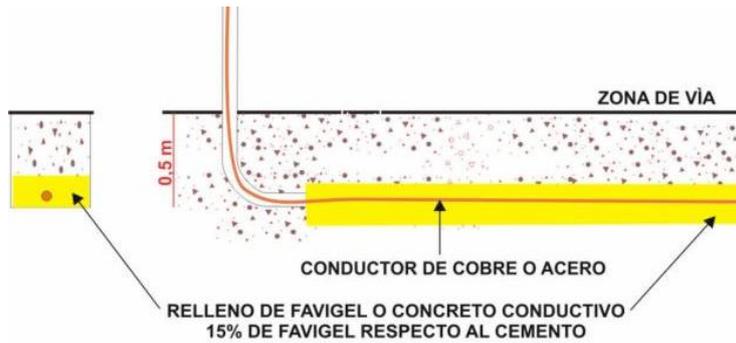


Figura 1.25. Concreto conductor Favigel con electrodo horizontal.

Fuente: <http://bogotacity.olx.com.co/suelo-artificial-favigel-iid-101340283>

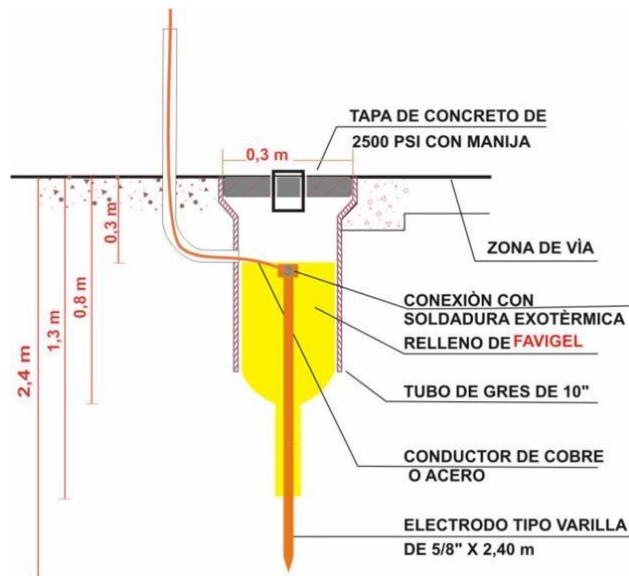


Figura 1.26. Concreto conductor Favigel con electrodo vertical.

Fuente: <http://bogotacity.olx.com.co/suelo-artificial-favigel-iid-101340283>

1.9.4. **Introducción de electrodos al concreto [16].**

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 conectados a las varillas.

La norma NEC obliga a que estos electrodos encajonados en concretos, usen un cable de calibre 4 AWG, un largo mínimo de 20 pies (6.096 m) encajonado en al menos 2 pulgadas (5.08 cm) de concreto. La ventaja de este tipo de electrodos es que aumenta dramáticamente la superficie de contacto con el suelo o la tierra. Sin embargo la zona de influencia no se incrementa, por tanto, la resistencia a tierra es solo ligeramente inferior a la de un cable desnudo enterrado en el suelo.

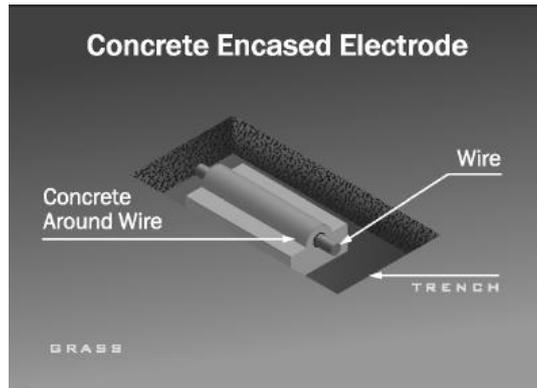


Figura 1.27. Introducción de electrodos al concreto.

Fuente: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/18711/2/610284V715dm_anexo.pdf

1.9.5. Tratamiento químico electrolítico del terreno de los pozos [17].

El tratamiento químico del suelo surge como un medio de mejorar y disminuir la resistividad del terreno, sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos. Existen diversos tipos de tratamiento químico para reducir la resistencia de un pozo a tierra:

1.9.5.1. Bentonita.

Si se considera el comportamiento del conductor a frecuencia industrial, la norma IEEE Std 80, edición 2000 considera el tratamiento químico del terreno como una forma efectiva de aumentar el diámetro del conductor, resaltando que las zonas de terreno cercanas al electrodo comprenden el núcleo de la resistencia de puesta a tierra del electrodo. La utilización de materiales para mejora de terreno con resistividad muy inferior a la de la bentonita, en el orden del 5% de ésta. La bentonita sódica tiene una resistividad entre 2 y 5 ohm-m.

Si el material de tratamiento tuviese una resistividad menos que la de la bentonita, podría reducirse el valor de la resistencia hasta en un 15% respecto al que se obtendría con una bentonita convencional.

A continuación se muestra la caída de tensión en el recubrimiento de bentonita para una jabalina de largo variable, en función del diámetro del conductor recubierto con bentonita y de la resistividad del terreno, para valores de resistividad de la bentonita de 2.5 ohm-m (Ver Fig. 1.28) y resistividad de la bentonita de 5 ohm-m, y para resistividad del terreno natural de 10, 100 y 200 ohm-m.

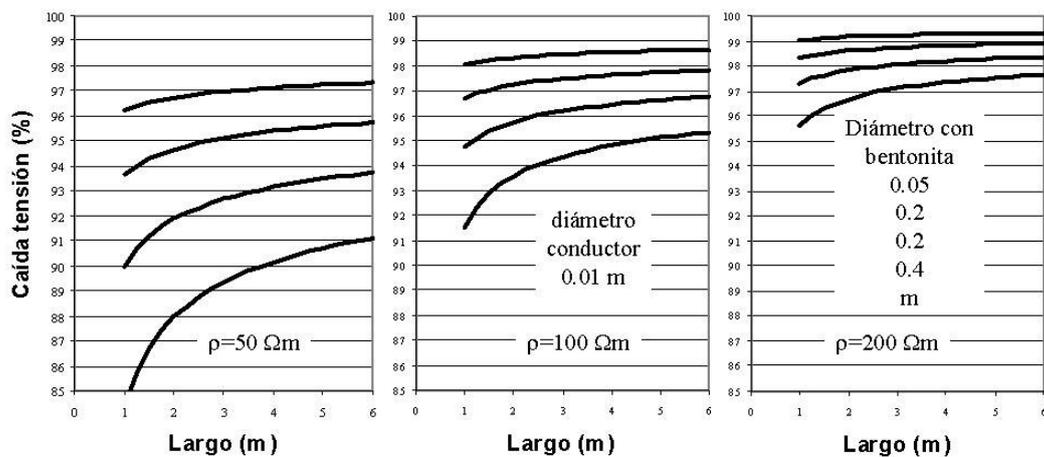


Figura 1.28. Caída de tensión con resistividad de bentonita de 2.5 ohm-m.

Fuente: <http://www.abelardomautino.com/pozo-a-tierra.htm>

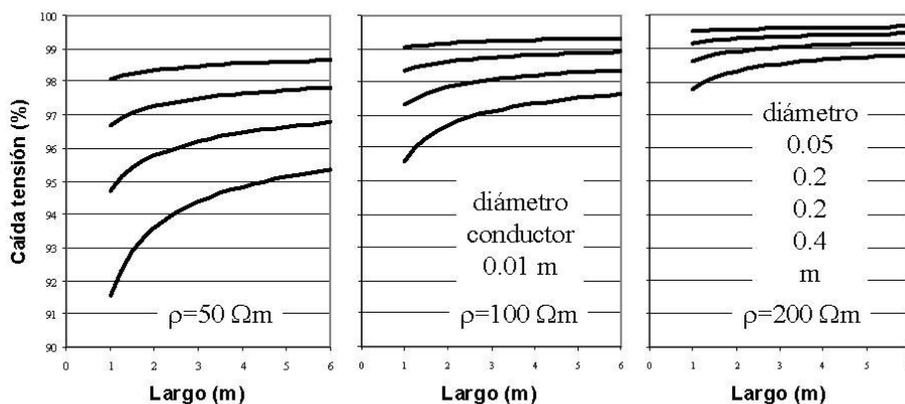


Figura 1.29. Caída de tensión con resistividad de bentonita de 5 ohm-m.

Fuente: <http://www.abelardomautino.com/pozo-a-tierra.htm>

1.9.5.2. Marconita.

Es esencialmente un concreto conductivo en el cual un agregado carbonáceo reemplaza el agregado normal usado en la mezcla del concreto. Tiene algunas propiedades similares a la bentonita, es decir, provoca poca corrosión con ciertos metales y tiene baja resistividad. Fue desarrollada como un proceso que se inició en 1962 cuando ingenieros de Marconi descubrieron un material que conducía por movimiento de electrones más bien que de iones. Contiene una forma cristalina de carbón y el material global tiene bajo contenido de sulfato y cloruro.

Cuando la Marconita se mezcla con concreto, su resistividad puede bajar tanto como a 0,1 ohm-metro. Mantiene su humedad aún bajo condiciones muy secas, de modo que ha sido usada en los climas más cálidos como una alternativa a la Bentonita.

Su aplicación se centra para encerrar electrodos en perforaciones o espacios en el interior de rocas. También es probable que los espacios se llenen parcialmente con otros materiales tales como concreto para reducir la cantidad de material patentado que se requiera.

Normalmente se considera que la Marconita tiene una resistividad de 2 ohm-metro. También se usa la Marconita algunas veces para piso antiestático y apantallamiento electromagnético [12].

1.9.5.3. THOR-GEL.

Es un compuesto químico complejo, que se forma cuando se mezclan en el terreno las soluciones acuosas de sus 2 componentes. El compuesto químico resultante tiene naturaleza coloidal, y es especial para el tratamiento químico electrolítico de las puestas a tierra, este componente viene usándose mayormente por sus muy buenos resultados, debido a que posee sales concentradas de metales que neutralizan la corrosión de las sales incorporadas, como también aditivos para regular el PH y acidez de los suelos.

Este compuesto posee otra ventaja que al unirse en el terreno se forma un compuesto gelatinoso que le permite mantener una estabilidad, química y eléctrica por aproximadamente 4 años. El método de aplicación consiste en incorporar al pozo los electrolitos que aglutinados bajo la forma de un Gel, mejoren la conductibilidad de la tierra, y retengan la humedad en el pozo, por un período prolongado. De esta manera se garantiza una efectiva reducción de la resistencia eléctrica, y una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones del clima [17].

Pasos para la aplicación de THOR-GEL [16]

Para rellenar el pozo se utilizará tierra de cultivo tamizada en malla de 1/2", llene los primeros 0.30 m y compacte con un pisón, presente el electrodo con el helicoidal, llene

los siguientes 0.20 m y vuelva a compactar, repita la operación hasta completar 1 m³, luego forme una concavidad alrededor del electrodo con el helicoidal (Ver Fig. 1.30).

Disuelva el contenido del Thor en no menos de 20 litros de agua y viértala en la concavidad el pozo o la zanja, espere su total absorción; disuelva el contenido del Gel en no menos de 20 litros de agua y proceda de la misma forma que con el producto crema (Ver Fig. 1.31).

Repita la aplicación hasta culminar el pozo, colocando una caja de registro de concreto con tapa, por medio de la cual se realizaran las mediciones del pozo y facilitara el mantenimiento periódico (Ver Fig. 1.32).

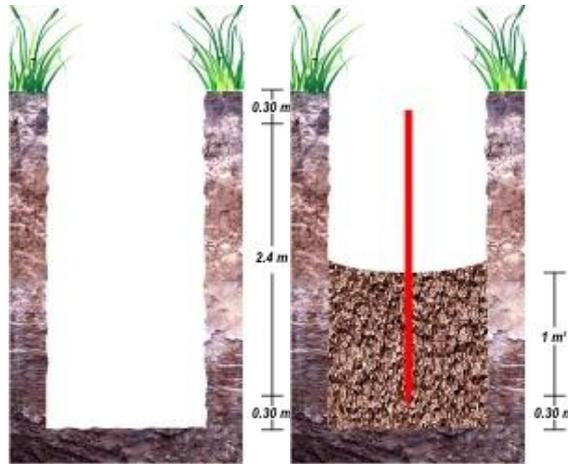


Figura 1.30. Aplicación del thor-gel – Relleno de pozo.

Fuente: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1871/2/610284V715dm_anexo.pdf



Figura 1.31. Aplicación del thor-gel – Aplicación de sustancias disueltas en agua.

Fuente: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1871/2/610284V715dm_anexo.pdf

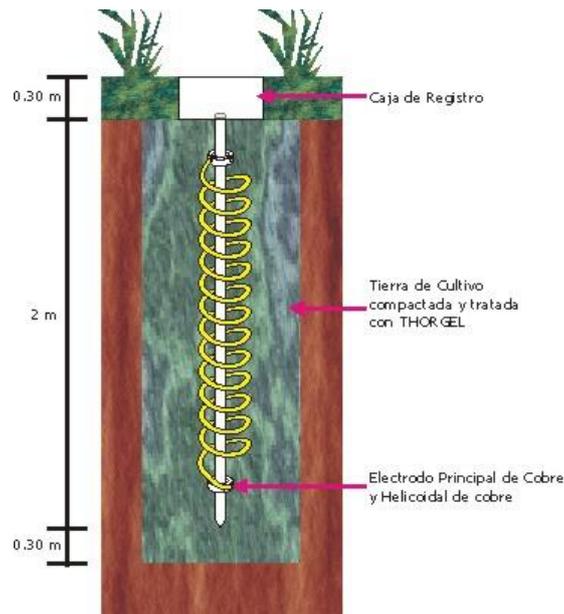


Figura 1.32. Aplicación del thor-gel – Colocar una caja de registro de concreto con tapa.

Fuente: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1871/2/610284V715dm_anexo.pdf

La aplicación del THOR-GEL es de 1 a 3 dosis por m^3 según sea la resistividad natural del terreno y la resistencia final deseada, ver la Tabla 1.6 [17].

Tabla 1.6. Dosis de THOR-GEL según la naturaleza del suelo

Naturaleza del terreno	Resistividad (Ωm)	Dosis Thor-Gel por m^3
Terrenos cultivables y fértiles	50	1
Terraplenes compactos y húmedos	50	1
Terrenos cultivables y poco fértiles	500	1 a 2
Suelos pedregosos desnudos arena seca, permeable	3000	2
Suelos rocosos fraccionados	6000	2 a 3
Suelos rocosos compactos	14000	3

Fuente: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/qqueshuayllo_cw/cap2.pdf

Mientras más dosis por m^2 de Thor-Gel que apliquemos al suelo donde funciona el sistema de puesta a tierra, menor será la resistividad del suelo (Ver Fig. 1.33), este valor es menó aún si aumenta el número de electrodos en el SPT.

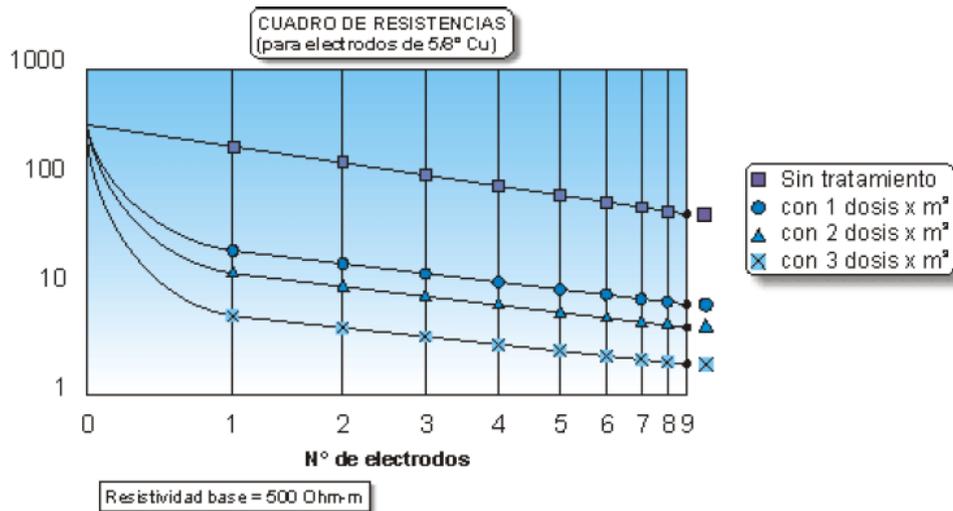


Figura 1.33. Comportamiento de la resistividad del suelo con cada dosis de Thor-Gel.

Fuente: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/qqueshuayllo_cw/cap2.pdf

1.9.5.4. El cemento Conductivo GEM.

El material de refuerzo de tierra es un material conductor de gran calidad que resuelve los problemas más complicados de puesta a tierra. El GEM presenta una baja resistencia, no es corrosivo, está compuesto de polvo de carbón, material que mejora la eficacia del Sistema de Puesta a Tierra, especialmente en zonas en donde la conductividad es muy pobre. El GEM contiene cemento Portland, que se endurece cuando se fragua, convirtiéndose en un concreto conductor lo cual facilita que la instalación sea libre de mantenimiento y mantiene al Sistema de Puesta a Tierra con valores de resistividad bajos ya que el GEM nunca se filtra o deslava.

El fabricante de GEM, Erico, facilita un calculador [18] de bolsas de GEM requeridas para electrodos verticales y horizontales. En la Figura 1.34 se muestra que para un electrodo vertical de hasta 2,5 m de longitud, con un diámetro del pozo de 10 cm se necesita 1 bolsa de GEM (de 11 Kg.). En la figura 1.35 se muestra que para cable horizontales, se necesita una bolsa de GEM (de 11 Kg.) por cada 3 metros de cable # 2/0 AWG, tendido en zangas de 10 cm de ancho, enterrado a 1,5 metros de profundidad y con un espesor de GEM de 5 cm.



Figura 1.34. Cantidad de bolsas de GEM requeridas para electrodos verticales.

Fuente: Elaborado por los autores.



Figura 1.35. Cantidad de bolsas requeridas para cable horizontal.

Fuente: Elaborado por los autores.

La cantidad de dosis de cemento GEM por metro cúbico de tierra del SPT, varía de 1 a 3, y está en función de la resistividad natural del terreno. En la siguiente tabla se presentan algunos valores de dosificaciones en función de la resistividad del terreno, según estudios del fabricante de cemento GEM Erico:

Tabla 1.7. Dosificación de cemento GEM en función de la resistividad del terreno.

Resistividad del terreno (Ωm)	Dosificación
De 50 a 200	1 dosis por m^3
De 200 a 400	2 dosis por m^3
De 400 o más	3 dosis por m^3

Fuente: www.ericom.com

En la Tabla 1.8 se indican los resultados obtenidos luego de haber aplicado cemento GEM, para diferentes distancias de electrodos horizontales.

Tabla 1.8. Resultados de resistividad del terreno aplicando cemento GEM.

Distancia horizontal entre electrodos	Resistividad inicial del terreno (Ωm)	Resistividad del terreno una vez aplicado el GEM (Ωm)
1 m	158	28
2 m	162	29
3 m	165	31
4 m	165	32
5 m	190	30
Promedio	168	30

Fuente: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/1306/1/T-UTC-2048.pdf>

Según los resultados obtenidos luego de la aplicación del cemento químico GEM, la resistividad del terreno baja en promedio a 30 Ωm , que será el valor de resistividad del terreno que se considera una vez aplicada la dosis de cemento GEM.

Pasos para la Instalación en zanjas de GEM:

- a) Premezclar el GEM para preparar una mezcla. Utilice de 5.7 a 7.6 litros (1.5 a 2 galones) de agua potable por bolsa. Para preparar el GEM en una mezcla, utilice un mezclador de concreto estándar o mézclelo en forma manual en una caja mezcladora, carretilla, etc. Utilice de 5.7 a 7.6 litros (1.5 a 2 galones) de agua potable por bolsa de GEM (Ver Fig. 1.36.1).
- b) Ponga suficiente mezcla de GEM para cubrir uniformemente el fondo de la zanja con más o menos 2.5 cm. (1 pulgada) de espesor (Ver Fig. 1.36.2).
- c) Coloque el conductor sobre el GEM (Ver Fig. 1.36.3). En este punto espere a que el GEM endurezca, aproximadamente de 15 a 20 minutos antes de colocar el conductor. Se debe de instalar 10 cm. (4 pulgadas) de material aislante en los conductores y electrodos en la zona de interface (aire-terreno), empezando 5 cm. (2 pulgadas) dentro del GEM.
- d) Ponga más GEM sobre el conductor hasta cubrirlo completamente Ponga más GEM sobre el conductor hasta cubrirlo completamente con unos 2.5 cm. (1 pulgada) de espesor. Espere a que el GEM endurezca, aproximadamente de

30 minutos a una hora antes de poner el relleno natural de la zanja (Ver Fig. 1.36.4).

e) Cuidadosamente cubra el GEM con tierra hasta unos 10 cm. (4 pulgadas) de la superficie, cuidando que el conductor no quede expuesto (Ver Fig. 1.36.5).

f) Compacte la tierra y termine de cubrir la zanja con más tierra (Ver Fig. 1.36.6).

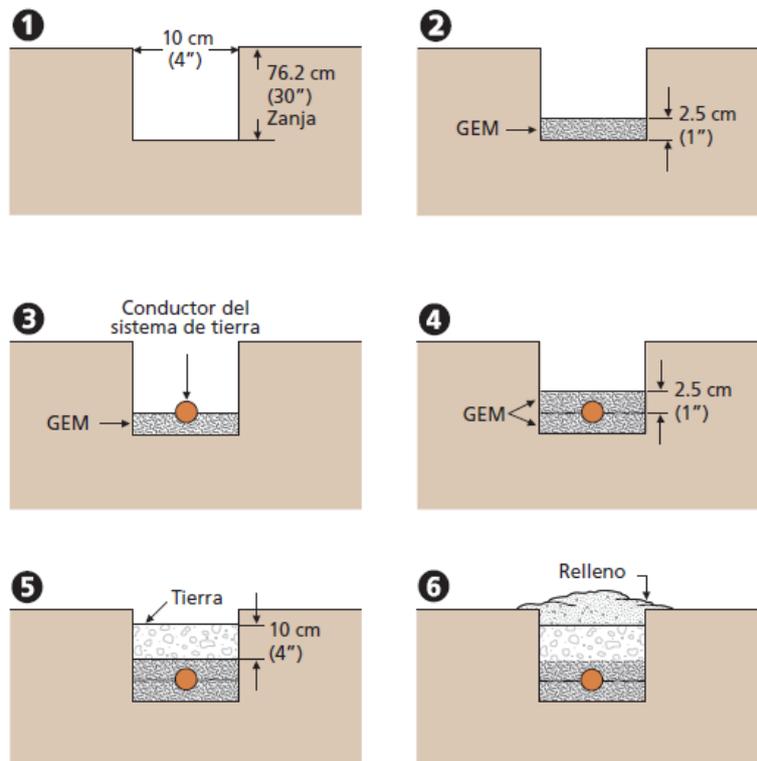


Figura 1.36. Pasos para la aplicación de GEM en un SPT.

Fuente: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1871/2/610284V715dm_anexo.pdf

El cemento Conductivo GEM tiene un factor de resistividad 20 veces menor a la arcilla bentonita (Ver Fig. 1.37), por lo tanto es mucho más eficiente.

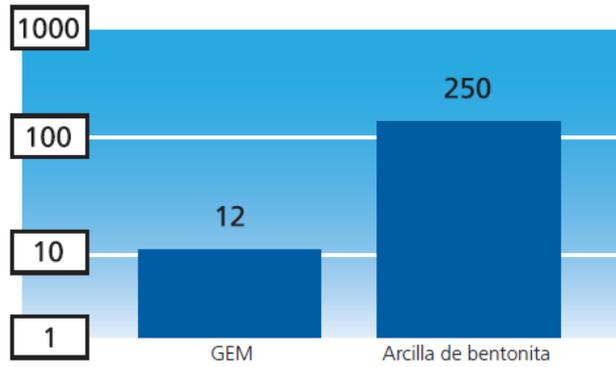


Figura 1.37. Comparación del cemento conductor GEM y la arcilla de bentonita.

Fuente: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1871/2/610284V715dm_anexo.pdf

1.9.5.5. Utilización de Varillas Copperweld [19].

Esta varilla es una de las más usadas, ya que es de bajo costo de material. Este tipo de electrodo está hecho de acero y recubierto de una capa de cobre, su longitud es de 3.05 metros y un diámetro de 16 milímetros. Esta varilla se debe enterrar en forma vertical y a una profundidad de por lo menos 2.4 metros, esto por norma (Ver Fig. 1.38 y Fig. 1.39). También por norma se acepta que la varilla vaya enterrada en forma horizontal, siempre y cuando sea en una zanja de mínimo 80cm de profundidad, pero no es muy recomendable. La varilla copperweld no tiene mucha área de contacto, pero sí una longitud considerable, con la cual es posible un contacto con capas de tierra húmedas, lo cual se obtiene un valor de resistencia bajo.

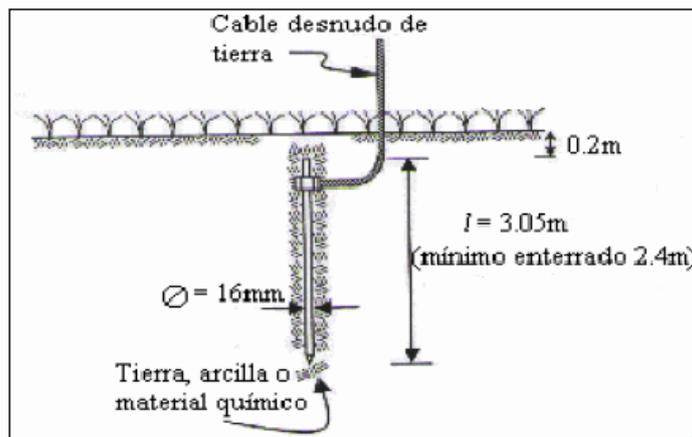


Figura 1.38. Medidas para colocar una varilla copperweld.

Fuente: <http://dc184.4shared.com/doc/SoDP54Vc/preview.html>

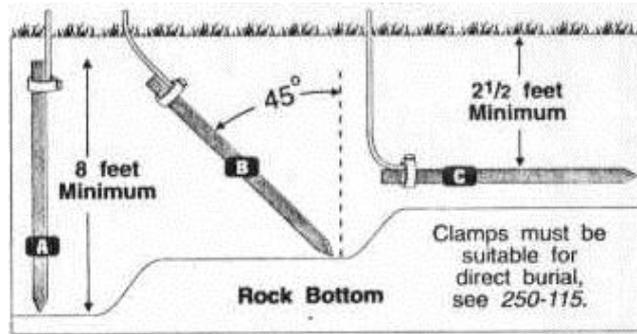


Figura 1.39. Ángulos para la utilización de varillas copperweld.

Fuente: <http://dc184.4shared.com/doc/SoDP54Vc/preview.html>

1.9.5.6. Soldadura Exotérmica [12].

Uno de los principales problemas de los sistemas de puesta a tierra, ha sido siempre el incremento de la resistencia de contacto por causa de empalmes defectuosos entre conductores, conductores-barras o entre conductores y superficies, por lo que se ha previsto utilizar la soldadura exotérmica con el fin de reducir el incremento de la resistencia por cada empalme.

La soldadura exotérmica es un proceso en el que se hace un empalme eléctrico al verter una aleación caliente de cobre fundido, en el interior de un recinto en el cual se encuentran alojados los conductores a ser unidos. Esta aleación de cobre fundido, contenida y controlada dentro de un molde de grafito especialmente diseñado para este fin, hace que los conductores se fundan.

a) Materiales para una soldadura exotérmica [20]

Polvo Iniciador: Mezcla más reactiva y exotérmica que la reacción principal necesaria para que ésta se produzca (Ver Fig. 1.40). Se requiere muy poca cantidad en comparación con la de compuesto de soldadura.



Figura 1.40. Polvo iniciador de la soldadura exotérmica.

Fuente: <http://www.iesacr.com/archivos/SoldaduraExotermica.pdf>

Compuesto de soldadura: Mezcla en polvo que contiene los componentes químicos necesarios para que se produzca la reacción (Ver Fig. 1.41). Dependiendo de los materiales a soldar, y de sus secciones, se requiere una cantidad distinta de compuesto, por lo que existen diferentes tamaños de envase.



Figura 1.41. Compuesto de soldadura exotérmica.

Fuente: <http://www.iesacr.com/archivos/SoldaduraExotermica.pdf>

Platillos soportes: Se incluyen en el kit de soldadura y son de diámetro superior al canal de bajada del fundido, obturándolo de forma que el compuesto de soldadura se mantenga en la tolva previamente a la reacción (Ver Fig. 1.42).



Figura 1.42. Platillos soportes de la soldadura exotérmica.

Fuente: <http://www.iesacr.com/archivos/SoldaduraExotermica.pdf>

Molde de grafito: Recipiente de este material en el que tiene lugar todo el proceso. Se requieren moldes distintos en función del tamaño y forma de los materiales a soldar, pero en un mismo molde pueden realizarse entre 80 y 120 soldaduras de un mismo tipo (Ver Fig. 1.43).



Figura 1.43. Molde de grafito abierto y cerrado de la soldadura exotérmica.

Fuente: <http://www.iesacr.com/archivos/SoldaduraExotermica.pdf>

Pinzas para molde de grafito: Necesarias para la apertura y cierre del molde, son imprescindibles como elemento de seguridad en su manejo (Ver Fig. 1.44).



Figura 1.44. Molde de grafito abierto y cerrado.

Fuente: <http://www.iesacr.com/archivos/SoldaduraExotermica.pdf>

Complementos: Para un correcto funcionamiento del proceso, requiere de una serie de complementos como utensilios de limpieza, encendido y sellado (Ver Fig. 1.45).



Figura 1.45. Materiales complementarios de la soldadura exotérmica.

Fuente: <http://www.iesacr.com/archivos/SoldaduraExotermica.pdf>

b) Pasos para una soldadura exotérmica (Ver Fig. 1.46).

- Colocar los conductores en el molde y cerrar las pinzas para evitar fugas de material durante la reacción.
- Obturar el canal del molde con el platillo soporte.
- Vaciar el contenido del envase de compuesto de soldadura.
- Verter el 50% del polvo iniciador a modo de mecha sobre el borde del molde y el resto sobre el compuesto de soldadura. Cerrar la tapa del molde.
- Encender aplicando el chisquero de piedras sobre el polvo iniciador extendido en el borde del molde.
- Una vez en marcha, la reacción transcurrirá en 3-4 segundos durante los que es recomendable colocarse detrás del molde.
- Al finalizar es conveniente esperar otros 10 segundos antes de abrir el molde. Nunca hay que tocarlo en este paso, manipulándolo únicamente con las pinzas. Una vez abierto, limpiar el molde de la escoria adherida con los cepillos para limpiar moldes.

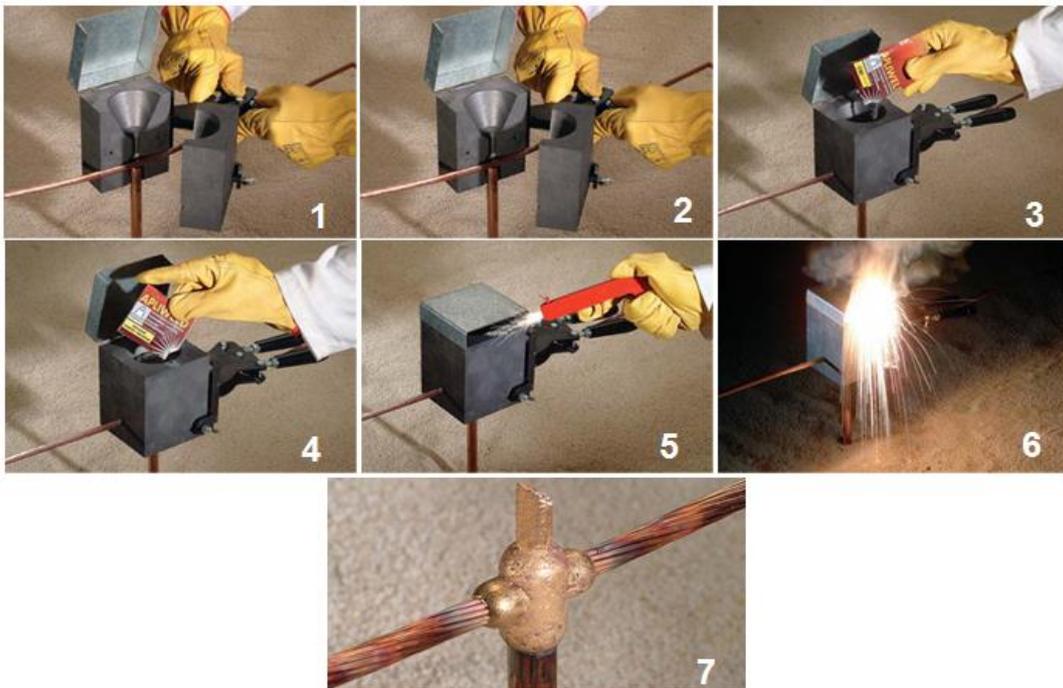
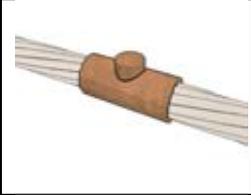
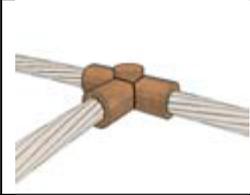
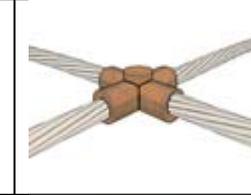
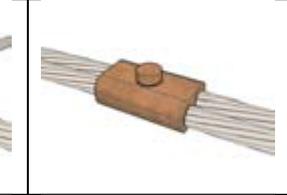
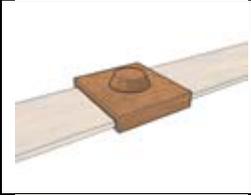
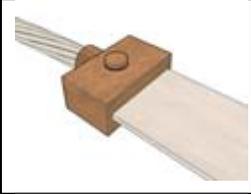
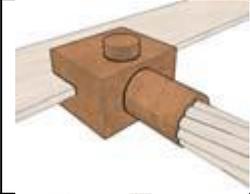
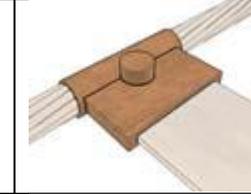
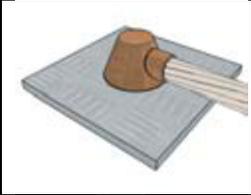
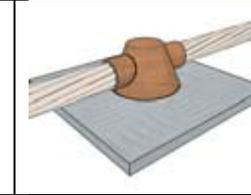
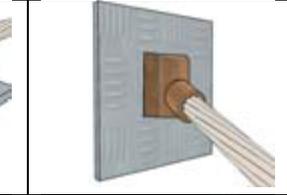
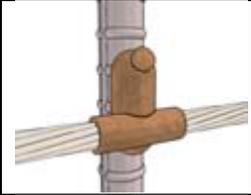
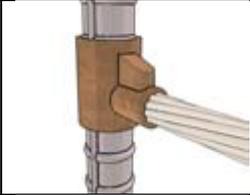
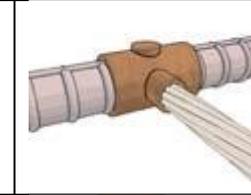
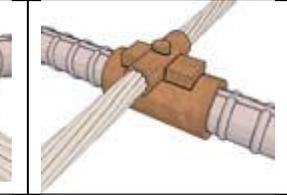
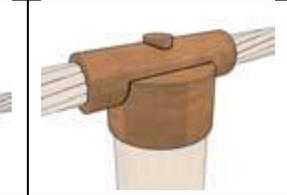
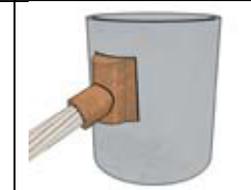


Figura 1.46. Pasos para una soldadura exotérmica.

Fuente: <http://www.iesacr.com/archivos/SoldaduraExotermica.pdf>

En la Tabla 1.9 se muestran los diferentes tipos de unión de cables, platina metálica, varilla y pica mediante la suelda exotérmica:

Tabla 1.9. Uniones de cable, platina, pieza metálica, varilla, pica mediante suelda exotérmica.

Tipo de unión	Gráficos de los tipos de unión			
Cable-Cable				
Platina-Platina				
Cable-Platina				
Cable-Pieza metálica				
Cable-Varilla				
Cable-Pica				
Otras conexiones				

Fuente: <http://www.iesacr.com/archivos/SoldaduraExotermica.pdf>

1.9.5.7. Electrodo Electrolíticos.

Los electrodos electrolíticos fueron implementados para eliminar las desventajas del resto de los electrodos de aterramiento antes mencionados. Es un electrodo de aterramiento activo que consiste en una tubería hueca de cobre rellena de sal natural que es higroscópica y atrae la humedad del aire hacia dentro del electrodo (Ver

Fig. 1.47). La humedad se mezcla con la sal formando electrólisis lo que permite mantener húmedo y en un alto contenido iónico el material interno del electrodo.

Están fabricadas en cañería de cobre ASTM 11000 de 2 1/8" de diámetro, con chicote de 3m de largo en calibre 2/0 AWG ó 4/0 AWG (19 hebras). En su interior se encuentra un compuesto químico de Sales Despolarizantes, que a través de perforaciones hechas cada 150mm en las paredes del Electrodo escurren hacia el terreno.

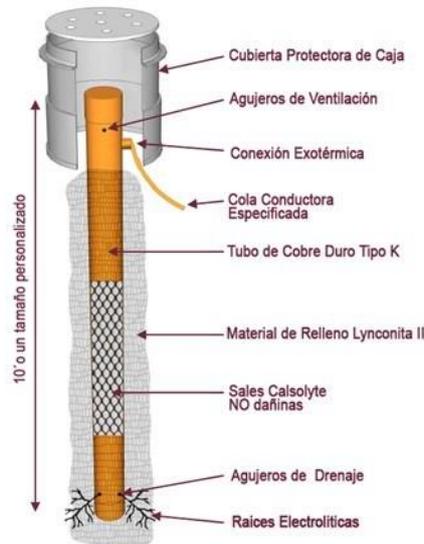


Figura 1.47. Esquema de un electrodo electrolítico.

Fuente: <http://www.alcosur.cl/Catalogos/mpt.pdf>

CAPÍTULO 2

2. REVISIÓN DE LA NORMATIVA QUE RIGEN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

2.1. Normativa nacional sobre los sistemas de puesta a tierra.

2.1.1. Regulaciones del CONELEC

La Ley de Régimen del Sector Eléctrico (LRSE), en el Cap. I, Art.1, establece que es obligación del Estado satisfacer las necesidades de energía eléctrica en el país. En el Cap. II, Art.5, literal a, señala que el servicio de energía debe cumplir con requerimientos de calidad, y, en el Art. 7, puntualiza que el Estado es el encargado de garantizar la continuidad del servicio de energía eléctrica.

La LRSE, en el Cap. III, Art.11, crea el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), como parte de la estructura del sector eléctrico. En el Cap. IV, Art.12, la LRSE concede al CONELEC, entre otras, la obligación de regular y controlar la calidad del servicio de energía eléctrica. En el Cap. IV, Art.13, la LRSE concede al CONELEC la potestad de dictar regulaciones con respecto a la calidad del servicio, regulaciones de cumplimiento obligatorio para los generadores, transmisores, y, distribuidores del sector eléctrico.

En cumplimiento con las atribuciones concedidas por la LRSE, el CONELEC ha dictado varias resoluciones encaminadas a regular, planificar, y, controlar los servicios públicos de suministro de energía eléctrica. Se analizó la regulación CONELEC 008/12 [21], que establece el modelo de contrato para la prestación del suministro de servicio público de energía eléctrica a ser suscrito entre las empresas distribuidoras y los consumidores regulados; así como también determinar los aspectos que debe contener el contrato de conexión a ser suscrito entre las empresas distribuidoras y los no regulados que se conecten a su red eléctrica.

Según esta resolución, en la cláusula décima primera, de los derechos y responsabilidades del consumidor, se establece que el consumidor deberá responsabilizarse de que las instalaciones eléctricas interiores, incluido el sistema de puesta a tierra estén en óptimas condiciones para recibir el servicio de electricidad. Cualquier falla, o efecto secundario, derivado de sus instalaciones interiores, es de responsabilidad del consumidor.

2.1.2. Código Eléctrico Nacional Ecuatoriano (NEC)

El Código Eléctrico Nacional [2] adoptado por el INEN, en su Artículo 250, describe los requisitos generales para la puesta a tierra de circuitos y sistemas eléctricos.

2.1.2.1. Alcance (250-1).

Este Artículo cubre los requisitos generales para la puesta a tierra y sus puentes de unión en las instalaciones eléctricas y, además, los requisitos específicos que se indican a continuación:

- En sistemas, circuitos y equipos en los que se exige, se permite o donde no se permite que estén puestos a tierra.
- El conductor del circuito que es puesto a tierra en sistemas puestos a tierra.
- Ubicación de las conexiones a tierra.
- Tipos y tamaños nominales de los conductores, puentes de unión y electrodos de conexión para puesta a tierra.
- Métodos de puesta a tierra y puentes de unión.
- Condiciones en las que se puede sustituir a los resguardos, separaciones o aislamiento por la puesta a tierra.

2.1.2.2. Conductor que se debe poner a tierra en sistemas de corriente alterna (250-25.).

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:

- Instalaciones monofásicas bifilares: un conductor
- Instalaciones monofásicas trifilares: el conductor del neutro
- Instalaciones polifásicas con un conductor común a todas las fases: el conductor de una fase
- Instalaciones polifásicas en las que se deba poner a tierra una fase: el conductor de una fase
- Instalaciones polifásicas en las que una fase se utilice como se indica en el anterior: el conductor de neutro.

2.1.2.3. Sistema de electrodos de puesta a tierra (250-81).

Si existen en la propiedad, en cada edificio o estructura perteneciente a la misma, los elementos del literal (a) al (d) que se indican a continuación y cualquier electrodo prefabricado instalado de acuerdo con lo indicado 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 depuesta a tierra. Debe dimensionarse de acuerdo con el conductor para electrodo de puesta a tierra exigido entre todos los electrodos disponibles:

- a) **Tubería metálica subterránea para agua.** Una tubería metálica subterránea para agua en contacto directo con la tierra a lo largo de 3m o más (incluidos los andamios 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 mm² (6 AWG) o un cable de aluminio de 21.15 mm² (4 AWG).

- 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 50mm 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 6m 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 6.1m de conductor de cobre desnudo de tamaño nominal no inferior a 21.15mm^2 (2 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 800mm que conste como mínimo en 6m de conductor de cobre desnudo de tamaño nominal no-inferior a 33.62mm^2 (2 AWG).

2.1.2.4. *Electrodos especialmente contruidos (250-83).*

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 1.8m 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) **Electrodos de varilla o tubería.** Los electrodos de varilla y tubo no deben tener menos de 1.8m de longitud, deben ser del material especificado a continuación y estar instalados del siguiente modo:

- Los electrodos consistentes en tubería o tubo no deben tener un tamaño nominal inferior a 19mm (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.
 - Los electrodos de varilla de hierro o de acero deben tener como mínimo un diámetro de 16mm. Las varillas de acero inoxidable inferiores a 16mm de diámetro, las de metales no-ferrosos o sus equivalentes, deben estar aprobadas y tener un diámetro no-inferior a 13mm.
 - El electrodo se debe instalar de modo que tenga en contacto con el suelo un mínimo de 1.8m. Se debe clavar a una profundidad no-inferior a 1.8m 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 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) **Electrodos de placas.** Los electrodos de placas deben tener en contacto con el suelo un mínimo de 0.2 m² 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) **Electrodos de aluminio.** No está permitido utilizar electrodos de aluminio.

2.1.2.5. *Resistencia de los electrodos fabricados (250-84).*

Un electrodo único que consista en una varilla, tubería o placa y que no tenga una resistencia a tierra de 25 Ohm o menos, se debe complementar con un electrodo adicional de cualquiera de los tipos especificados en 250-81 o 250-83. Cuando se instalen varios electrodos de barras, tubos o placas para cumplir los requisitos de esta Sección se deben colocar a una distancia mínima de 1,83 m entre sí y deben estar efectivamente conectados entre sí.

NOTA: La instalación en paralelo de varillas de más de 2,4 m aumenta la eficiencia si se separan más de 1,8 m.

2.1.2.6. Materiales (250-91).

Los materiales del conductor del electrodo de puesta a tierra se especifican en el siguiente inciso:

- a) **Conductor del electrodo de puesta a tierra.** El conductor del electrodo de puesta a tierra debe ser de cobre o aluminio. El material elegido debe ser resistente a la corrosión que se pueda producir en la instalación, y debe estar adecuadamente protegido contra la corrosión. El conductor debe ser macizo o cableado, aislado, forrado o desnudo, y debe ser de un solo tramo continuo, sin empalmes ni uniones.

2.1.2.7. Tamaño nominal del conductor del electrodo de puesta a tierra en instalaciones de c.a (250-94).

El tamaño nominal del conductor del electrodo de puesta a tierra de una instalación de c.a. puesta o no puesta a tierra, no debe ser inferior a lo especificado en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Conductor del electrodo 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 ² (AWG o kcmil)		Tamaño nominal del conductor al electrodo de tierra mm ² (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 250kcmil	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 304,0 a 557,38 (600 a 1100)	Más de 456,04 a 886,74 (900 a 1750)	67,43 (2/0)	107,2 (4/0)

Fuente: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5021/1/T-ESPEL-0868.pdf>

2.1.2.8. Al electrodo de puesta a tierra (250-112).

La conexión de un conductor del electrodo de puesta a tierra con el electrodo correspondiente, debe ser accesible y estar hecha de tal manera que asegure una puesta a tierra eficaz y permanente. Cuando sea necesario asegurar esta conexión a

una instalación de tubería metálica utilizada como electrodo de puesta a tierra, se debe hacer un puente de unión efectivo alrededor de las juntas y secciones aisladas y alrededor de cualquier equipo que se pueda desconectar para su reparación y sustitución. Los conductores del puente de unión deben ser lo suficientemente largos como para permitir el desmontaje de dichos equipos, manteniendo la integridad de la conexión.

2.1.2.9. *Conexión a los electrodos (250-115).*

El conductor de puesta a tierra de equipo se debe conectar al electrodo de puesta a tierra mediante soldadura exotérmica, zapatas, conectadores a presión, abrazaderas u otros medios aprobados y listados. No se deben usar conexiones que dependan únicamente de la soldadura. Las abrazaderas de tierra deben estar aprobadas y listadas para el material del electrodo de puesta a tierra y para el conductor del electrodo de puesta a tierra y, cuando se usen en tubería, varillas u otros electrodos enterrados, deben estar también aprobadas y listadas para sus usos enterrados directamente en el terreno natural. No se debe conectar al electrodo de puesta a tierra con la misma abrazadera o accesorio más de un conductor, excepto si la abrazadera o accesorio está aprobada(o) y listada(o) para usarla con varios conductores.

2.1.2.10. *Sistemas con neutro puesto a tierra a través de impedancia (250-153).*

Los sistemas con neutro puesto a tierra a través de impedancia deben cumplir lo establecido en los siguientes incisos.

- a) **Ubicación.** La impedancia de puesta a tierra se debe insertar en el conductor de puesta a tierra entre el electrodo (o sistema de electrodos) de puesta a tierra del sistema de suministro y el punto neutro del transformador o del generador de suministro.
- b) **Identificación y aislamiento.** Cuando se emplee el conductor neutro de un sistema con neutro puesto a tierra a través de impedancia, se debe identificar así y aislarlo totalmente con el mismo nivel de aislamiento que los conductores de fase.
- c) **Conexión con el neutro del sistema.** El neutro de la instalación no se debe poner a tierra si no es a través de la impedancia de puesta a tierra del neutro.

2.2. Normativa internacional sobre sistemas de puesta a tierra.

2.2.1. IEC 61000-5-2. Reporte técnico de Compatibilidad Electromagnética.

La Comisión Electrotécnica Internacional, en el Reporte técnico de Compatibilidad electromagnética (EMC), IEC 61000-5-2 [10], en la Sección 2 de la Parte 5, trata específicamente sobre la Puesta a tierra y cableado.

Este informe técnico se refiere a las directrices para la puesta a tierra y el cableado de los sistemas e instalaciones eléctricas y electrónicas destinadas a garantizar la compatibilidad electromagnética (EMC) entre los aparatos o sistemas eléctricos y electrónicos. Más particularmente, se refiere a las prácticas de puesta a tierra y con los cables utilizados en instalaciones industriales, comerciales y residenciales. Este informe técnico está destinado a instaladores y usuarios, y en cierta medida, los fabricantes de instalaciones sensibles eléctricos o electrónicos y los sistemas y equipos con altos niveles de emisión que podrían degradar el electromagnético (EM) el medio ambiente en general. Se aplica principalmente a las instalaciones nuevas, pero cuando sea económicamente viable, que se puede aplicar a las extensiones o modificaciones a las instalaciones existentes.

2.2.1.1. Sobre el diseño de puestas a tierra.

Para el diseño de sistemas de tierra, el primer paso debe es conocer la resistividad del suelo. Esta resistencia es una función de la naturaleza y homogeneidad del suelo, condiciones climáticas, etc.

La geometría de electrodo de tierra debe adaptarse a la importancia de la instalación. Un electrodo de tierra limitada (tal como un cable o varilla) se puede usar sólo en el caso de instalaciones muy pequeñas, tales como una habitación o aparato o sistemas independientes.

En general, para los edificios o plantas, la mejor solución es una red mallada enterrada debajo, alrededor del edificio o de la planta.

La malla de puesta a tierra a menudo se complementa con cables radiales y/o tomas de tierra en los puntos de conexión de los cables procedentes de pararrayos, aparatos

o sistemas de alta tensión, y aparatos o sistemas con grandes corrientes de falla que regresan a través del sistema de puesta a tierra.

La puesta a tierra, como regla general se debe establecer en el suelo natural, no en materiales de relleno y, si es posible, en la tierra húmeda.

Algunos puntos prácticos son importantes porque influyen en la calidad del electrodo a largo plazo.

- Preferentemente se utilizan conductores sólidos, ya que están menos sujetos a la corrosión que los conductores varados.

- Por la misma razón (corrosión), las conexiones entre los conductores se sueldan y no implementadas por sujeción mecánica.

2.2.1.2. Sobre la conexión de puestas a tierra.

El uso de independiente o "aislado" de puestas a tierra, para computadoras o sistemas electrónicos, no se recomienda (y puede estar prohibido en algunos países). Siempre hay enlaces por el suelo o por elementos parásitos (capacitancias e inductancias mutuas) en la instalación. En caso de tormenta eléctrica y sistema de alimentación falla, pueden causar voltajes transitorios peligrosos (para la seguridad del personal y para EMC) entre este sistema de puesta a tierra aislada y otras partes de la instalación.

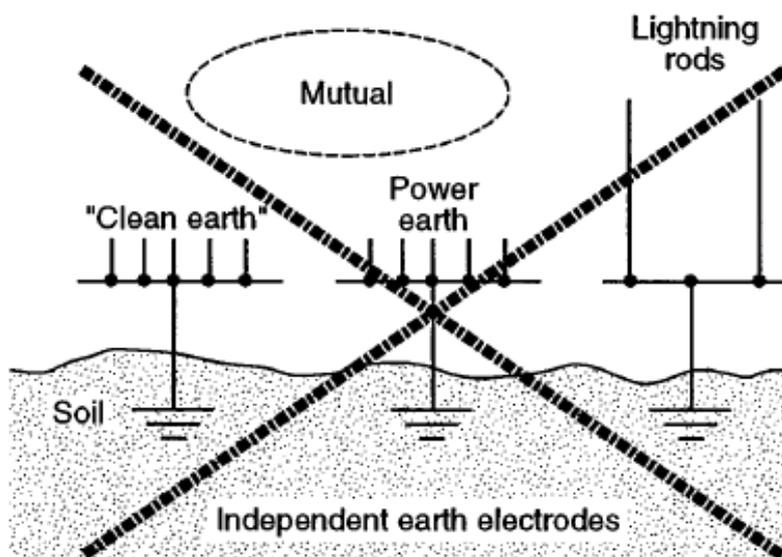


Figura 2.1. Concepto erróneo de los "dedicados", o "aislados" tomas de tierra "independientes"
Fuente: IEC 61000-5-2.

No se recomienda el uso de una sola puesta a tierra para computadoras, sistemas electrónicos y sistema de energía eléctrica.

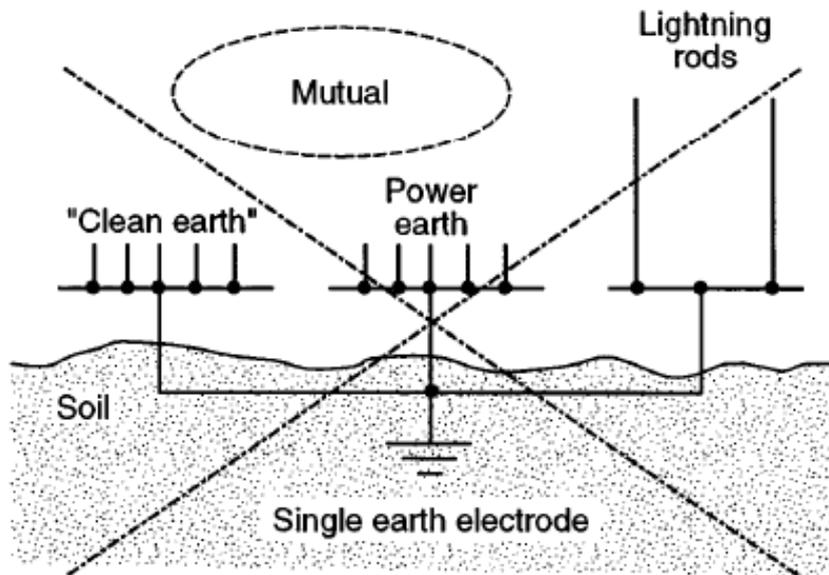


Figura 2.2. El concepto de una única puesta a tierra.
Fuente: IEC 61000-5-2.

Cuando por requerimientos de un edificio existan varias puestas a tierra, todas ellas deben estar interconectadas eléctricamente

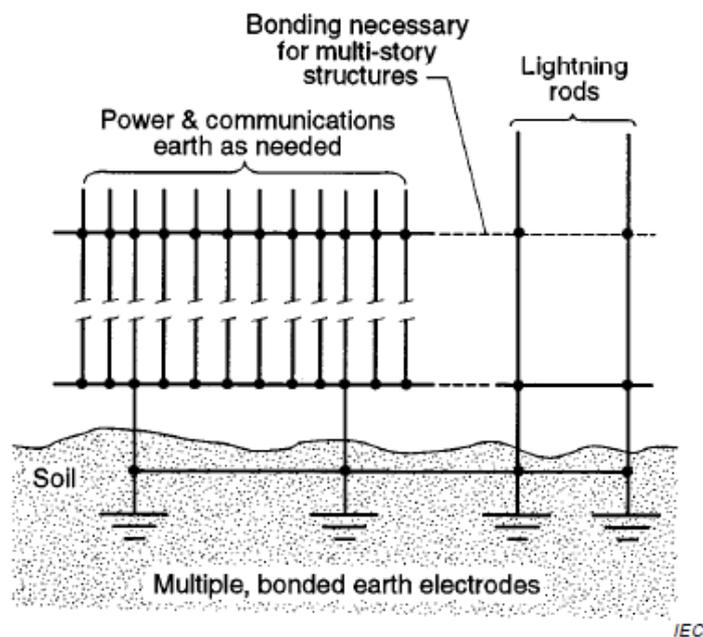


Figura 2.3. Configuración recomendada para la conexión de puestas a tierra.
Fuente: IEC 61000-5-2.

2.2.2. IEEE Std 80-2000.

La norma IEEE Std 80-2000 [22] está enfocada al diseño de mallas de puesta tierra, para subestaciones o para lugares donde se requiera complejos sistemas de puesta a tierra, en el caso de este estudio en redes de distribución donde no se requieren sistemas de esta naturaleza no se toma como base para el diseño, sin embargo la explicación detallada sobre las mediciones de resistividad del terreno así como el modelamiento de las mediciones son base importante para cualquier diseño de puesta a tierra de cualquier complejidad.

2.2.2.1. *Objetivos para el diseño de puesta a tierra.*

Proporcionar un medio para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder ningún límite en el equipo y su operación.

Asegurar que una persona cercana a una instalación eléctrica no se exponga al peligro de un choque eléctrico.

2.2.2.2. *Parámetros que se deben tener en cuenta en el diseño según IEEE-80.*

- a) **La condición geométrica.** El diseño de la malla que se requiera sea cuadrado, rectangular o en forma de L.
- b) **Capa superficial.** Este componente es prenda de garantía para la seguridad de las personas; se puede dejar un espaciamiento de aire, una capa de caucho o una capa de gravilla. En el caso de las subestaciones interiores con piso de concreto, con el fin de cumplir los límites de tensiones de seguridad, luego de instalar los equipos se debe tener en cuenta que sea de alta resistividad (más de $3000\Omega\text{m}$) y baja sensibilidad a los cambios de humedad. También se recomienda tener en cuenta los siguientes criterios:
 - El material proveniente de explotaciones aluviales (ríos o quebradas) conocido como canto redondo presenta diversidad de composición litológica.

- El contenido mínimo de elementos finos o partículas no debe superar el 5% en peso.
 - Al mayor tamaño se pueden manejar mayores valores de tensiones permisibles.
 - El espesor de la capa puede variar entre 10 y 20cm.
- c) **Conductor.** Se acostumbra a emplear como mínimo el calibre 2/0 AWG de cobre de siete hilos, con el fin de mejorar la rigidez mecánica de malla y soportar la corrosión.

2.2.3. IEEE Std 142 – 2007.

La norma IEEE Std. 142-2007 [23] es la Recomendación práctica para el aterramiento de sistemas de potencia industrial y comercial. En esta norma se discute las ventajas y desventajas de la puesta a tierra frente a los sistemas sin conexión a tierra, se proporciona información sobre cómo poner a tierra diferentes sistemas y aparatos eléctricos, tales como motores, interruptores, transformadores, autobuses, cables conductos, estructuras de edificios y equipos portátiles. Describe los fundamentos de la interconexión o sistema de conexión a tierra entre los aparatos eléctricos y las varillas de tierra, tuberías de agua, etc. Se tratan los problemas de electricidad estática, la forma en que se genera, qué procesos pueden producirlo, cómo se mide y qué se debe hacer para prevenir su generación o para drenar las cargas estáticas a tierra para evitar chispas. Se discute la obtención de una conexión de baja resistencia a tierra, el uso de varillas de tierra, las conexiones a las tuberías de agua, etc.

La conexión con la tierra o el sistema de electrodos, tiene que tener una resistencia lo suficientemente baja para ayudar a permitir la operación rápida de los dispositivos de protección de circuito en caso de una falla a tierra, para proveer la seguridad necesaria de choque para el personal que pueda estar en la vecindad de marcos de equipos, armarios, conductores, o de los propios electrodos y para limitar las sobretensiones transitorias.

Sin embargo, las instalaciones con niveles más bajos de corriente de falla a tierra no requieren un valor tan bajo de resistencia de tierra al igual que los sistemas más grandes con mayores niveles de corriente de falla a tierra.

Sistemas con una resistencia de tierra de menos de 1 ohmio pueden obtenerse usando un número de electrodos individuales conectados entre sí. Una resistencia tan baja sólo podrá ser requerida para grandes subestaciones, líneas de transmisión, o estaciones de generación.

Resistencias en el rango de 1-5 ohmios se encuentran generalmente convenientes para edificios de planta industrial e instalaciones comerciales.

El valor 25 ohmios se señala en el Código Eléctrico Nacional se aplica a la resistencia máxima para un solo electrodo hecho. Si se obtiene una resistencia más alta para un solo electrodo, se requiere un segundo (en paralelo) del electrodo. Esto no debe interpretarse en el sentido de que 25 ohmios es un nivel satisfactorio de un sistema de puesta a tierra.

Los ensayos deben ser realizados periódicamente después de la instalación, de manera que se puede determinar si la resistencia se permanece constante o aumenta. Si las pruebas posteriores demuestran que la resistencia está aumentando a un valor no deseado, se deben tomar medidas para reducir la resistencia, ya sea por rehacer las conexiones corroídas, mediante la adición de electrodos, aumentando el contenido de humedad, o por tratamiento químico.

2.2.4. IEEE Std 141 – 1993.

La norma IEEE Std 141 – 1993 [24], es la Recomendación práctica para la distribución de energía eléctrica para plantas Industriales. Esta norma presenta un análisis exhaustivo de las consideraciones básicas de los sistemas eléctricos. Se ofrece orientación en el diseño, la construcción, y la continuidad de un sistema eléctrico para lograr la seguridad de la vida y la preservación de la propiedad; fiabilidad, simplicidad de operación, regulación de la tensión en la utilización de los equipos dentro de los límites de tolerancia en todas las condiciones de carga, el cuidado y el mantenimiento; y flexibilidad para permitir el desarrollo y la expansión. Se hacen recomendaciones con respecto a la planificación del sistema; consideraciones de tensión, protección contra sobretensiones, dispositivos del sistema de protección; cálculos de falla de puesta a tierra; conmutación de potencia, de transformación, y aparatos de control de motor, instrumentos y medidores, conservación de la energía eléctrica, y la estimación de costos.

En el sexto capítulo del IEEE Std 141, describe las consideraciones fundamentales para los cálculos de las corrientes de falla en sistemas de baja tensión. También describe métodos de uso común para realizar los cálculos de la corriente de falla, y, proporciona los datos típicos que se pueden utilizar en estos cálculos.

2.2.5. A manera de conclusión: modelo referencial para el diseño de sistemas de puesta a tierra en baja tensión.

La norma IEC 61000-5-2, sugiere que la mejor solución de sistema de puesta a tierra es una red mallada enterrada debajo o alrededor del edificio o de la planta.

La norma IEEE Std. 80 -2000 es una guía para el diseño de mallas de puesta a tierra en alta tensión. De esta guía se han tomado los criterios de seguridad, diseño y evaluación que garanticen un óptimo sistema de puesta a tierra. Los criterios de seguridad usados tienen que ver principalmente con el cálculo del máximo voltaje de toque y de paso tolerable al ser humano. De los criterios de diseño de una malla de puesta a tierra se toma la selección del modelo de suelo y los criterios del diseño geométrico de la malla; pero no se toma el criterio de dimensionamiento del conductor, debido a que para el cálculo de la corriente de falla de un sistema eléctrico usa parámetros de impedancia de líneas y de torres de transmisión, disponibles solamente en alta tensión. También se hace uso de los criterios de procedimientos y técnicas de evaluación del sistema de puesta a tierra, como son el cálculo de la resistencia de la malla y la comparación de los voltajes de toque y de paso de la malla con los tolerables al cuerpo humano.

El criterio de dimensionamiento del conductor de la malla se tomará de la norma IEEE Std. 141, que describe el cálculo de la corriente de falla de un sistema eléctrico en baja tensión.

Para el diagnóstico de los sistemas de puesta a tierra, se tomará el criterio de la norma IEEE Std. 142, que sugiere que: resistencias de puesta a tierra en el rango de 1-5 ohmios se encuentran generalmente convenientes para edificios de planta industrial e instalaciones comerciales. La norma también recomienda que se deba monitorear periódicamente la puesta a tierra, realizando pruebas o mediciones para determinar si la resistencia permanece constante o aumenta.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA BAJA TENSIÓN

3.1. Metodología de diseño de malla de puesta a tierra.

En esta sección se propone una metodología de diseño de puesta a tierra para baja tensión. La elaboración de la metodología se basa en el modelo referencial descrito en el capítulo 2. Se propone un diagrama de flujo y finalmente un ejemplo para una mayor comprensión de la metodología.

Antes de comenzar con el estudio de la Metodología, es importante tener claro los siguientes conceptos:

Voltaje de Toque.- Voltaje que experimenta entre los pies y sus manos o su cuerpo una persona que toque alguna estructura metálica dentro de los predios de una subestación.

- Voltaje de Paso.- Es la diferencia de potencial en la superficie terrestre que experimenta una persona a una distancia de un metro con el pie sin tener contacto con cualquier objeto aterrizado.
- Corriente de cortocircuito.- Se entiende por intensidad de cortocircuito " I_{cc} ", al valor de corriente obtenido al interponerse una resistencia prácticamente nula, entre varios conductores que están sometidos a una diferencia de potencial cualquiera.
- Cortocircuito Trifásico.- Se puede considerar como el caso más desfavorable. Se produce cuando se ponen en contacto las 3 fases de una instalación.
- Potencia de cortocircuito.- Es el aporte de todas las fuentes de generación de la red en el punto de suministro si allí se produjera un cortocircuito. Es un dato a ser aportado por la compañía prestataria. Se expresa en MVA.
- Factor de decremento.- Es un factor de ajuste que se usa conjuntamente con los parámetros de la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos de aterrizaje orientados con seguridad. Determina el equivalente eficaz de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada, t_f , tomado en cuenta para el efecto del "dc offset" inicial y su atenuación durante la falla.

- Corriente de falla asimétrica efectiva.- Es el valor eficaz de la onda de corriente asimétrica, integrada sobre el intervalo de duración de la falla.
- Factor de división de la corriente de falla.- Es un factor que representa al inverso de la relación de la corriente simétrica de falla a la parte de la corriente que fluye entre la rejilla de aterrizaje y en los alrededores del planeta Tierra.
- Aumento del potencial de tierra (GPR).- Es el máximo potencial eléctrico que una subestación de rejilla aterrizada puede alcanzar, relativo a una distancia de un punto aterrizado que se asume como el potencial de tierra remoto. Este voltaje, GPR, es igual a los máximos tiempos de corriente de rejilla y resistencia de rejilla.
- Relación X/R.- Es la relación entre la reactancia y la resistencia del sistema. Esto es un indicador de la disminución en el valor de cualquier compensación de DC. Un valor grande de X/R corresponde a una constante de tiempo grande y una razón baja de caída.

3.2. Procedimiento de diseño.

Hay dos objetivos principales de diseño que deben alcanzarse mediante cualquier sistema de puesta a tierra, así como bajo las condiciones normales de fallo. Estos objetivos son:

- Proporcionar los medios para disipar las corrientes eléctricas hacia tierra sin exceder los límites de operación y equipo.
- Para asegurar que una persona en las proximidades de las instalaciones de puesta a tierra no esté expuesta al peligro de una descarga eléctrica crítica.

Los procedimientos de diseño descritos a continuación tienen por objeto lograr la seguridad de las tensiones de paso y de toque dentro de un edificio. Debido a que la tensión de la malla es generalmente la peor tensión de toque posible dentro del edificio (excluyendo potenciales transferidos), la tensión de malla será utilizada como la base de este procedimiento de diseño.

A continuación se describe cada paso del procedimiento para el diseño de mallas de puesta a tierra:

3.2.1. Determinar el área y la resistividad del suelo sobre el que se diseñará la malla de puesta a tierra.

Para determinar el área del suelo sobre el que se diseñará la malla de puesta a tierra se pueden realizar mediciones, o en su defecto se puede estimar mediante un plano de la localización general de la zona.

Una prueba de resistividad del suelo determinará el perfil de resistividad del suelo y el modelo del suelo necesario. Los modelos más utilizados de resistividad del suelo son el modelo de suelo uniforme y el modelo de suelo de dos capas. Un modelo de suelo uniforme debe ser usado sólo cuando hay una variación moderada de resistividad aparente. En las condiciones del suelo homogéneos, que rara vez se producen en la práctica, el modelo de suelo uniforme pueda ser razonablemente preciso. Una representación más precisa de las condiciones reales del suelo se puede obtener mediante el uso de un modelo de dos capas. El modelo de dos capas consiste en una capa superior de profundidad finita y con diferente resistividad de una capa inferior de espesor infinito.

El método de Sunde, descrito en la norma IEEE Std 80, es utilizado para aproximar un modelo de suelo de dos capas. Este gráfico se basa en la prueba de cuatro puntas de Wenner.

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen mediante la inspección de las mediciones de resistividad. Sólo la profundidad de la capa superior se obtiene método gráfico de Sunde, de la siguiente manera:

- a) Trazar la curva de resistividad aparente ρ_a el eje y vs espacio entre las puntas de medición en el eje x (Ver Figura. 3.1).
- b) Estimar ρ_1 y ρ_2 partir de la gráfica representa en a). El valor de ρ_a correspondiente a un espaciado más pequeño es ρ_1 y para un espaciado más grande es ρ_2 . Extender el gráfico de resistividad aparente en ambos extremos para obtener estos valores extremos de resistividad si los datos de campo son insuficientes.
- c) Determinar ρ_2/ρ_1 y seleccionar una curva en el gráfico de la Figura 3.2, que coincide estrechamente, o interpolar y dibujar una nueva curva en el gráfico.

- d) Seleccionar el valor en el eje y de ρ_a/ρ_1 dentro de la región inclinada de la curva ρ_2/ρ_1 de la figura 3.2.
- e) Leer el valor correspondiente de a/h en el eje x .
- f) Calcular ρ_a multiplicando el valor seleccionado, ρ_a/ρ_1 , en (d) por ρ_1 .
- g) Leer la correspondiente distancia entre puntas a partir del gráfico de la resistividad aparente trazado en a).
- h) Calcular h , la profundidad de la capa superior, usando la separación de prueba apropiada, a .

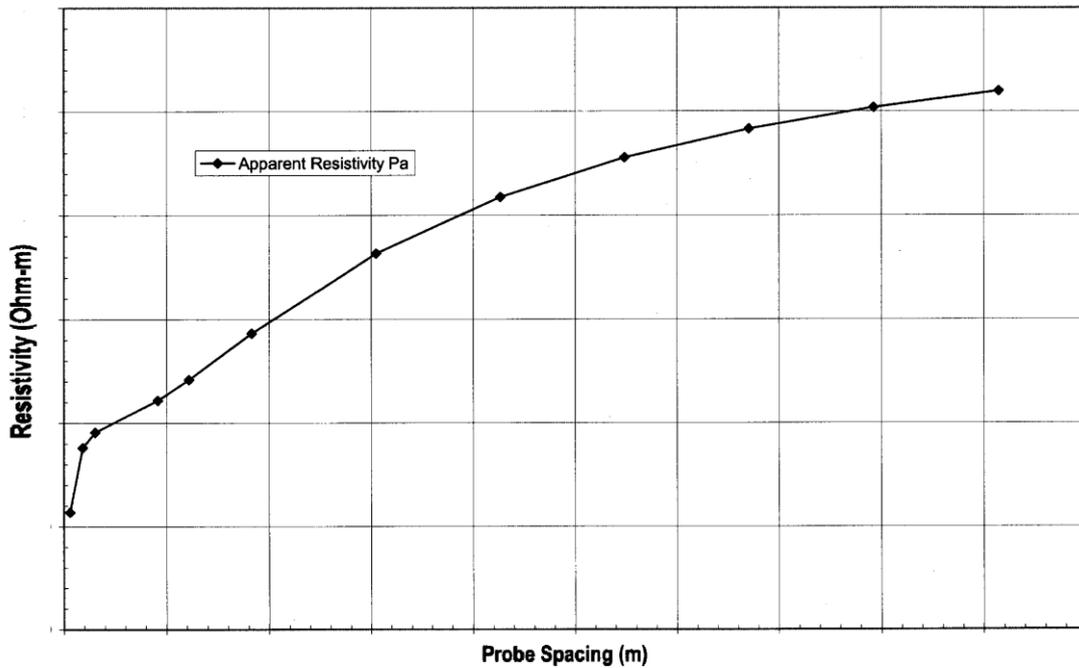


Figura 3.1. Curva de resistividad aparente versus espaciamiento entre las puntas de medición.

Fuente: IEEE Std-80.

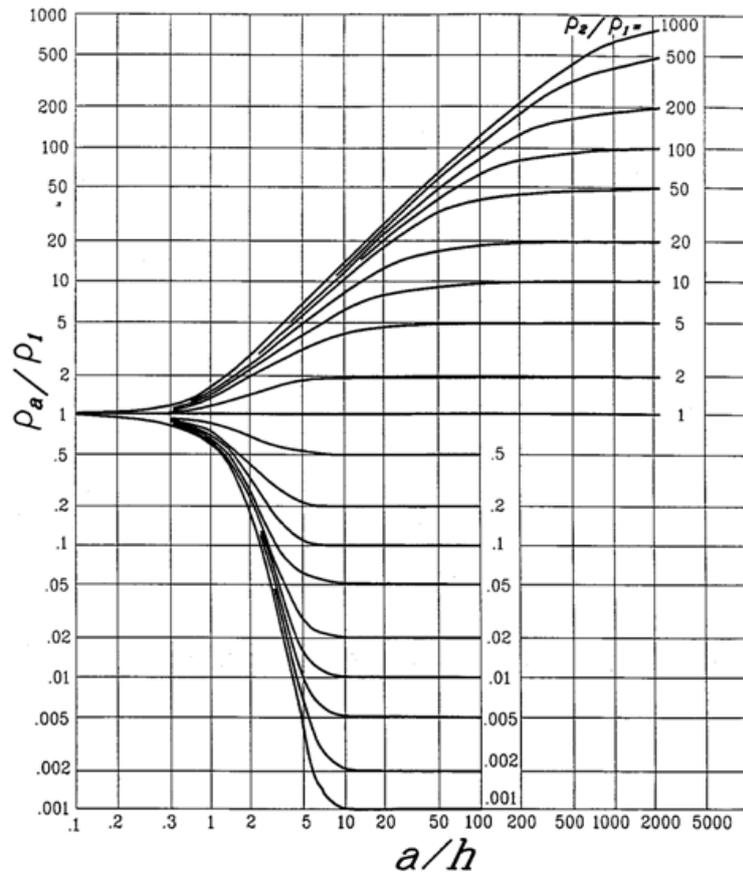


Figura 3.2. Método gráfico de Sunde para calcular la profundidad de la capa superficial.

Fuente: IEEE Std-80.

La norma IEEE Std 80 sugiere que la primera capa del terreno en donde se instale la malla de puesta a tierra tenga una resistividad elevada, esta capa es una superficie cubierta por un material, por lo general alrededor de 0,08 a 0,15 m de profundidad, ésta capa es muy útil en el retraso de la evaporación de la humedad y, por lo tanto, limita el secado de las capas inferiores durante períodos prolongados de tiempo seco. El intervalo de valores de resistividad de la capa de material de la superficie depende de muchos factores, algunos de los cuales son los tipos de piedra, tamaño, condición de la piedra (es decir, limpia o con multas), la cantidad y el tipo de contenido de humedad, contaminación atmosférica, etc.

Por lo tanto, el material de la superficie sometida a rocío de agua puede tener sustancialmente menor resistencia que el material de la superficie utilizada en ambientes áridos. Como se indica en la Tabla 3.1, las condiciones locales, el tamaño y el tipo de piedra, etc, pueden afectar al valor de la resistividad, también se muestran los valores típicos de resistividad para diferentes tipos de material de superficie.

Tabla 3.1.

Valores de resistividad en típicos suelos superficiales

Nro.	Descripción del material de la superficie	La resistividad de la muestra Ωm	
		Seco	Mojado
1	Granito triturado fino	140×10^6	1300
2	Granito triturado fino (0,04 m)	4000	1200
3	Granito fino (desde 0,02 hasta 0,025 m)	-	6513
4	Granito lavado (0,025 a 0,05 m)	$1,5 \times 10^6$ a $4,5 \times 10^6$	5000
5	Granito lavado (0,05-0,1 m)	$2,6 \times 10^6$ a 3×10^6	10 000
6	Piedra caliza lavada	7×10^6	2000 - 3000
7	Granito lavado, similar a la grava (0.02 m)	2×10^6	10000
8	Granito lavado, similar a la gravilla.	40×10^6	5000
9	Asfalto	2×10^6 a 30×10^6	10000 a 6×10^6
10	Concreto	1×10^6 a 1×10^9	21 a 100
11	Piedra picada (capa de 15 cm)	-	3000

Fuente: IEEE Std-80, http://www.cib.espol.edu.ec/digipath/d_tesis_pdf/d-6611.pdf

Para el diseño de las mallas de puesta a tierra en cada edificio del campus UTPL se considera una resistividad de la superficie del terreno de 3000 Ωm , que corresponde a la piedra picada húmeda con una capa de 15 cm de profundidad (altura de la capa superficial), que es el valor que tiene este tipo de suelo en el peor escenario [25].

Por lo tanto se considera que el terreno en donde se instalará la malla tendrá 2 capas: la primera se trata de una superficie cubierta por piedra picada con una resistividad elevada y la segunda capa, o capa inferior, es el valor ρ_1 , calculado mediante el método de Sunde.

La resistencia de la red y los gradientes de tensión dentro de un sistema son directamente dependientes de la resistividad del suelo (capa inferior). En la práctica la resistividad del suelo varía tanto horizontal como verticalmente, por lo que se deben recopilar datos suficientes de la resistencia del suelo para luego calcular la resistividad de ésta capa por el método de Wenner, descrito en la sección 1.7.5.1.

3.2.2. Determinar el tamaño del conductor (sección).

El tamaño del conductor se determina por la siguiente ecuación:

$$A_{kcmil} = I_{cc-asim} K_f \sqrt{t_c} \quad (3.1)$$

En donde:

A_{kcmil} : es el área del conductor en kcmil. Recordar que 1 kcmil es 0.5067 mm². En la Tabla 3.2 se muestran los calibres comerciales de los conductores.

$I_{cc-asim}$: es la corriente de cortocircuito asimétrica en KA.

tc : es el tiempo de duración de falla de corriente. La norma IEEE std-80 recomienda que sea igual al tiempo de duración del choque t_s .

Kf : es la constante de la Tabla 3.3 para el material del conductor a diversos valores de T_m (temperatura de fusión) y el uso de la temperatura ambiente (T_a) de 40 ° C

Tabla 3.2.
Calibre de conductores en diferentes estándares

Calibre del Conductor	Área		Radio del conductor	Diámetro Exterior	Peso Aproximado
	kcmil	mm ²	mm	mm	kg/km
1/0	105,6	53,49	4,13	9,35	485
2/0	133,1	67,43	4,63	10,5	611
3/0	167,8	85,01	5,20	11,8	771
4/0	211,6	107,22	5,84	13,3	972
250	250	127	6,36	15,2	1149
300	300	152	6,96	16,7	1378
350	350	177	7,51	18	1610
400	400	203	8,04	18,5	1838
450	450	228	8,52	19,6	2067
500	500	253	8,97	20,6	2297
550	550	279	9,42	21,7	2527
600	600	304	9,84	22,6	2757
650	650	329	10,23	23,6	2986
700	700	355	10,63	24,4	3216
750	750	380	11,00	25,3	3446

Fuente: IEEE Std. 80. Guide for safety in AC substation grounding.

Tabla 3.3.
Constante k_f para diferentes tipos de material del conductor

Material	Conductividad (%)	T_m (°C)	K_f
Cobre recocido suave estirado	100	1083	7
Cobre, estirado en frío comercial	97	1084	7,06
Cobre, estirado en frío comercial	97	250	11,78
Alambre de acero revestido de cobre	40	1084	10,45
Alambre de acero revestido de cobre	30	1084	12,06
Varilla de acero revestido de cobre	20	1084	14,64
Aluminio CE Grado	61	657	12,12
Aleación de aluminio 5005	53,5	652	12,41
Aleación de aluminio 6201	52,5	654	12,47

Alambre de acero revestido de aluminio	20,3	657	17,2
Acero 1020	10,8	1510	15,95

Fuente: IEEE Std. 80. Guide for safety in AC substation grounding.

Para la realización del cálculo de la corriente de cortocircuito asimétrica se sigue el procedimiento de norma IEEE Std-141, que indica que es igual a la corriente de cortocircuito máxima en el secundario multiplicada por un factor de asimetría.

$$I_{cc-max-sec} = \frac{P \times 1000}{\sqrt{3} \frac{Z}{100} V_{Sec}} \quad (3.2)$$

$$I_{cc-asim} = I_{cc-max-sec} \times F_{asim} \quad (3.3)$$

Siendo:

P: Potencia del transformador, en kVA. Dato del transformador.

Vsec: Tensión secundaria en voltios. Dato del transformador.

Z: Tensión porcentual de cortocircuito del transformador. El NEC y el IRAM 2250 recomiendan que éste valor sea de 3.5 para transformadores trifásicos de 15 kVA a 150 kVA y 4 para transformadores de 150 kVA a 600 kVA.

I_{cc-max-sec}: Intensidad de cortocircuito secundaria, en amperios.

I_{cc-asim}: Intensidad de cortocircuito asimétrica, en amperios.

F_{asim}: Factor de asimetría. La norma IEEE Std 80 sugiere que este valor sea 1,25.

La sección de conductor mínima que las normas nacionales e internacionales recomiendan para los conductores de puesta a tierra es 2/0 AWG, con sección de 133 kcmil, que tiene un radio de 4,63mm.

3.2.3. Determinar los voltajes de toque y de paso tolerables.

En el caso de la tensión de paso, el valor máximo tolerable está dado por las siguientes expresiones:

Para una persona de 50 Kg. de peso:

$$E_{s50} = (1\ 000 + 6C_S \cdot \rho_S) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (3.4)$$

Para una persona de 70 Kg. de peso:

$$E_{s70} = (1\,000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.5)$$

En el caso de la tensión de contacto, el valor máximo tolerable está dado por las siguientes expresiones:

Para una persona de 50 Kg. de peso:

$$E_{t50} = (1\,000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (3.6)$$

Para una persona de 70 Kg. de peso:

$$E_{t70} = (1\,000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.7)$$

Dónde:

C_s : 1 si no se utiliza una capa superficial de protección (como gravilla, concreto, u otro material artificial), en otro caso, este factor se determina a continuación.

ρ_s : Resistividad de la capa superficial, en Ωm . Si no se utiliza un material en la superficie, este valor corresponde a la resistividad de la primera capa del terreno.

t_s : Tiempo de duración de la falla, en segundos. Según la norma IEEE std-80 el rango de tiempo que resulta de una corriente admisible para el cuerpo es: $0,06\text{s} \geq t_s \geq 0,7\text{s}$.

La expresión que determina el factor C_s , está dada por:

$$C_s = \frac{1}{0,96} \left[1 + 2 \sum_{t=1}^{\infty} \frac{k^t}{\sqrt{1 + \left(\frac{2ih_s}{0,08}\right)^2}} \right] \quad (3.8)$$

Dónde:

k : Factor de reflexión $k = (\rho_1 - \rho_s)/(\rho_1 + \rho_s)$.

ρ_s : Resistividad de la capa superficial, en Ωm .

ρ_1 : Resistividad del primer estrato, en Ωm .

h_s : Espesor de la capa superficial, en m.

Una expresión simplificada de la ecuación anterior es la siguiente:

$$C_s = 1 - 0,09 \frac{\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} \quad (3.9)$$

3.2.4. Determinar el diseño preliminar.

Las estimaciones iniciales de la separación del conductor y ubicaciones varilla de tierra deben basarse en la máxima corriente de la malla actual y el área que está siendo conectado a tierra.

Se debe suponer un diseño preliminar determinando los siguientes valores:

- a) Área de la malla: para optimizar se aprovecha el área total de la superficie
- b) El espaciamiento D de los conductores paralelos en la malla es igual, de modo que se forme una cuadrícula o una rejilla. IEEE std-80 recomienda que el espaciamiento sea en el rango de 3m a 15m.
- c) Profundidad de entierro de la malla: IEEE Std-80 recomienda que las profundidades típicas de la malla sean desde 0,5m a 1,5m.
- d) Sumar la longitud total del conductor enterrado (L_c y L_T)

L_c : Longitud total de conductor de la malla horizontal, en metros.

L_T : Longitud total del conductor de puesta a tierra del sistema, incluyendo la malla horizontal y las varillas de tierra, en metros

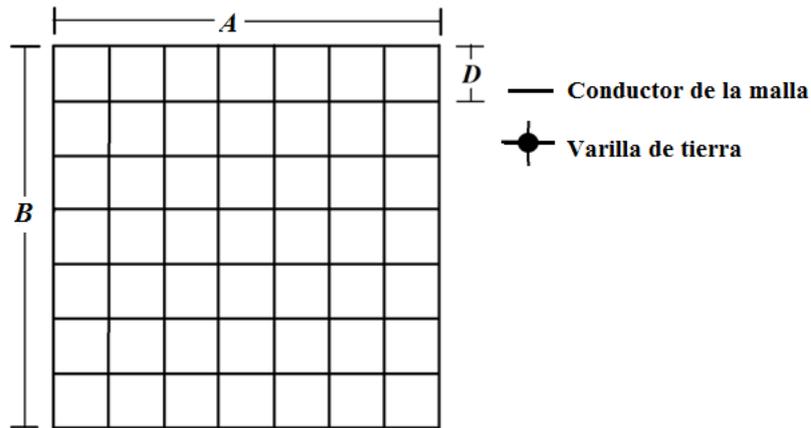


Figura 3.3. Diseño preliminar de malla de puesta a tierra.

Fuente: Elaborado por los autores

3.2.5. Determinar la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra.

Para el cálculo de la resistencia de la malla, se pueden utilizar dos expresiones, dependiendo si se usa en terreno homogéneo o en un terreno de dos estratos.

Para el caso de terreno homogéneo, se utiliza la expresión de Sverak:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20S}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/S}} \right) \right] \quad (3.10)$$

Dónde:

- ρ : Resistividad del terreno, en Ω -m.
- L_T : Longitud total del conductor que forma la malla, en m.
- S : Área de la malla.
- h : profundidad de enterramiento de la malla.

En el caso de un terreno bi-estratificado, se utiliza la expresión de Schwartz:

$$R = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (3.11)$$

Dónde:

- R_1 : Resistencia de los conductores que forman la malla, en ohm.
- R_2 : Resistencia de las barras conectadas a la malla, en ohm.
- R_m : Resistencia mutua entre los conductores de la malla R_1 y las barras R_2 en ohm.

La resistencia de los conductores que forman la malla, está dada por la siguiente expresión:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{S}} - K_2 \right] \quad (3.12)$$

Dónde:

- ρ : Resistividad del terreno, en Ω -m.
- L_c : Longitud total de conductor de la malla horizontal, en metros.
- a' : es $\sqrt{a \cdot 2h}$ para conductores enterrados a una profundidad h en metros, ó “a” para conductores en la superficie de la tierra en metros
- $2a$: Diámetro del conductor, en m.
- S : Área cubierta por la malla, en m^2 .
- K_1, K_2 : Coeficientes relacionados con la geometría de la malla.

$$K_1 = 1,43 - \frac{2,3h}{\sqrt{S}} - 0,44 \frac{A}{B} \quad (3.13)$$

$$K_2 = 5,5 - \frac{8h}{\sqrt{S}} + \left(0,15 - \frac{h}{\sqrt{S}} \right) \frac{A}{B} \quad (3.14)$$

- A : Lado mayor de la malla, en metros.
- B : Lado menor de la malla, en metros.

La resistencia de las barras conectadas a la malla, está dada por la siguiente expresión:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{S}} (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (3.15)$$

Dónde:

- L_r : Longitud promedio de las barras, en m.
- $2b$: Diámetro de las barras, en m.
- n_r : Número de barras ubicadas en el área cubierta por la malla.

La resistencia mutua entre los conductores de la malla y las barras, está dada por la siguiente expresión:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{4L_c}{L_f} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{S}} - K_2 + 1 \right] \quad (3.16)$$

3.2.6. Determinar la corriente de la malla.

La máxima corriente de la malla está determinado por:

$$I_G = 3 \cdot I_{cc-max-prim} \cdot D_f \cdot S_f \quad (3.17)$$

$I_{cc-max-prim}$: es la corriente máxima de cortocircuito en el primario.

D_f : es el factor de decremento para toda la duración de la falla, dado en s

S_f : es el factor de división de la corriente de falla

$$I_{cc-max-prim} = I_{cc-max-sec} \cdot \frac{\sqrt{3}V_{sec}}{V_{prim}} \quad (3.18)$$

V_{prim} : Tensión primaria del transformador en voltios. Dato del transformador.

V_{sec} : Tensión secundaria del transformador en voltios. Dato del transformador.

Los valores típicos del factor de decremento, asumiendo una relación $X/R = 10$ (potencia de transformadores relativamente baja), se muestran en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4.

Valores típicos del factor de decremento para un $X/R=10$

Segundos	Ciclos a 60 Hz	Df
0,00833	0,5	1,576
0,05	3	1,232
0,10	6	1,125
0,20	12	1,064
0,30	18	1,043

Fuente: IEEE Std. 80. Guide for safety in AC substation grounding.

Se considera que al ocurrir una falla a tierra, los interruptores operan eliminando la falla del sistema en el menor tiempo posible, en este caso se ha tomado un tiempo de falla $t_f = 0.5$, con lo que se obtiene un $D_f = 1,043$.

El factor de división de corriente es necesario para evitar el sobredimensionamiento del sistema de puesta a tierra, para usar sólo una fracción de la corriente de fallo total. Los valores típicos de S_f van en el rango de 0.2 a 0.6. Asumiendo el peor escenario se tomará un factor de división de corriente de 0.6.

3.2.7. Determinar la máxima potencia de tierra (GPR)

Si la máxima elevación de potencial, GPR por sus siglas en inglés, del diseño preliminar está por debajo del voltaje de paso tolerable, no se necesitará un análisis adicional. Solamente será necesario dejar conductores adicionales para dar acceso a las terminales de aterrizaje de los equipos. El GPR, es el producto de la corriente y la resistencia de la malla, y se lo debe comparar con la tensión de contacto tolerable:

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (3.19)$$

$$I_G R_G < E_{touch}$$

Si la tensión de contacto tolerable es menor que el GPR, la malla propuesta cumple con las condiciones mínimas de diseño. De no ser así, se debe continuar con la comparación de los voltajes de toque y de paso de la malla con los voltajes de toque y de paso tolerables para el cuerpo humano.

3.2.8. Determinar el voltaje de toque y de paso de la malla.

El voltaje de toque de la malla se obtiene del producto del factor geométrico k_m , el factor de corrección k_i , la resistividad del suelo y la corriente por unidad de longitud de conductor I_G/L_M .

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (3.20)$$

Dónde:

- ρ : Resistividad del suelo
- K_m : Factor geométrico
- K_i : Factor de corrección
- I_G : Corriente de la malla
- L_M : Longitud del conductor de la malla

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 h d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 h d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n - 1)} \right) \right] \quad (3.21)$$

Dónde:

- D : Distancia entre conductores paralelos, en m.

- h : Profundidad de enterramiento de la malla, en m.
d : Diámetro del conductor de la malla, en m.
n : factor de conductores paralelos

Para mallas con barras a lo largo del perímetro o para mallas con barras en las esquinas o barras en el perímetro y en las esquinas, se tiene que:

$$K_{ii} = 1$$

Para mallas sin barras o mallas con pocas barras, pero no ubicadas en el perímetro ni en las esquinas, se tiene que:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (3.22)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}; h_0 = 1 \text{ m} \quad (3.23)$$

Para que las ecuaciones desarrolladas sean aplicables tanto a mallas rectangulares como a mallas con forma irregular, el número de conductores paralelos en una malla se compone de cuatro factores de forma, los que tienen las siguientes expresiones:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (3.24)$$

Donde n_a , n_b , n_c y n_d están dadas por las expresiones 25, 26, 27 y 28 respectivamente:

$$n_a = \frac{2 L_C}{L_P} \quad (3.25)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{S}}} \quad (3.26)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{S} \right]^{L_x L_y} \quad (3.27)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (3.28)$$

Dónde:

- L_c : Longitud total de conductor de la malla horizontal, en m.
- L_p : Longitud perimetral de la malla, en m.
- S : Area cubierta por la malla, en m².
- L_x : Longitud máxima de la malla en la dirección x, en m.
- L_y : Longitud máxima de la malla en la dirección y, en m.
- D_m : Distancia máxima entre dos puntos de la malla, en m.

En el caso de mallas rectangulares o cuadradas, se tiene que:

- $n_b = 1$ para mallas cuadradas.
- $n_c = 1$ para mallas cuadradas y rectangulares.
- $n_d = 1$ para mallas cuadradas, rectangulares y de forma "L".

El factor de corrección K_i , se define como:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (3.29)$$

Para mallas sin barras, o pocas barras distribuidas a través de la malla, pero ninguna ubicada en las esquinas o perímetro, se define la longitud efectiva enterrada L_M , como:

$$L_M = L_c + L_R \quad (3.30)$$

Donde L_R es la longitud total de las barras conectadas, en m.

Para mallas con barras en las esquinas y/o en el perímetro, la longitud efectiva enterrada L_M se define como:

$$L_M = L_c + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (3.31)$$

Donde L_r es la longitud de cada barra, en m.

Tensión de paso de la malla

La tensión de paso de la malla se obtiene del producto del factor geométrico K_S , el factor de corrección K_i , la resistividad del suelo y la corriente por unidad de longitud de conductor I_G/L_S :

$$E_S = \frac{\rho \cdot K_S \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad (3.32)$$

Dónde:

- ρ : Resistividad del suelo
- K_S : Factor geométrico
- K_i : Factor de corrección
- I_G : Corriente de la malla
- L_S : Longitud del conductor de la malla

El factor geométrico K_S , se define como:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (3.33)$$

Para mallas con barras o sin barras, se define la longitud efectiva enterrada L_S , como:

$$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (3.34)$$

3.2.9. Comparar el voltaje de toque de la malla con el voltaje de toque tolerable.

Si el voltaje de toque de la malla calculado está por debajo del voltaje de toque tolerado, continuar con el diseño. Si el voltaje de toque de la malla calculado es mayor que el voltaje de toque tolerable, el diseño preliminar deberá ser modificado y realizar los cálculos correspondientes tomando en cuenta los cambios que se han hecho (ver Paso 11).

3.2.10. Comparar el voltaje de paso de la malla con el voltaje de paso tolerable.

Si el voltaje de paso y el voltaje de toque calculados están por debajo de los voltajes tolerables, la malla de puesta a tierra cumple con las condiciones mínimas de diseño. Si no cumple estas condiciones el diseño preliminar se debe revisar.

3.2.11. Modificar el diseño.

Si se exceden los límites del voltaje de toque ó del voltaje de paso tolerables, se requerirá de una revisión del diseño de la malla.

Si la malla no cumple con las condiciones mínimas de diseño se debe aumentar la profundidad de enterramiento de la malla, o aumentar la longitud total del conductor ya sea añadiendo conductores a la malla (aumentar las rejillas) o añadir barras verticales.

Se deben añadir barras verticales, de la siguiente manera:

- Añadir barras verticales en las esquinas de la malla (Ver Figura. 3.4)
- De no dar resultado, añadir barras paulatinamente en las uniones del perímetro de la malla, en forma proporcional a cada lado (Ver Figura. 3.5).
- De no dar resultado añadir barras en todas las uniones del perímetro de la malla (Ver Figura. 3.6).

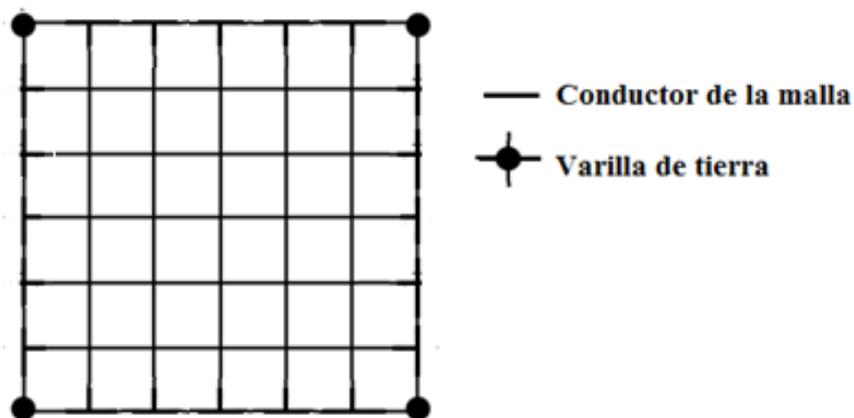


Figura 3.4. Malla de sistema de puesta a tierra con barras verticales en las esquinas.

Fuente: Elaborado por los autores

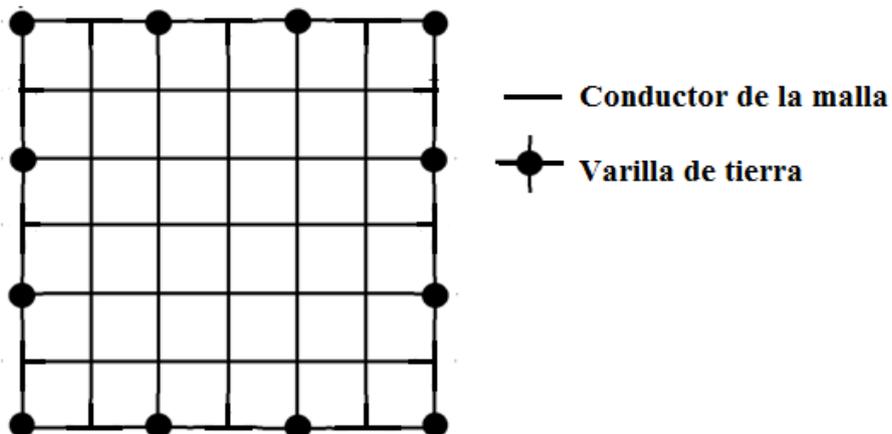


Figura 3.5. Malla de sistema de puesta a tierra con barras verticales en algunas uniones del perímetro.

Fuente: Elaborado por los autores

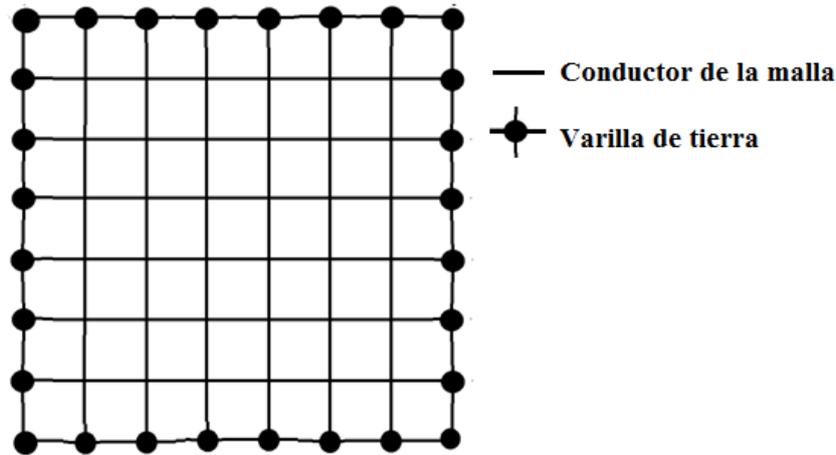


Figura 3.6. Malla de sistema de puesta a tierra con barras verticales en el perímetro.

Fuente: Elaborado por los autores

3.2.12. Proporcionar el diseño detallado.

Proporcionar los valores y parámetros del diseño de la malla:

- Área de la malla
- Diámetro del conductor
- Espaciamiento entre conductores paralelos
- Profundidad de enterramiento de la malla
- Longitud efectiva de la malla
- Longitud de la malla horizontal
- Longitud de las barras verticales
- Número de barras verticales
- Diagrama de la malla de puesta a tierra.

3.3. Diagrama de flujo de diseño de malla de puesta a tierra.

El diagrama de bloques de la Figura 3.7 ilustra la secuencia de pasos para el diseño de la malla de tierra. Los parámetros que se muestran en el diagrama de bloques se identifican en la Tabla 3.5.

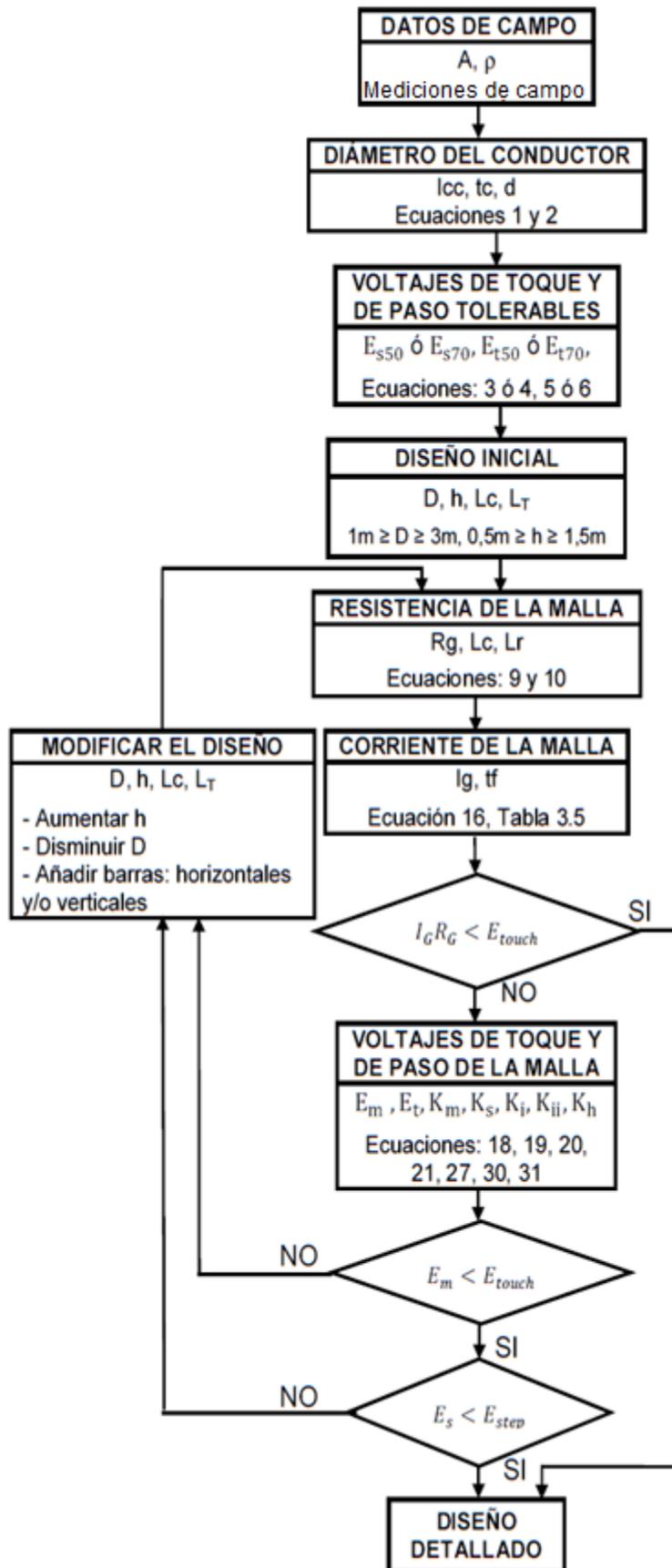


Figura 3.7. Diagrama de bloques de la secuencia de pasos para el diseño de la malla de puesta a tierra.
Fuente: Elaborado por los autores.

Tabla 3.5.

Parámetros de diseño del procedimiento de diseño de la malla de puesta a tierra

Símbolo	Descripción	Ecuación
ρ	Resistividad del suelo, Ωm	Medir
ρ_s	Resistividad de la capa superficial, Ωm	3000 Ωm
a	Radio del conductor de la malla, m	$d/2$
a'	$\sqrt{a \cdot 2h}$ → conductores enterrados a profundidad h, m "a" → para conductores en la superficie de la tierra, m	$\sqrt{a \cdot 2h}$ ó a
C_s	Factor de reducción de la capa superficial	Ecuación 3.9
d	Diámetro del conductor de la malla, m	Ecuación 3.1
D	Espaciamiento entre conductores paralelos, m	$3\text{m} \geq D \geq 15\text{m}$
D_f	Factor de decremento para determinar I_G	1,043
E_m	Tensión de toque de la malla, V	Ecuación 3.20
E_s	Tensión de paso de la malla, V	Ecuación 3.32
E_{step50}	Tensión de paso tolerable para el ser humano con un peso corporal de 50 kg, V	Ecuación 3.4
E_{step70}	Tensión de paso tolerable para el ser humano con un peso corporal de 70 kg, V	Ecuación 3.5
$E_{touch50}$	Tensión de toque tolerable para el ser humano con un peso corporal de 50 kg, V	Ecuación 3.6
$E_{touch70}$	Tensión de toque tolerable para el ser humano con un peso corporal de 70 kg, V	Ecuación 3.7
F_{asim}	Factor de asimetría de corriente alterna.	1,25
h	Profundidad de enterramiento de la malla de tierra, m	$0,5\text{m} \geq h \geq 1,5\text{m}$
h_s	Grosor de la capa de superficie, m	0,15 m
$I_{cc-max-pri}$	Intensidad de cortocircuito primaria	Ecuación 3.18
$I_{cc-max-sec}$	Intensidad de cortocircuito secundaria	Ecuación 3.2
$I_{cc-asim}$	Intensidad de cortocircuito asimétrica	Ecuación 3.3
I_G	La máxima corriente de la malla, kA	Ecuación 3.17
K_h	Factor de ponderación correctiva que enfatiza los efectos de la profundidad de la red	Ecuación 3.23
K_i	Factor de corrección para la geometría de la malla	Ecuación 3.29
K_{ii}	Factor de ponderación correctiva que se ajusta a los efectos de los conductores internos en la malla	Ecuación 3.22
K_m	Factor de espaciamiento para el voltaje de malla	Ecuación 3.21
K_s	Factor de espaciamiento para el voltaje de paso	Ecuación 3.33
L_c	Longitud total de conductor de la malla horizontal, en m.	$\sum L_x + \sum L_y$
L_M	Longitud efectiva $L_c + L_R$ para la tensión de malla, m	$L_c + L_R$
L_R	Longitud total de varillas de tierra, m	$\sum L_r$
L_r	Longitud de cada varilla de tierra, m	$L_r \geq 1,5\text{ m}$
L_S	Longitud efectiva $L_c + L_R$ para la tensión de paso, m	$L_c + L_R$
L_x	Longitud máxima del conductor de la malla en la dirección x, m	A

L_y	Longitud máxima del conductor de la malla en la dirección x, m	B
n	Factor geométrico compuesto de los factores n_a, n_b, n_c, n_d	Ecuación 3.24
n_r	Número de barras colocadas en el área A	$\sum r$
P	Potencia del transformador	Dato del transformador
R_g	Resistencia del sistema de puesta a tierra, Ω	Ecuación: 3.10 ó 3.11
S	Área total delimitada por malla de tierra, m^2	Medir
S_f	Factor de división de corriente	$0,2 \geq S_f \geq 0,6$
t_s	Duración de choque para determinar la corriente permitida por el cuerpo, s	$0,06s \geq t_s \geq 0,7s$
t_c	Duración de la corriente de falla para dimensionamiento del conductor de tierra, s	$t_c = t_s$
t_f	Duración de la corriente de falla para determinar el factor de decremento, s	$t_f = t_s$
Z	Tensión porcentual de cortocircuito	Para transformadores de 15 a 150 kVA
		Para transformadores de 150 a 600 kVA
		3.5
		4

Fuente: Elaborado por los autores.

3.4. Ejemplo de diseño de puesta a tierra.

A manera de ejemplo se diseñará una malla de puesta a tierra para el edificio de Unidades productivas de la UTPL, cuyo transformador tiene una capacidad de 100 kVA y con una relación de transformación de 13.200 - 220/127 Volts.

3.4.1. Determinar el área y la resistividad del suelo sobre el que se diseñará la malla de puesta a tierra.

Se estima un área de 6m x 3m.

$$S = 6m * 3m$$

$$S = 18 m^2$$

Resistividad superficial: De la sección 3.2.1, se tiene que el valor de la resistividad superficial es de 3000 Ωm . Así mismo se tiene que la altura de la capa superficial es de 15 cm.

Se va a suponer un valor de la resistividad de la primera capa del suelo en el edificio de Unidades productivas de 30,14 $\Omega.m$.

3.4.2. Determinar el tamaño del conductor (sección).

$K_f = 7,06$ Valor de la constante que pertenece al cobre estirado al frío (comercial)

$t_c = 0,5s$ Valor elegido por los autores para la duración de la corriente de falla en el SPT, por recomendación de la Norma IEEE-80 nos dice que dicho valor sea igual a la duración de la corriente de falla del sistema t_f

$$A_{kcmil} = I_{cc} K_f \sqrt{t_c}$$

Con las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3 se pueden calcular la sección mínima del conductor, partiendo de los siguientes datos:

- $K_f = 7,06$
- $t_c = 0,5 s$
- $P = 100 \text{ kVA}$
- $V_{prim} = 13200 \text{ V}$
- $V_{sec} = 220 \text{ V}$
- $Z = 3.5$
- $F_{asim} = 1,25$

$$I_{cc-max-sec} = \frac{P \times 1000}{\sqrt{3} \frac{Z}{100} V_{Sec}} = \frac{100 \times 1000}{\sqrt{3} \frac{3.5}{100} 220}$$

$$I_{cc-max-sec} = 19682,4 \text{ A}$$

$$I_{cc-asim} = I_{cc-max-sec} \times F_{asim} = 19682,4 \times 1,25$$

$$I_{cc-asim} = 24603 \text{ A}$$

$$A_{kcmil} = 24,6 * 7,06 * \sqrt{0,5} = 122,8 \text{ kcmil}$$

Según el cálculo se debería utilizar un cable calibre 2/0 AWG, con sección de 133 kcmil, que tiene un radio de 4,63mm.

3.4.3. Determinar los voltajes de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano.

El ejemplo se realizará para una persona de 50kg por lo que se utiliza la ecuación (3.4) y (3.6) de la metodología. Para lo que se tiene los siguientes valores:

$$\rho_s = 3000 \Omega \cdot m$$

$$\rho = 30,14 \Omega \cdot m$$

$t_s = 0,5s$ Valor dado por los autores, relacionado con el tiempo que tardará el sistema en enviar la sobrecarga al SPT.

C_s =Debido a que se utiliza un suelo de 2 capas, este factor se obtiene con la siguiente fórmula:

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

Partiendo de los siguientes valores:

$$\rho = 30,15 \Omega m \text{ Resistividad de la capa inferior}$$

$$h_s = 0,15 m \text{ Valor que pertenece al espesor de la capa superficial}$$

$$C_s = 1 - 0,09 \frac{\left(1 - \frac{30,15}{3000}\right)}{2(0,15) + 0,09}$$

$$C_s = 0,772$$

EL voltaje de paso es:

$$E_{s50} = (1\ 000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{s50} = (1\ 000 + 6 * (0,772) * (3000)) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{0,5s}}$$

$$E_{s50} = 2442,34 V$$

Para el voltaje de toque se tiene que:

$$E_{t50} = (1\ 000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{t50} = (1\ 000 + 1,5 * (0,772) * (3000)) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{0,5s}}$$

$$E_{s50} = 733,62 V$$

3.4.4. Determinar el diseño preliminar.

a)

$$S = A * B = 25,92 \text{ m}^2$$

b)

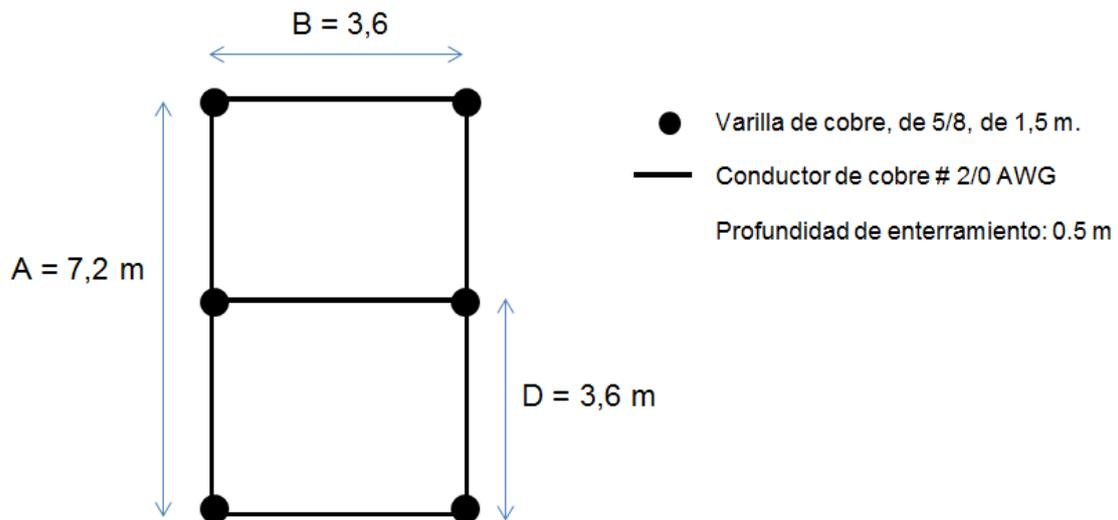


Figura 3.8. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Ejemplo.

Fuente: Elaborado por los autores.

c)

Profundidad de entierro de la malla = 0,5 m

d)

$$L_C = 25,2 \text{ m}$$

$$L_T = L_C + 6 \text{ varillas de } 1,8 \text{ m}$$

$$L_T = 14 + (6 * 1,8) = 36 \text{ m}$$

3.4.5. Determinar la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra.

Usando la ecuación 3.10 y partiendo de los siguientes datos se obtiene la resistencia de la malla:

$$\rho = 30,15 \Omega\text{m}$$

$$L_T = 25,20\text{m} + 10,80\text{m} = 36\text{m}$$

$$S = 25,92 \text{ m}^2.$$

$h = 0,5$ m Profundidad de entierro de la malla

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

$$R_g = 3 \left[\frac{1}{36} + \frac{1}{\sqrt{20(25,92)}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + 0,5\sqrt{20/25,92}} \right) \right] = 3,08 \Omega$$

3.4.6. Determinar la corriente de la malla.

Usando las ecuaciones 3.17 y 3.18 y considerando un factor de decremento de 1,043 y un factor de división de corriente de 0.6, se calcula la corriente de la malla.

$$I_{cc-max-prim} = I_{cc-max-sec} \cdot \frac{\sqrt{3}V_{sec}}{V_{prim}} = 19682 \frac{\sqrt{3}(220)}{13200} = 568,18 \text{ A}$$

$$I_G = 3 \cdot I_{cc-max-prim} \cdot D_f \cdot S_f = (3)(568,18)(1,043)(0,6) = 1066,7 \text{ A}$$

3.4.7. Determinar el GPR.

Usando la ecuación 3.19 se procede a calcular el GPR.

$$GPR = I_G \cdot R_G$$

$$GPR = 1066,7 \text{ A} * 3,08 \Omega = 3286,28 \text{ V}$$

Debido a que GPR no es menor que el voltaje de toque $E_{t50} = 733,62 \text{ V}$ se sigue con el procedimiento.

3.4.8. Determinar el voltaje de toque y de paso de la malla.

Para el cálculo del voltaje de toque y de paso de la malla se deben usar las ecuaciones 3.20 y 3.32, pero antes se deben realizar los cálculos necesarios partiendo de los siguientes datos:

- $K_{ii} = 1$ Cuando existen barras en las esquinas de la malla
- $h_0 = 1 \text{ m}$
- $D = 3,2 \text{ m}$
- $h = 0,5 \text{ m}$

- $S = 25,92 \text{ m}$
- $d = 4,63 \text{ mm}$
- $L_c = 25,2 \text{ m}$
- $L_R = 10,8 \text{ m}$
- $L_p = 21,6 \text{ m}$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = 1,225$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

Ya que la malla es rectangular se tiene que $n_b = n_c = 1$ y queda por calcular n_a y n_b :

$$n_a = \frac{2 * (L_c)}{L_p} = \frac{2 * (25,2)}{21,6} = 2,33$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{S}}} = \sqrt{\frac{21,6}{4\sqrt{25,92}}} = 1,03$$

$$n = 2,33 * 1,03 * 1 * 1$$

$$n = 2,4$$

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

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(3,2)^2}{16 (0,5)(0,00463)} + \frac{(3,2 + 2 \cdot (0,5))^2}{8 (0,5)(0,00463)} - \frac{0,5}{4 \cdot (0,000463)} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{1,225} \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2,4) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1,001$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 * (2,4) = 1$$

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

$$L_M = 25,2 + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{1,8}{\sqrt{3,6^2 + 7,2^2}} \right) \right] \cdot 10,8 = 44,89$$

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

$$E_m = \frac{(30,15) * (1,001) * (1) * (1066,7 \text{ A})}{44,89 \text{ m}} = 716,43 \text{ V}$$

Cálculo del voltaje de paso:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{(n-2)}) \right]$$
$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0,5)} + \frac{1}{3,6 + 0,5} + \frac{1}{3,2} (1 - 0,5^{(2,4-2)}) \right] = 0,463$$

$$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R$$
$$L_S = 0,75 \cdot (25,2) + 0,85 \cdot (10,8) = 28,1 \text{ m}$$

$$E_S = \frac{\rho \cdot K_S \cdot K_i \cdot I_G}{L_S}$$
$$E_S = \frac{(20,15) \cdot (0,4636) \cdot (1) \cdot (11066, A)}{28,1 \text{ m}} = 529,72 \text{ V}$$

3.4.9. Comparar los voltajes tolerables con los voltajes de malla.

Voltaje de toque:

$$716,44 \text{ V} < 733,62 \text{ V}$$

Voltaje de paso:

$$529,72 \text{ V} < 2442,34 \text{ V}$$

Debido a que los voltajes de toque y de paso de la malla son menores a sus respectivos voltajes tolerables por el ser humano, se puede asegurar que el diseño de la malla es el óptimo.

3.4.10. Proporcionar el diseño detallado de la malla.

En la Tabla 3.8 se pueden ver los detalles de la malla de puesta a tierra diseñada para el edificio de Unidades productivas.

Tabla 3.6.

Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio de Unidades productivas.

Ítem	Descripción	Variable	Valor
1	Área de la malla	S	7,2m x 3,6m
2	Capa superficial	h_s	0,15 m
3	Resistividad de la capa superficial	ρ_s	30,15 Ω .m
4	Tratamiento de suelo	Cemento químico GEM	
5	Diámetro del conductor	d	2/0 AWG
6	Espaciamiento entre conductores paralelos	D	3,6m
7	Profundidad de enterramiento de la malla	h	0,5 m
8	Longitud de la malla horizontal	L_C	25,2 m
9	Número de barras verticales	n_r	6
10	Longitud de las barras verticales	L_r	1,8 m
11	Longitud efectiva de la malla	L_T	36 m
12	Distancia entre la malla y el tablero principal		10 m
13	Uniones	Suelda exotérmica	

Fuente: Elaborado por los autores

CAPÍTULO 4

4. DIAGNÓSTICO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN BAJA TENSIÓN EXISTENTES EN EL CAMPUS UTPL

4.1. Análisis de operación del equipo de medición Fluke 1625 [26].

La eficacia de los sistemas de conexión a tierra pueden comprobarse usando instrumentos de prueba de toma de tierra como el Fluke 1625, que verifica la eficacia de este tipo de conexiones.

Además de realizar las mediciones de resistencia de tierra estándar de 3 y 4 polos, un innovador proceso mide de forma exacta las resistencias de cada electrodo de tierra y los sistemas conectados a tierra de forma individual y combinada sin desconectar ningún electrodo paralelo. Una aplicación específica de esta función es la posibilidad de realizar una medición rápida y exacta de las conexiones a tierra de las torres de energía eléctrica. Además, el 1625 incorpora un mecanismo de control automático de frecuencia (AFC) para minimizar las interferencias.

Antes de realizar la medición, el instrumento identifica las interferencias existentes y selecciona la frecuencia de la medición para minimizar su efecto.



Figura 4.1. Kit Fluke1625.

Fuente: <http://www.cedesa.com.mx/fluke/medidores/tierra-fisica/1625KIT/>

4.1.1. Características generales.

El 1625 es un medidor universal de resistencia de tierra controlado por microprocesador con proceso de selección de medición de frecuencia completamente automatizada, así como comprobación automática de sonda y resistencias de electrodo de tierra auxiliares y posibles voltajes de interferencias según las normas DIN IEC61557-5/EN61557-5.

Entre sus principales características podemos mencionar:

- Medición de voltaje de interferencias (UST).
- Frecuencia de medición de interferencias (FST).
- Medición de resistencia de sonda (RS).
- Medición de resistencia de electrodo de masa auxiliar (RH).
- Medición de la resistencia de la conexión a masa de 3 y 4 polos, (RE) utilizando o sin utilizar transformador de corriente externo de pinza para la medición selectiva de derivaciones de conexiones a masa individuales en sistemas de conexión a masa operados de forma combinada A.
- Medición de resistencia de dos polos con voltaje de CA (R~).
- Medición de resistencia con el voltaje de CD de dos y 4 polos, (RF).

Con las diversas posibilidades de medición y de control de secuencia de medición completamente automatizado este instrumento ofrece la tecnología de medición más avanzada en el campo de las mediciones de resistencia de la conexión a masa. Por medio de la entrada de un límite seleccionable con confirmación visual y acústica, y mensaje de error, y con las funciones especiales definidas por el cliente y programables mediante códigos, como la medición de voltaje de 20 V (para sistemas agrícolas), impedancia de conexión a masa R* (medición de frecuencia 55 Hz) encendido y apagado mediante conmutador, estos instrumentos se pueden programar individualmente para uso como un simple medidor y como dispositivo de medición avanzado completamente automatizado.

4.1.2. Especificaciones técnicas y generales del Fluke 1625, Earth/GroundTester.

En los siguientes cuadros se muestra las especificaciones técnicas y generales del equipo incluyendo los errores al cual trabaja en determinada función.

Tabla 4.1. Especificaciones técnicas de las funciones del Fluke 1625, Earth/GroundTester

	Medida de la resistencia de tierra RA a 3 hilos (IEC 1557-5)	Medida de la resistencia de tierra RA a 4 hilos (IEC 1557-5)	Medida de la resistencia de tierra RA a 3 hilos con pinza amperométrica	Medida de la resistencia de tierra RA a 4 hilos con pinza amperométrica	Comprobación de lazo de tierras sin picas
Tensión de medida	V _m =20/48 VCA	V _m =20/48 VCA	V _m =20/48 CA	V _m =20/48 CA	V _m =20/48 CA
Corriente de cortocircuito	250mA CA	250mA CA	250mA CA	250mA CA	
Frecuencia de medida	94,105,111,128 HZ	94,105,111,128 HZ	94,105,111,128 HZ	94,105,111,128 HZ	94,105,111,128 HZ
Resolución	0,001Ω a 100Ω	0,001Ω a 100Ω	0,001Ω a 10Ω	0,001Ω a 10Ω	0,001Ω a 10Ω
Rango de medidas	0,001Ω a 299,9kΩ	0,001Ω a 299,9kΩ	0,001Ω a 29,9kΩ	0,001Ω a 29,9kΩ	0,001Ω a 29,9kΩ
Error Intrínseco	±(2% de lectura +2d)	±(2% de lectura +2d)	±(7% de lectura +2d)	±(7% de lectura +2d)	±(7% de lectura +2d)
Error de operación	±(5% de lectura +5d)	±(5% de lectura +5d)	±(10% de lectura +5d)	±(10% de lectura +5d)	±(10% de lectura +5d)

Fuente: <http://www.cedesa.com.mx/fluke/medidores/tierra-fisica/1625KIT/>

Tabla 4.2. Especificaciones de ambiente, mecánicas y generales del Fluke 1625, Earth/GroundTester

Especificaciones de ambiente		Especificaciones mecánicas y generales	
Temp. de trabajo	-10°C a -50°C	Pantalla	Pantalla LCD con indicación de 2999 dígitos: pantalla de cristal líquido de 7 segmentos con símbolos especiales y retroiluminación
Temp. nominal	0°C a -35°C	Tamaño	133mm x 187 mm x 250 mm
Temp de almacenamiento	-30°C a +60°C	Peso	1.1kg (Incluidas baterías)
Clase climática	C1 (IEC 654-1) -5°C a +45°C. 5% a 95%. HR	Garantía	Dos años
Clase de Protección	Carcasa conforme de IP56, tapa del compartimento de la batería conforme a IP40 según la norma EN 60529	Duración de la batería	Típica 6000 medidas (RE+HR≤10kΩ)

Fuente: <http://www.cedesa.com.mx/fluke/medidores/tierra-fisica/1625KIT/>

4.1.3. Procedimiento de las mediciones.

El procedimiento que se sigue para medir con el FLUKE 1625 es el siguiente:

- Defina la función de medición con el selector giratorio central 1.
- Conecte el instrumento sin cable de medición conectado INICIO se omite.
- Inicie la medición con el botón "START TEST" (Iniciar prueba).
- Lea los valores medidos.

4.1.4. Mediciones de control de seguridad.

Antes de cada medición, el instrumento comprueba automáticamente las condiciones para la medición y, simultáneamente muestra la clase de error e impide el inicio de las mediciones en las siguientes condiciones:

- voltaje excesivo en la toma (> 24 V en RE y R~; > 3 V en R continua)
- conexión incorrecta o incompleta
- Problemas durante la secuencia de medición (aparece “E1 ... E5” en pantalla)
- Voltaje de la batería demasiado bajo (aparece LO-BAT en pantalla)

4.1.5. Medición de interferencias - Voltajes y frecuencias.

Esta función de medición detecta posibles voltajes de interferencias y sus frecuencias. Esta función se activa automáticamente en cada posición del selector antes de una medición de conexión a masa o de resistencia. Si se exceden los valores límite predefinido, el voltaje de interferencias se indica como demasiado alto y se evita, automáticamente, cualquier medición. La frecuencia de un voltaje de interferencias sólo se puede medir si el nivel de dicho voltaje es superior a 1 V.

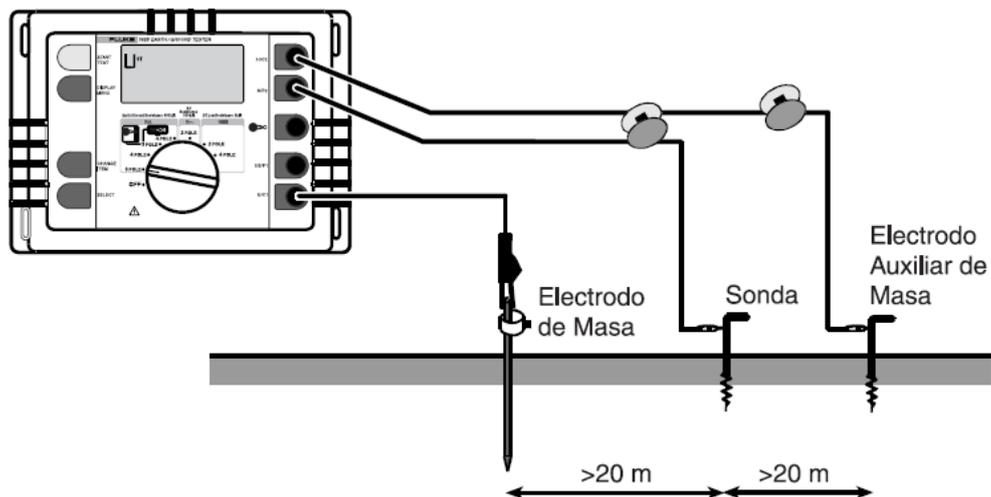


Figura 4.2. Medición de interferencias – Voltajes y frecuencias.

Fuente: http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-1625_user_manual.pdf

Coloque el selector giratorio central en la posición que desee, lea el valor medido del voltaje de interferencias; el valor medido aparecerá presionando “DISPLAY”.

4.1.6. Medición de resistividad del terreno.

La resistividad del terreno es la cantidad geológica y física para el cálculo y diseño del sistema de conexión a masa. El procedimiento de medición aplicado más abajo usa el método desarrollado por Wenner (V.Wenner, A method of measuring earth resistivity (Un método para la medición de la resistividad de la masa; Bull. National Bureau of Standards, Bulletin 12 (4), Paper 258, S 478-496; 1915/16).

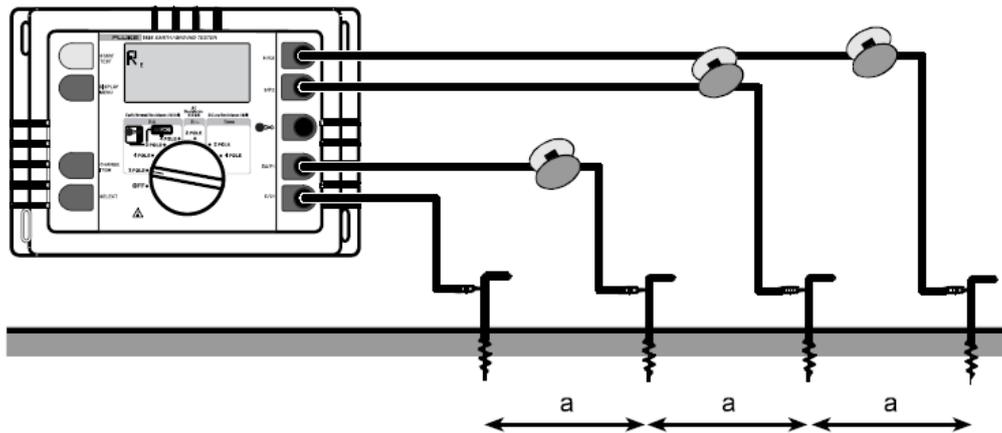


Figura 4.3. Medición de la resistividad del terreno.

Fuente: http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-1625_user_manual.pdf

1. Cuatro puntas de masa de la misma longitud se colocan en el terreno en línea recta y separada a distancias iguales entre sí. Las puntas de masa no deben enterrarse más profundamente que un máximo de máxima de $1/3$ de "a".
2. Gire el selector giratorio central hasta la posición "RE 4pole".
El cableado del instrumento debe realizarse de acuerdo con la imagen y las advertencias que aparezcan en la pantalla.
3. Presione el botón "START TEST".
4. Lea el valor medido de RE.

A partir del valor de resistencia RE, se calcula la resistividad del terreno según la ecuación:

$$\rho_E = 2\pi a R_E$$

ρ_E : Valor medio de resistividad del terreno (Ωm)

R_E : resistencia medida (Ω)

a: distancia de sonda (m)

4.1.7. Medición de resistencia de la conexión a tierra.

Este instrumento está equipado con un sistema de medición de resistencias de 3 y 4 polos que proporciona mediciones de resistencia de conexión a masa de todos los sistemas posibles, así como mediciones de resistividad de tierra de los estratos geológicos. Como función especial, el instrumento ofrece mediciones con un transformador de corriente externo, con las que se pueden realizar medición de derivaciones de resistencia individuales en redes interconectadas (protección de alumbrado y torres de alto voltaje con cableado) sin separar partes del sistema.

Para asegurar una supresión de interferencias más viable durante las mediciones, el instrumento está equipado con cuatro frecuencias de medición (94, 105, 111 y 128 Hz), con cambio automático si es necesario (AFC -control automático de frecuencia). La frecuencia de medición correspondiente usada para una medición específica se puede recordar y mostrar con el botón "DISPLAY MENU" tras la medición. Además, se puede seleccionar una de las cuatro frecuencias de medición y establecer como permanente en casos especiales. En ese caso, para estabilizar la pantalla, se puede realizar una medición promedio de hasta un minuto manteniendo presionado el botón "START TEST".

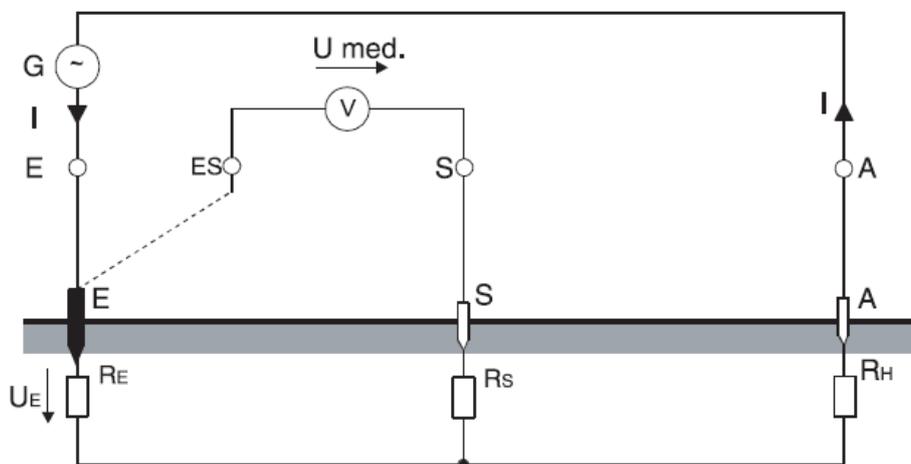


Figura 4.4. Medición de la resistencia de la conexión a masa- Método.

Fuente: http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-1625_user_manual.pdf

4.1.7.1. Medición de 3 y 4 polos de la resistencia de la conexión a masa.

Esta función de medición mide la conexión a masa y la resistencia de disipación de la masa de electrodos de masa individuales, electrodos de masa de cimientos y otros sistemas de conexión a masa usando dos picos de masa.

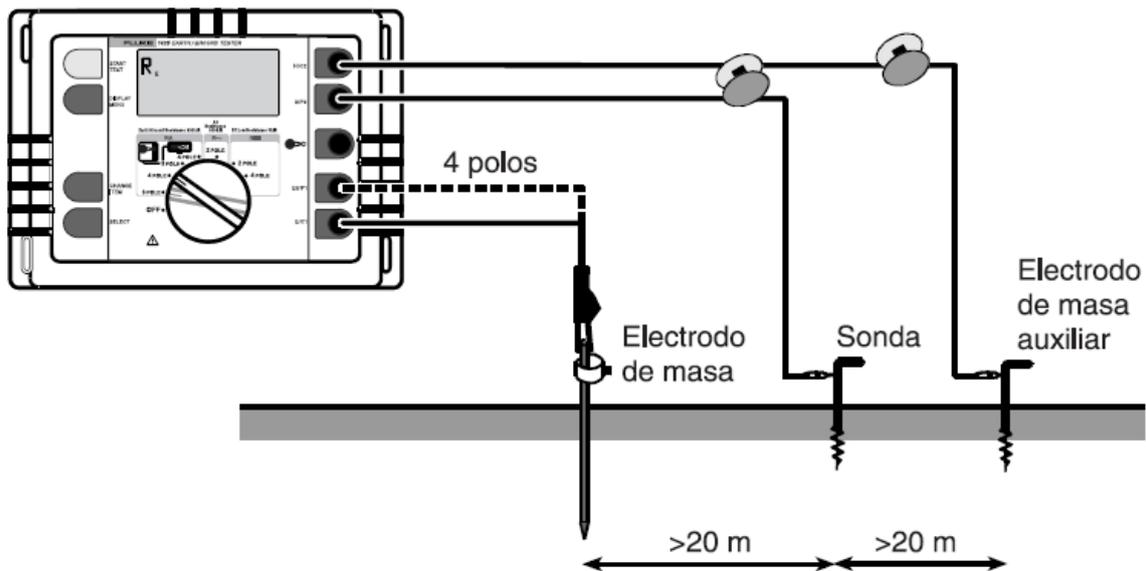


Figura 4.5. Medición de resistencia de la conexión a masa de tres y cuatro polos – Proceso.

Fuente: http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-1625_user_manual.pdf

- Gire selector giratorio central hasta la posición "RE 3pole" o "RE 4pole".
El cableado del instrumento debe realizarse de acuerdo con la imagen y las advertencias que aparezcan en la pantalla.
Un destello de los símbolos de conexión (E) (ES) (S) (H) , señala una conexión incorrecta o incompleta del cable que se está midiendo.
- Presione el botón "START TEST".
A continuación se realiza una secuencia de pruebas completamente automatizada de todos los parámetros relevantes, como el electrodo de masa auxiliar, o la resistencia de la sonda y el electrodo de masa, que acaba mostrando el resultado de RE.
- Lea el valor medido de RE.
- Vuelva a mostrar RS y RH con "DISPLAY MENU".

Antes de configurar las puntas de masa para el electrodo de la sonda y de masa, compruebe que la sonda está configurada fuera de la zona de gradiente potencial del electrodo de masa y del electrodo de masa auxiliar. Esa condición se consigue

normalmente dejando una distancia de > 20 m entre el electrodo de masa y las puntas de masa, así como entre las puntas de masa entre sí. Los cables de las puntas deben estar situados muy cerca unos de otros.

Si aparece una advertencia de “valor medido inestable” (vea “Procedimientos de medición”, “Descripción de la pantalla”) tras una secuencia de prueba, lo más probable es que la causa sean unas fuertes señales de interferencias (por ejemplo, un voltaje de ruido inestable). Sin embargo, Para obtener valores fiables, el instrumento ofrece la posibilidad de hacer u promedio de un período más largo.

- a) Seleccione una frecuencia fija (vea “Bucle de control” en “Operación”)
- b) Mantenga presionado el botón “START TEST” hasta que desaparezca la advertencia de “valor medido inestable”. El tiempo máximo para realizar el promedio es de 1 minuto, aproximadamente.

4.1.7.2. *La medición de tres o 4 polos de resistencias de electrodos de masa individuales.*

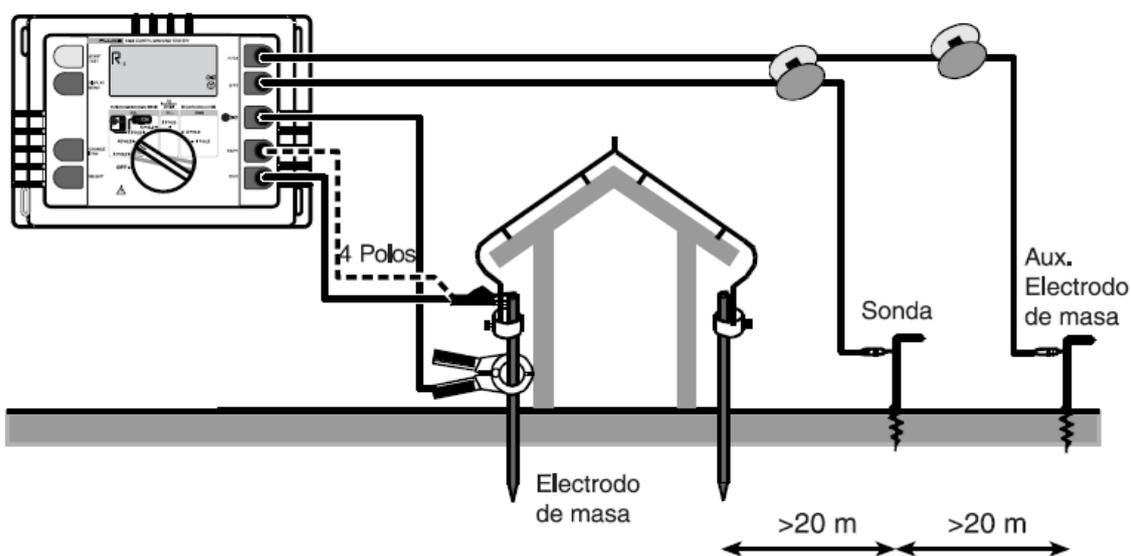


Figura 4.6. Medición de 3 o 4 polos de resistencias de electrodos de masa individuales.

Fuente: http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-1625_user_manual.pdf

- a) Gire el selector giratorio central hasta la posición “ ∞ RE 3pole” o “ ∞ RE 4pole”. El cableado del instrumento debe realizarse de acuerdo con la imagen y las advertencias que aparezcan en la pantalla.

Un destello de los símbolos de conexión (E) (ES) (S) (H) o ∞ , señala una conexión incorrecta o incompleta del cable que se está midiendo.

- b) Sujete el transformador de enganche alrededor del electrodo de masa que se va a medir.
Compruebe que la tasa de transformación de enganche definida en el instrumento corresponde al transformador de enganche que está usando.
- c) Presione el botón “START TEST”.
A continuación se realiza una secuencia de pruebas completamente automatizada de todos los parámetros relevantes, como el electrodo de masa auxiliar, o la resistencia de la sonda y el electrodo de masa, que acaba mostrando el resultado de RE.
- d) Lea el valor medido de RE.
- e) Vuelva a mostrar RS y RH con “DISPLAY ÍTEM”.

4.1.7.3. *Medición de resistencia de tierra sin estacas.*

La medición sin estacas proporciona al comprobador de tierra la capacidad exclusiva de medir resistencias de individuales en sistemas con varias conexiones a tierra usando dos transformadores de corriente de enganche.

No es necesario usar estacas de tierra.

Con los métodos anteriores se deben que desconectar cada ruta de tierra que fuese a comprobarse de otras conexiones a tierra para eliminar la influencia de las rutas de masa paralelas. Se trataba de un proceso, como mínimo, largo y, en muchos casos, peligroso.

Una vez desconectado, se usaba el método de comprobación estándar de 3 polos/terminales de tierra, que requiere una estaca de masa auxiliar. Además de requerir tiempo adicional, en muchos casos es difícil, a veces imposible, encontrar ubicaciones para clavar las estacas de tierra. El método de comprobación de la resistencia de tierra “sin estacas” elimina esos problemas y complementa de forma ideal a los métodos de comprobación del comprobador de tierra sin estacas.

Para la operación conectar el adaptador de acuerdo con el diagrama y las designaciones E, S y H al comprobador y a una pinza amperométrica.

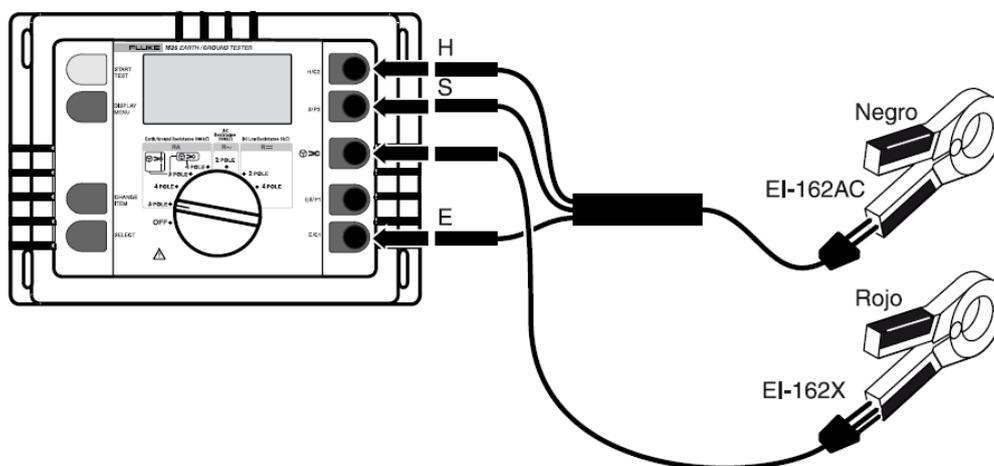


Figura 4.7. Medición de resistencia de tierra sin estacas.

Fuente: http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-1625_user_manual.pdf

Use el cable de prueba contenido en el juego para conectar la segunda pinza amperométrica a la toma. Compruebe que las conexiones tienen la polaridad correcta. Gire el selector giratorio del comprobador hasta la posición “**RE 3pole**” y compruebe los siguientes valores:

- U_m : Configurar el voltaje de prueba en 48 V (valor estándar)
- R_k : Configurar la resistencia de compensación en 0,000 ohm
- I : Configurar la tasa del transformador en 1,000 (valor estándar)
- R^* : Configurar en OFF (sin significado en este modo).
- F : Configurar hasta obtener una frecuencia constante

Sujetar ambos transformadores alrededor del conductor de tierra que se va a comprobar. Se debe intentar dejar una distancia > 10 cm entre las pinzas para obtener unos resultados óptimos. Si se presiona el botón START aparecerá el valor de RE. En este modo en concreto, los valores de RH y RS no tienen significado.

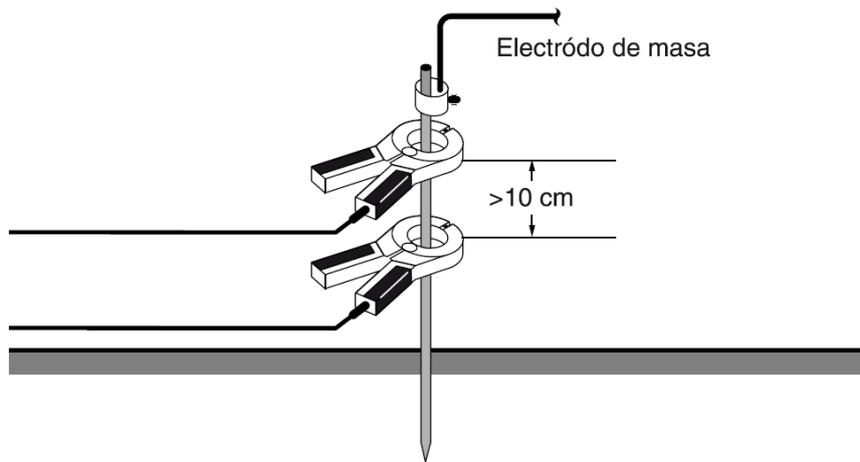


Figura 4.8. Medición de resistencia de tierra sin estacas – Distancia entre pinzas.

Fuente: http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-1625_user_manual.pdf

4.2. Mediciones de los sistemas de puesta a tierra en cada edificio del campus UTPL.

4.2.1. Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado en el edificio de Unidades productivas.

4.2.1.1. Antecedentes.

El edificio de la Unidades Productivas tiene su origen en 1979, cuando la UTPL incorpora asignaturas de informática en las carreras que ofrece, para lo cual crea un Centro de Cómputo, muy bien equipado para la época, el Instituto de Ciencias de la Computación y la carrera de Tecnólogo en Procedimientos Electrónicos de Datos.

Las dependencias que actualmente funcionan en el edificio de Unidades Productivas son: Dirección de Estudiantes, Valle de tecnología, Unidad de Gestión de Tecnología de la Información, Centro de Investigación y Servicios de Inglés, Departamento Legal, Unidad de Diseño e Investigación de Arquitectura, Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica, IBM, salas de cómputo y laboratorios de electrónica e inglés.

Actualmente el edificio posee un transformador marca Siemens de 300 kVA, con un voltaje primario de 13800 V y un voltaje secundario de 220/110 V, este transformador ha venido funcionando por aproximadamente 15 años.

Para evitar cortes de energía eléctrica en el edificio, éste cuenta con un Sistema de Emergencia dotado por un Grupo Electrónico de 300 kVA, marca Perkins, que viene funcionando desde aproximadamente dos años y medio.

El edificio tiene dos sistemas de puesta a tierra, uno para el centro de cómputo y otro para el resto de carga en el edificio, estos sistemas no son compartidos. Además el transformador del edificio tiene una varilla de puesta a tierra de 1,20 m, la que también es independiente de los dos sistemas de puesta a tierra del edificio.

El edificio de Unidades Productivas posee las siguientes cargas eléctricas: Computadoras, sistema de iluminación en su mayoría fluorescente, ascensor, equipos de aire acondicionado, y equipos UPS.

4.2.1.2. Estado actual de las instalaciones eléctricas y del SPT.

Las instalaciones eléctricas de Unidades productivas fueron remodeladas en el año 2009 y se encuentran en buen estado, no han presentado problema hasta la actualidad.

Actualmente el edificio de Unidades productivas consta con dos sistemas de puesta a tierra, uno para el centro de cómputo y otro para el edificio en general. El SPT del edificio en general fue implementado en el año 2012 y se encuentra conectado al tablero principal. Para su construcción se utilizó los siguientes elementos:

- Varillas Copperweld de 1.5 m
- Cemento GEM 25-A Aterrizamiento Eléctrico
- Tierra de cultivo
- Cápsula 90 PLUSF20
- Cable desnudo #2 AWG
- 1 Operador de control
- 1 Tenaza para molde 160 Cadweld

El SPT del edificio en general es una malla triangular de 1,5 m por cada lado, teniendo en cada extremo una varilla de puesta a tierra de 1,5 m de profundidad. La malla de puesta a tierra se encuentra enterrada a 0,5 m de profundidad (ver Fig. 4.9).

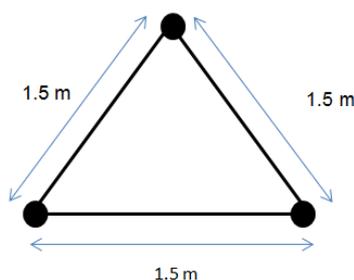


Figura 4.9. Diseño del SPT de las instalaciones en general del edificio de Unidades productivas.

Fuente: Elaborado por los autores.

El SPT del centro de cómputo fue implementado en el año 2007 es exclusivamente para el centro de cómputo y es totalmente separado del SPT del edificio en general. Para su construcción se utilizó los siguientes elementos:

- Cemento GEM 25-A Aterrizamiento Eléctrico
- 6 Varillas Copperweld IH-658 INTELLI
- Molde Universal GYE 161 Cadweld
- Cápsulas 90 PLUSF20
- 1 Operador de control
- 1 Tenaza para molde 160 Cadweld

El SPT del centro de cómputo es una malla rectangular de 2 m x 3 m, como se puede ver en la Fig. 4.10.

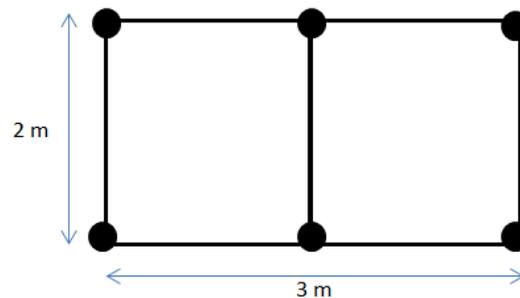


Figura 4.10. Diseño del SPT del centro de cómputo del edificio de Unidades productivas.

Fuente: Elaborado por los autores.

4.2.1.3. Ubicación de los SPT del edificio de Unidades productivas.

En la Figura 4.11 se puede ver la ubicación de los sistemas de puesta a tierra, transformador y grupo electrógeno del edificio de Unidades productivas.

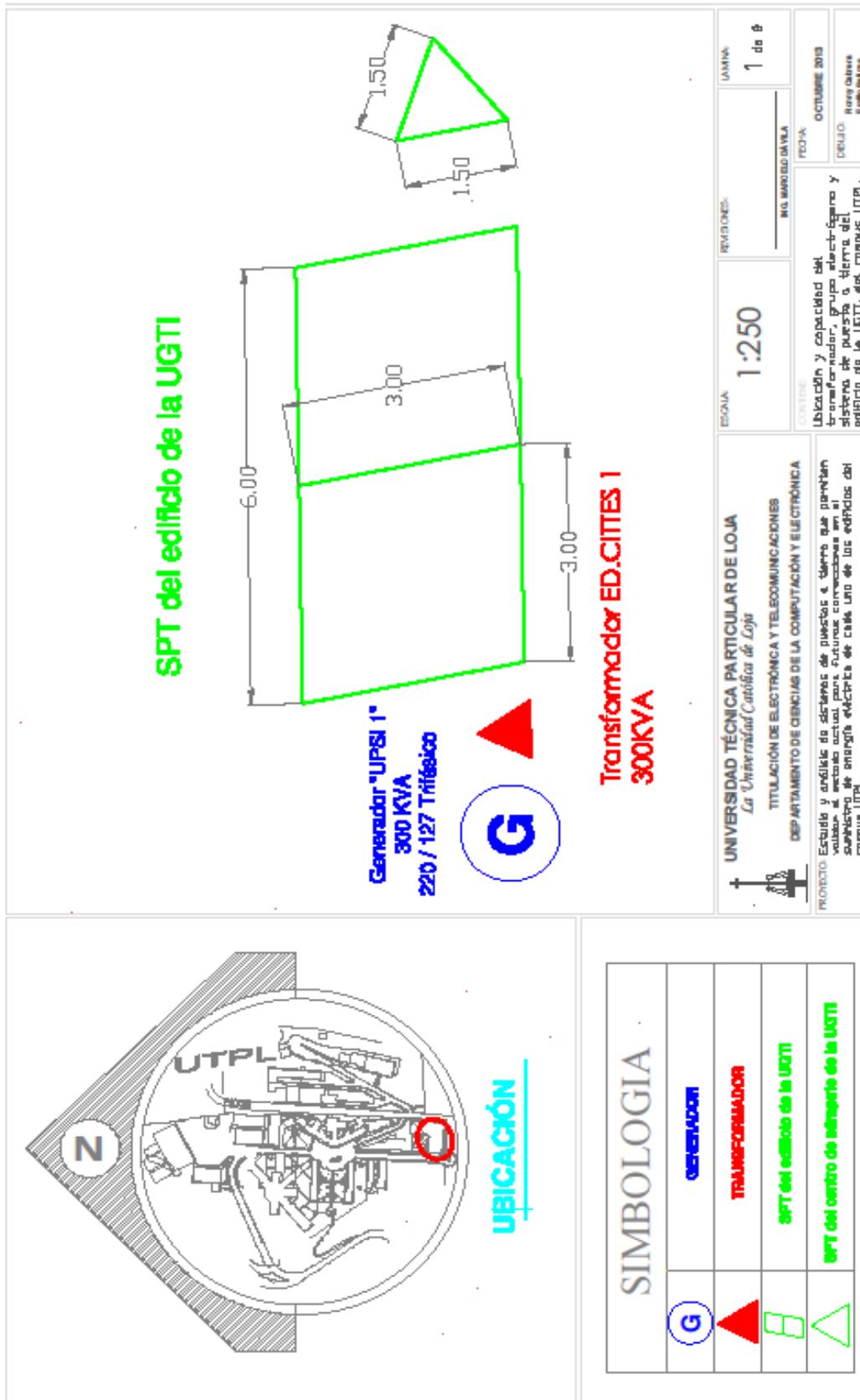


Figura 4.11. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del edificio de Unidades productivas.

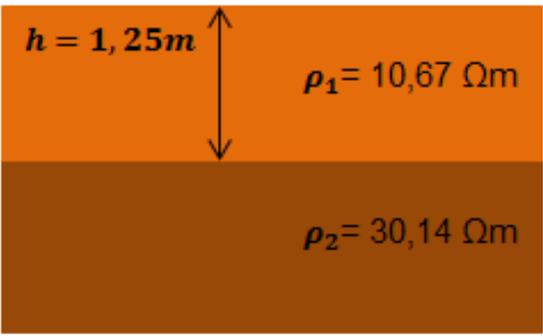
Fuente: Elaborado por los autores.

4.2.1.4. Ficha técnica de mediciones del edificio de Unidades productivas.

En la Tabla 4.3 se resumen las mediciones realizadas en el edificio de Unidades productivas.

Tabla 4.3. Ficha de mediciones realizadas en el edificio de Unidades productivas.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones					
Medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra y resistividad del terreno en el campus UTPL							
Datos informativos							
Provincia/Ciudad:		Loja		Hora:		10:00 am	
Fecha:		03/09/2013		Empresa:		UTPL	
Dirección:		San Cayetano Alto		Sitio:		UPSI	
Detalle del transformador				Detalle del equipo:			
Ubicación	Latitud	70° 00' 02"		Equipo:	Earth/Ground Tester		
	Longitud	95° 58' 92,8"					
Voltaje	Primario	13,800		Marca:	Fluke 1625		
	Secundario	220/127					
Capacidad del transformador:		300 kVA		Error Intrínseco:		±2%	
Grupo electrógeno:		300 kVA		Error de operación:		±5%	
Medición de resistividad del terreno							
Método de medición:		Método de Wenner		Área del terreno		$A = 4 * 2 = 8 \text{ m}^2$	
Nro	Profundidad de picas (m)	Separación de picas (m)	Re (Ω)	Rh ($k\Omega$)	Rs ($k\Omega$)	Resistividad (Ωm)	
1	0.20	2	0,85	0,3	0,4	10,67	
2	0.20	3	1,25	0,4	0,4	23,55	
3	0.20	4	1,29	0,4	0,6	32,40	
4	0.20	5	1,11	0,3	0,6	34,85	
5	0.20	6	0,8	0,6	0,9	30,14	
							
<p>Figura 4.12. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Edificio de Unidades productivas. Fuente: Elaborado por los autores.</p>							

Resistividad de las capas del suelo			
Capa superficial (ρ_1)	Capa Inferior (ρ_2)	Altura de la capa superficial (h)	
10,67 Ω m	30,14 Ω m	1,25 m	
			
Medición de resistencia de SPT			
Método de medición	Re (Ω)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)
Método sin estacas	11.58 Ω	48 V	111
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> Se realizó la medición de la resistencia de la malla a tierra con los métodos: 3 polos, 4 polos, 1 pinza y 3 polos, 1 pinza y 4 polos, con lo que se obtuvo los resultados siguientes: 0,14 Ω, 0,11 Ω, 0,14 Ω, 0,11 Ω, los cuales son valores inconsistentes para la resistencia de la malla, esto debido a la falta de espacio para la realización de las mediciones y a que se necesita desconectar el sistema para obtener valores reales, lo cual se tornaba muy complicado dentro la institución. Por la razón antes mencionada solo se realizará las mediciones de resistencia por el método de las dos pinzas. 			
Responsables de mediciones		Cabrera Ronny Salinas Emilio	

Fuente: Elaborada por los autores.

4.2.1.5. Cálculo de la resistividad del terreno del edificio de Unidades productivas.

Para aproximar un modelo de suelo de dos capas para el terreno del edificio de Unidades productivas, se sigue el método de Sunde, descrito la metodología de diseño de SPT, en la sección 3.2.1, de la siguiente manera:

a)

Gráfica Resistividad vs Distancia. Ver Figura 4.12.

b)

$\rho_1 = 10,67 \Omega\text{m}$ Resistividad capa superficial
 $\rho_2 = 30,14 \Omega\text{m}$ Resistividad de la capa inferior

c)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{30,14}{10,67} = 2,82$$

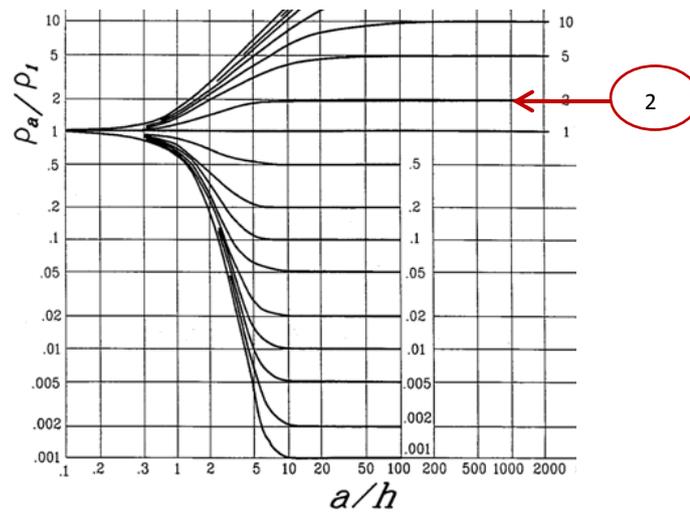


Figura 4.13. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Unidades productivas.

Fuente: Elaborado por los autores.

d)

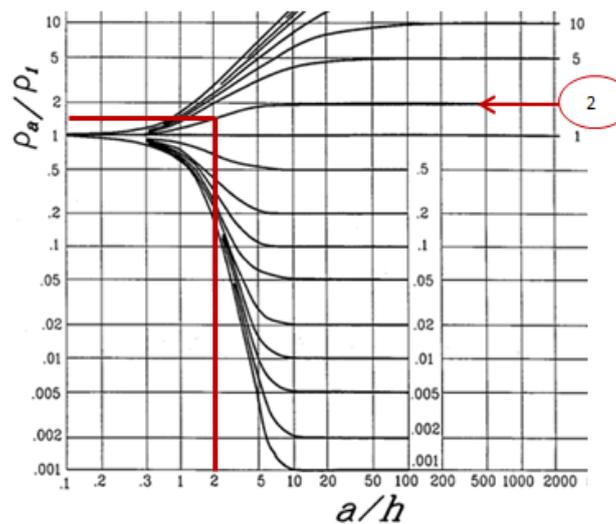


Figura 4.14. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Unidades productivas.

Fuente: Elaborado por los autores.

e)

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

f)

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

$$\rho_a = 1,5 * 10,67 = 16,005 \Omega m$$

g)

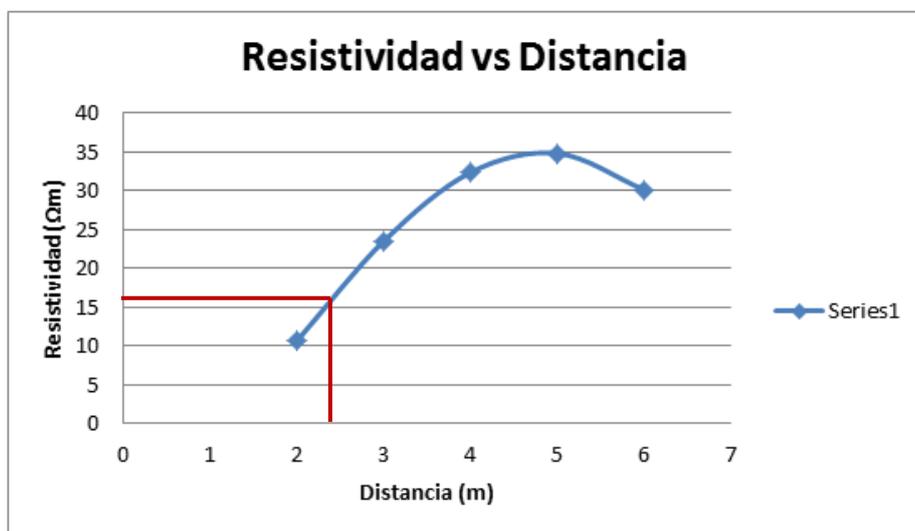


Figura 4.15. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Unidades productivas.

Fuente: Elaborado por los autores.

$$a = 2,5m$$

h)

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

$$h = \frac{2.5}{2}$$

$h = 1,25 m$ profundidad de la capa superior

4.2.2. Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado al edificio de Aulas.

4.2.2.1. Antecedentes.

La malla de puesta a tierra ubicada en el edificio de Aulas es compartida con los edificios 3, 4, 5 y 6, en donde funcionan aulas de clase, dos auditorios (Virginia Riofrío y Oscar Jandl) y un centro de copiado. Los edificios cuentan con una malla de puesta a tierra simple, sin tratamiento de suelo, con un área aproximada de 4 m².

Estas instalaciones poseen un transformador trifásico de 35 kVA, ubicado a nivel de poste en el estacionamiento existente junto al edificio. Este transformador ha venido funcionando aproximadamente 30 años, teniendo un voltaje primario de 13800 V y un voltaje secundario de 220/127 V. Para evitar cortes de energía eléctrica en los edificios, éstos cuentan con un Sistema de Emergencia dotado por un Grupo Electrónico trifásico de 25 kVA, marca Perkins, que viene funcionando desde aproximadamente 3 años.

Las cargas eléctricas en los edificios 3, 4, 5 y 6 son sistemas de iluminación en su mayoría fluorescente, sistemas de proyección audiovisual y centro de copiado.

4.2.2.2. Estado actual de las instalaciones eléctricas y del SPT.

Las instalaciones eléctricas de los edificios 3, 4, 5 y 6 son antiguas, funcionando desde aproximadamente 30 años. Sin embargo el edificio posee un tablero de distribución principal nuevo, que ha funcionado desde hace 3 años.

Los edificios 3, 4, 5 y 6 cuentan con una malla de puesta a tierra simple, sin tratamiento de suelo, con un área aproximada a los 4 m² que fue instalada hace aproximadamente 3 años. Esta malla de puesta a tierra es compartida entre los edificios, el transformador y el grupo electrónico.

4.2.2.3. Ubicación del SPT del edificio de Aulas.

En la Figura 4.16 se puede ver la ubicación del sistema de puesta a tierra, transformador y grupo electrónico del edificio de Aulas.

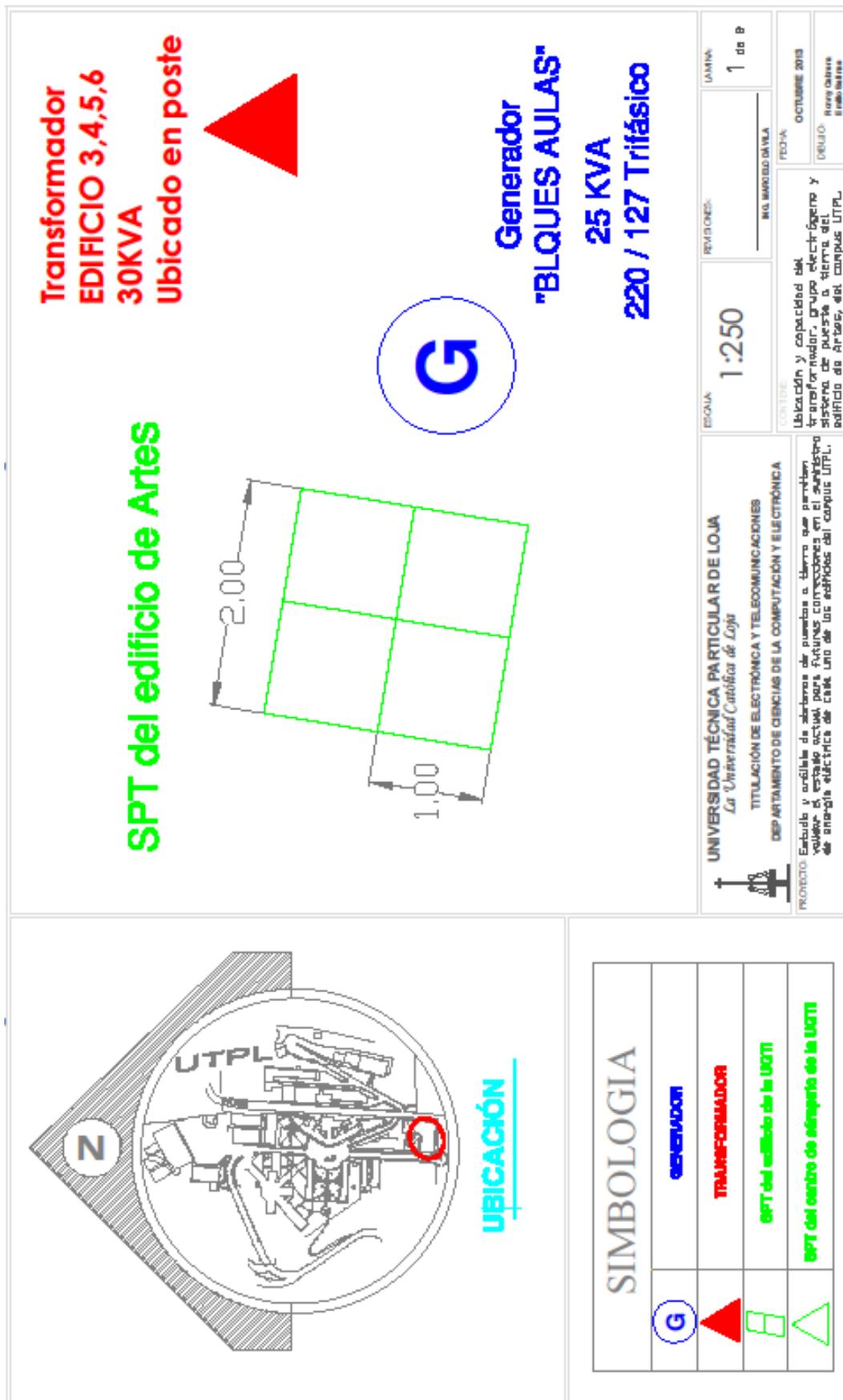
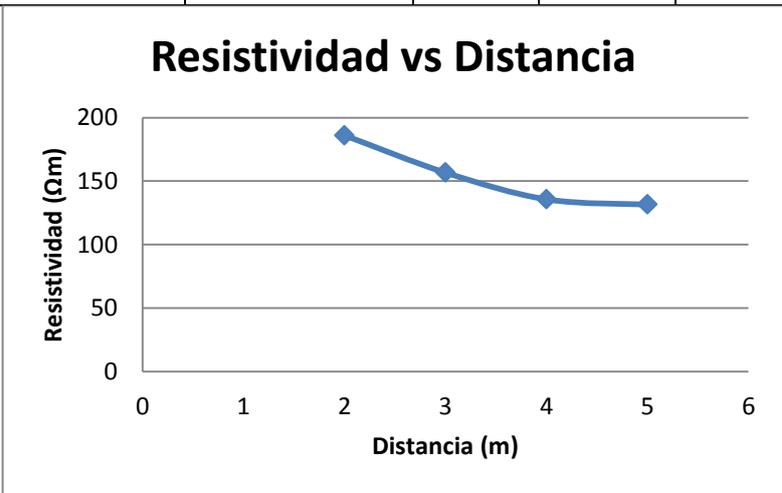


Figura 4.16. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del edificio de Aulas.
Fuente: Elaborado por los autores.

4.2.2.4. Ficha técnica de mediciones del edificio de Aulas.

En la Tabla 4.4 se resumen las mediciones realizadas en el edificio de la Aulas.

Tabla 4.4. Ficha de mediciones realizadas en el edificio de Aulas.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones					
Medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra y resistividad del terreno en el campus UTPL							
Datos informativos							
Provincia/Ciudad:		Loja		Hora:		04:00 pm	
Fecha:		03/09/2013		Empresa:		UTPL	
Dirección:		San Cayetano Alto		Sitio:		Edificio de Aulas	
Detalle del transformador				Detalle del equipo:			
Ubicación	Latitud	70° 00' 02"		Equipo:	Earth/Ground Tester		
	Longitud	95° 58' 92,8"					
Voltaje	Primario	13,800		Marca:	Fluke 1625		
	Secundario	220/127					
Capacidad del transformador:		35 kVA		Error Intrínseco:		±2%	
Grupo electrógeno:		25 kVA		Error de operación:		±5%	
Medición de resistividad del terreno							
Método de medición:		Método de Wenner		Área del terreno		A = 4 * 6 = 24 m ²	
Nro	Profundidad de picas (m)	Separación de picas (m)	Re (Ω)	Rh (kΩ)	Rs (kΩ)	Resistividad (Ωm)	
1	0.20	2	14,81	5,6	14	186,01	
2	0.20	3	8,32	5,2	3,3	156,69	
3	0.20	4	5,4	8,6	2,2	135,64	
4	0.20	5	4,19	5,4	4,8	131,56	
							
<p>Figura 4.17. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Edificio de Aulas.</p> <p>Fuente: Elaborado por los autores.</p>							

Resistividad de las capas del suelo			
Capa superficial (ρ_1)	Capa Inferior (ρ_2)	Altura de la capa superficial (h)	
186,01 Ωm	131,56 Ωm	1,13 m	
Medición de resistencia de SPT			
Método de medición	Re (Ω)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)
Método sin estacas	41 Ω	48	111
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> • La medición de la resistencia de puesta a tierra se la realizó con el método sin estacas, debido al espacio disponible y a que, por seguridad, no se recomienda desconectar las cargas eléctricas para realizar la medición con el método de las 4 puntas. • El valor de resistencia de puesta a tierra no cumple con lo dispuesto por la normativa nacional e internacional, por lo que se deben implementar de inmediato las acciones correctivas en el sistema de puesta a tierra. 			
Responsables de mediciones	Cabrera Ronny Salinas Emilio		

4.2.2.5. Cálculo de la resistividad del terreno del edificio de Aulas.

Para aproximar un modelo de suelo de dos capas para el terreno del edificio de Aulas, se sigue el método de Sunde, descrito la metodología de diseño de SPT, en la sección 3.2.1, de la siguiente manera:

a)

Gráfica Resistividad vs Distancia. Ver Figura 4.17.

b)

$\rho_1 = 186,01 \Omega\text{m}$ Resistividad capa superficial

$\rho_2 = 131,56 \Omega\text{m}$ Resistividad de la capa inferior

c)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{131,56}{186,01} = 0,7$$

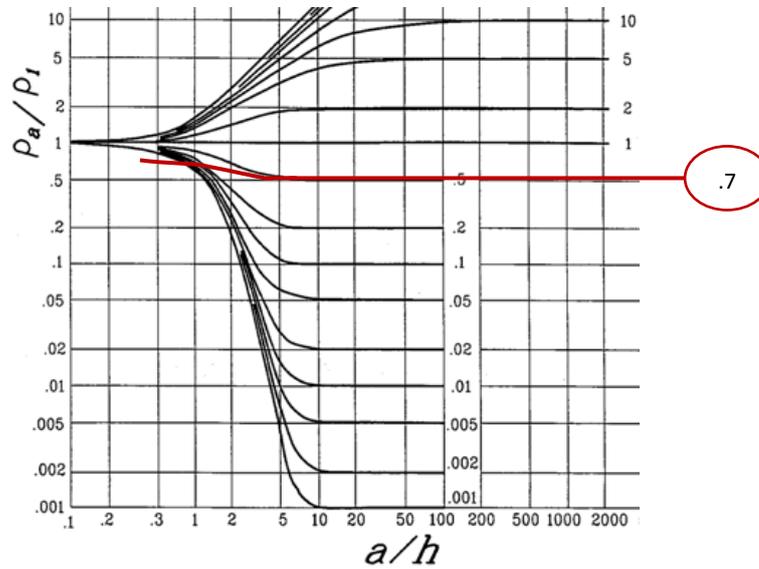


Figura 4.18. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Aulas.

Fuente: Elaborado por los autores.

d)

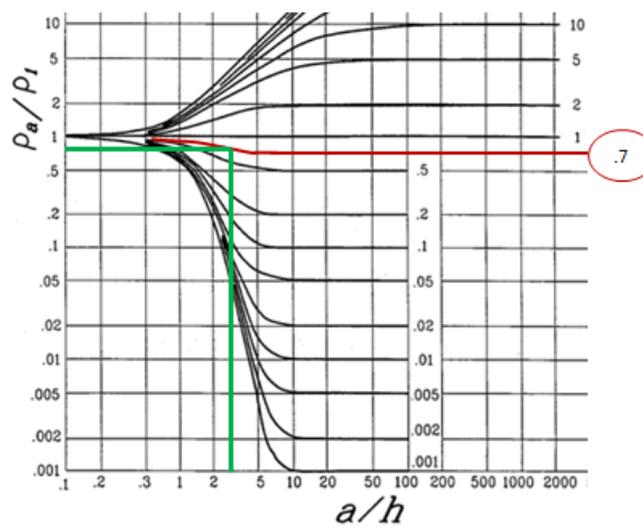


Figura 4.19. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Aulas.

Fuente: Elaborado por los autores.

e)

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

f)

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0,8$$

$$\rho_a = 0,8 * 186,01 = 148,80 \Omega m$$

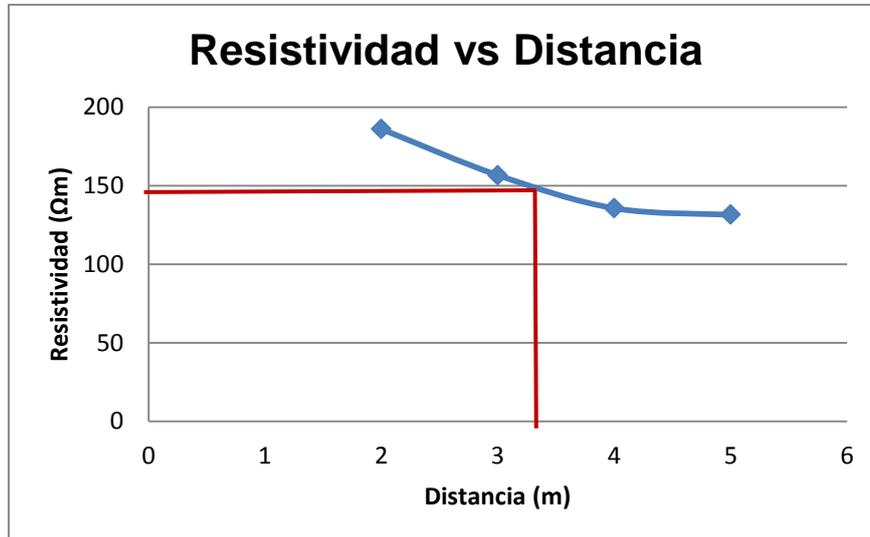


Figura 4.20. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Aulas.

Fuente: Elaborado por los autores.

$$a = 3,4m$$

h)

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

$$h = \frac{3.4}{3}$$

$$h = 1,13 \text{ m } \text{ profundidad de la capa superior}$$

4.2.3. Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado al edificio de Administración Central.

4.2.3.1. Antecedentes.

El edificio de Administración Central tiene un área de 3200,71 metros cuadrados. El edificio se construyó en el año de 1976, funcionando en un inicio como la Modalidad

Abierta y a Distancia (MAD) de la UTPL, hasta 1987 en donde pasó a ser el edificio de Administración Central. En la actualidad en el edificio funcionan las siguientes dependencias: Cancillería, Vicecancillería, Direcciones Generales, Secretaría General, Tesorería y Procuraduría Universitaria.

Actualmente el edificio posee un transformador marca Inatra de 125 kVA, con un voltaje primario de 13800 V y un voltaje secundario de 220/127 V, este transformador ha venido funcionando por aproximadamente 4 años y está conectado a las cargas del edificio de Administración Central y la Capilla.

Para evitar cortes de energía eléctrica en el edificio, éste cuenta con un sistema de emergencia dotado por un Grupo Electrónico trifásico de 125 kVA, marca Deutz, que viene funcionando desde aproximadamente 30 años.

El edificio tiene un sistema de puesta a tierra que es compartido tanto por las cargas eléctricas del edificio, el grupo eléctrico y el transformador.

El edificio de Administración Central posee las siguientes cargas eléctricas: Computadoras, sistema de iluminación en su mayoría fluorescente, ascensor, equipos de aire acondicionado, y equipos UPS.

4.2.3.2. Estado actual de las instalaciones eléctricas y del SPT.

El edificio posee instalaciones eléctricas que vienen funcionando desde el 2006, por lo que se las considera relativamente nuevas. El sistema de puesta a tierra del edificio está formado por una malla, ubicada debajo del transformador, con un área aproximada de 4m². El sistema de puesta a tierra es compartida por las cargas eléctricas del edificio, el grupo eléctrico y el transformador.

4.2.3.3. Ubicación del SPT del edificio de Administración Central.

En la Figura 4.16 se puede ver la ubicación del sistema de puesta a tierra, transformador y grupo eléctrico del edificio de Administración Central.

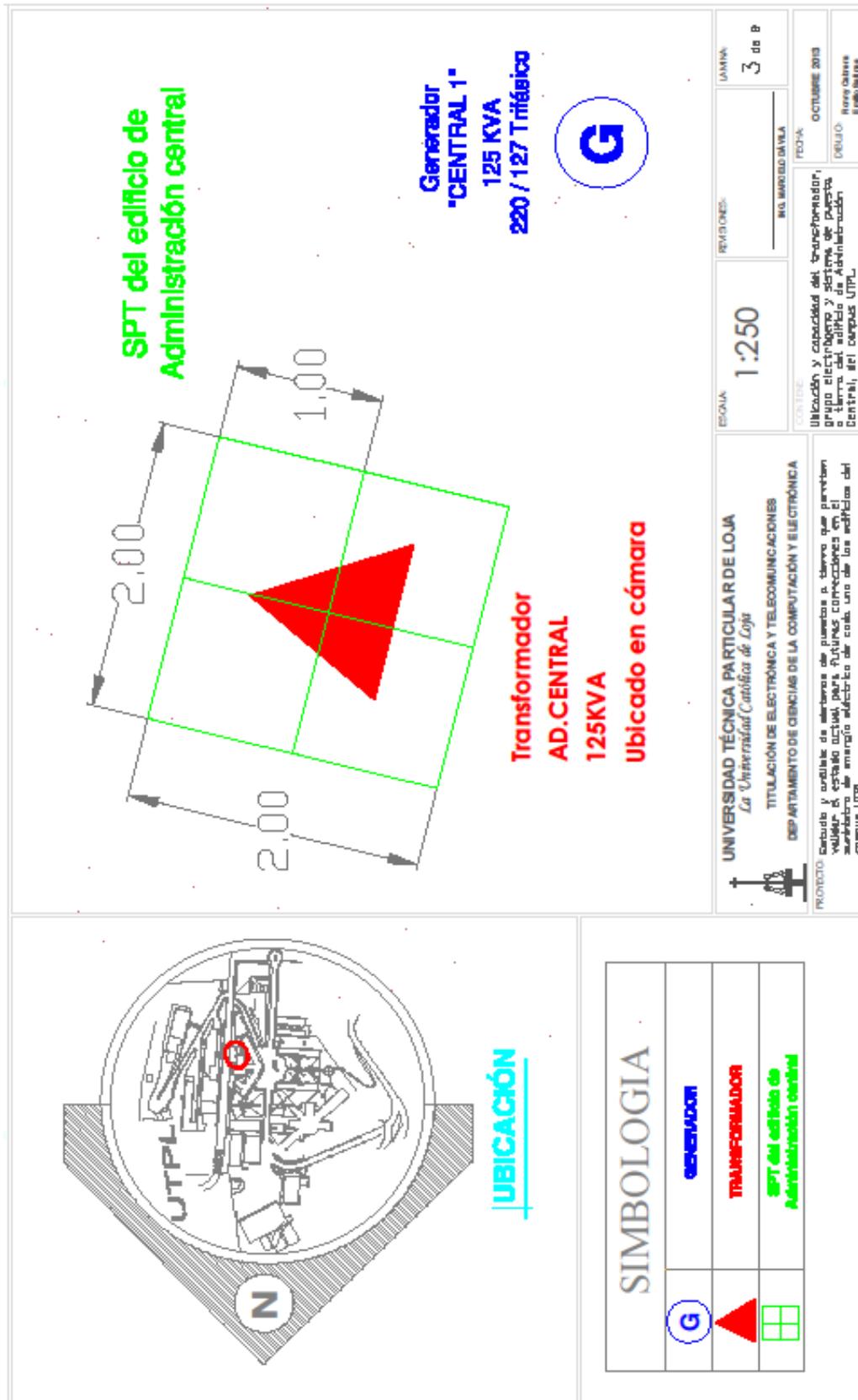


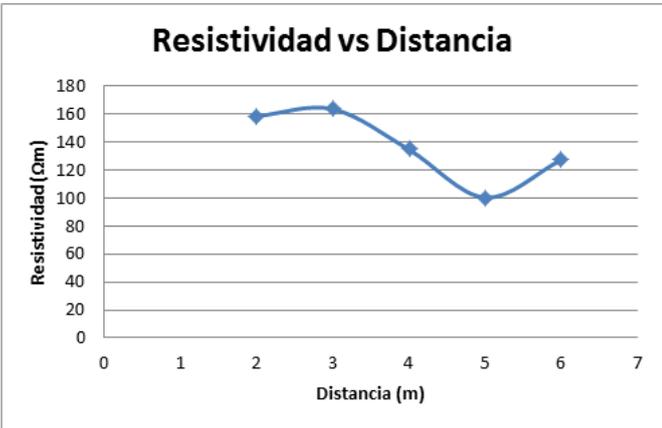
Figura 4.21. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del edificio de Administración Central.

Fuente: Elaborado por los autores.

4.2.3.4. *Ficha técnica de mediciones del edificio de Administración Central.*

En la Tabla 4.5 se resumen las mediciones realizadas en el edificio de Administración Central.

Tabla 4.5. Ficha de mediciones realizadas en el edificio de Administración Central.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones					
Medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra y resistividad del terreno en el campus UTPL							
Datos informativos							
Provincia/Ciudad:		Loja		Hora:		11:30 am	
Fecha:		04/09/2013		Empresa:		UTPL	
Dirección:		San Cayetano Alto		Sitio:		Administración Central	
Detalle del transformador				Detalle del equipo:			
Ubicación	Latitud	70° 00' 02''		Equipo:	Earth/Ground Tester		
	Longitud	95° 58' 92,8'''					
Voltaje	Primario	13,800		Marca:	Fluke 1625		
	Secundario	220/127					
Capacidad del transformador:		125 kVA		Error Intrínseco:		±2%	
Grupo electrógeno:		125 kVA		Error de operación:		±5%	
Medición de resistividad del terreno							
Método de medición:		Método de Wenner		Área del terreno:		A = 8m * 4m = 32m ²	
Nro	Profundidad de picas (m)	Separación de picas (m)	Re (Ω)	Rh (kΩ)	Rs (kΩ)	Resistividad (Ωm)	
1	0.20	2	12,64	3,3	2,9	158,75	
2	0.20	3	8,69	2,9	3,5	163,71	
3	0.20	4	5,36	4,5	1,6	134,69	
4	0.20	5	3,20	4,2	3,6	100,48	
5	0.20	6	3,38	3	5,2	127,35	
							
<p>Figura 4.22. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Edificio de Administración Central. Fuente. Elaborado por los autores</p>							

Resistividad de las capas del suelo			
Capa superficial (ρ_1)	Capa Inferior (ρ_2)	Altura de la capa superficial (h)	
158,75 Ωm	127,35 Ωm	1,07 m	
Medición de resistencia de SPT			
Método de medición	Re (Ω)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)
Método sin estacas	22,3 Ω	48 V	111
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> • La medición de la resistencia de puesta a tierra se la realizó con el método sin estacas, debido al espacio disponible y a que, por seguridad, no se recomienda desconectar las cargas eléctricas para realizar la medición con el método de las 4 puntas. • El valor de resistencia de puesta a tierra no cumple con lo dispuesto por la normativa nacional e internacional, por lo que se deben implementar de inmediato las acciones correctivas en el sistema de puesta a tierra. 			
Responsables de mediciones	Cabrera Ronny Salinas Emilio		

Fuente: Elaborada por los autores.

4.2.3.5. Cálculo de la resistividad del terreno del edificio de Administración Central.

Para aproximar un modelo de suelo de dos capas para el terreno del edificio de Administración central, se sigue el método de Sunde, descrito la metodología de diseño de SPT, en la sección 3.2.1, de la siguiente manera:

a)

Gráfica Resistividad vs Distancia. Ver Figura 4.22.

b)

$\rho_1 = 158,75 \Omega\text{m}$ Resistividad capa superficial

$\rho_2 = 127,35 \Omega\text{m}$ Resistividad de la capa inferior

c)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{127,35}{158,75} = 0,8$$

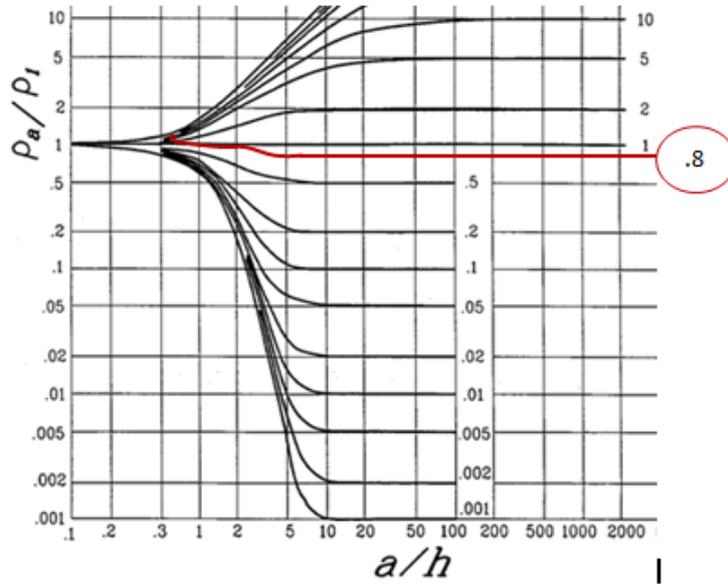


Figura 4.23. Estimación de la relación p_a/p_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Administración Central.

Fuente: Elaborado por los autores.

d)

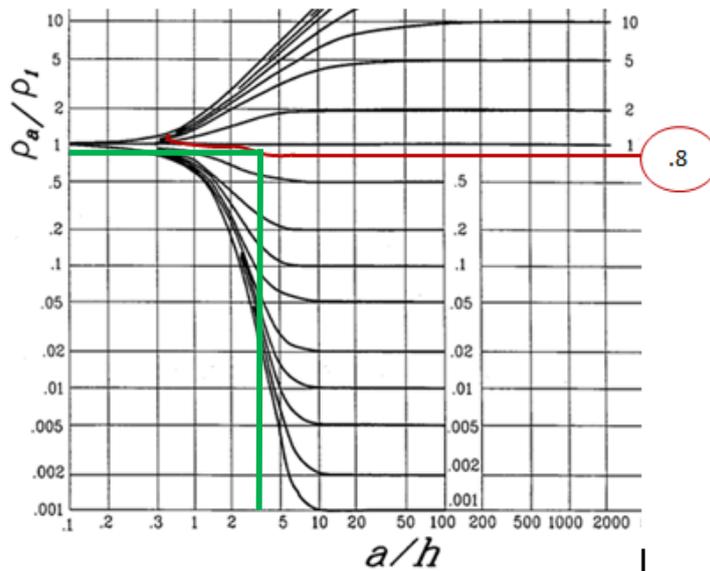


Figura 4.24. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Administración Central.

Fuente: Elaborado por los autores.

e)

$$\frac{a}{h} = 3,5$$

f)

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0,9$$

$$\rho_a = 0,9 * 158,75 = 142,87 \Omega m$$

g)

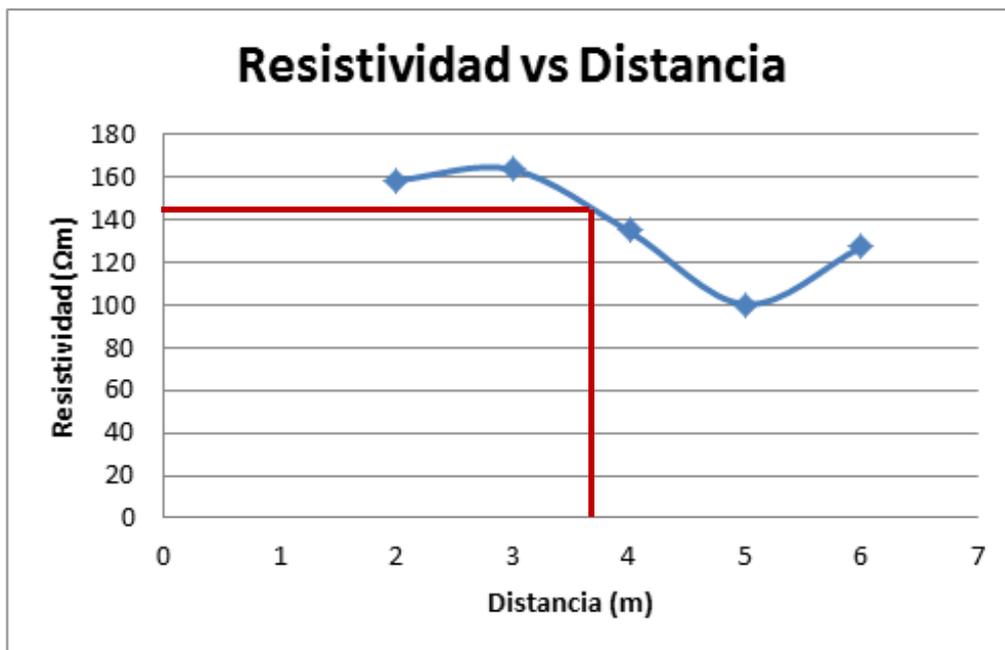


Figura 4.25. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Administración Central.

Fuente: Elaborado por los autores.

$$a = 3,75m$$

h)

$$\frac{a}{h} = 3,5$$

$$h = \frac{3,75}{3,5}$$

$h = 1,07 m$ profundidad de la capa superior

4.2.4. Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado al edificio del Octógono.

4.2.4.1. Antecedentes.

El edificio del Octógono es uno de los edificios más antiguos de la UTPL, el mismo que ha sido sometido a varias remodelaciones, la última completa se realizó en el año 2009 y en la actualidad se encuentra remodelando una de sus alas. En este edificio tenemos las siguientes dependencias: Secretarías de las titulaciones de modalidad abierta y a distancia, Biblioteca, Balcón de servicios, Secretarías, Sucursal Banco de Loja, librería y seguros Hispana.

El Edificio posee un transformador con una capacidad 250kVA, con voltajes primario y secundario equivalentes a 13800 V y 220/127 V respectivamente, ha venido funcionando desde hace 5 años aproximadamente y además de alimentar las cargas del Octógono, alimenta también al polideportivo, museo y canchas deportivas.

Para contrarrestar cortes y fallas eléctricas inesperadas, el edificio cuenta con un grupo electrógeno trifásico de 169 kVA, marca Perkins que funciona desde hace 5 años aproximadamente.

El sistema de puesta a tierra con el que cuenta el edificio, es compartido por grupo electrógeno, el transformador y por las cargas eléctricas del edificio, polideportivo, museo y canchas deportivas.

Las cargas eléctricas que tiene el edificio son: Computadoras, sistema de iluminación (fluorescentes en la mayoría), equipos de aire acondicionado, equipos UPS, ascensor, y sistemas audiovisuales. En el futuro la carga aumentará ya que en la actualidad se encuentran realizando nuevas adaptaciones en una de sus alas, lo que significará un aumento en la carga eléctrica.

4.2.4.2. Estado actual de las instalaciones eléctricas y del SPT.

Las instalaciones eléctricas son relativamente nuevas ya que fueron remodeladas en el año 2009.

El sistema de puesta a tierra actualmente es posee el edificio está formado por una malla ubicada bajo el transformador, y es compartido por las cargas eléctricas del edificio, polideportivo, museo y canchas deportivas. El terreno sobre el que está implementada la malla en su mayor parte está formado por cemento, cubierta por capa de, ocasionando que la resistividad del suelo sea bastante elevada. Además el neutro del sistema se encuentra conectado al sistema de puesta a tierra.

4.2.4.3. Ubicación del SPT del edificio del Octógono.

En la Figura 4.26 se puede ver la ubicación del sistema de puesta a tierra, transformador y grupo electrógeno del edificio del Octógono.

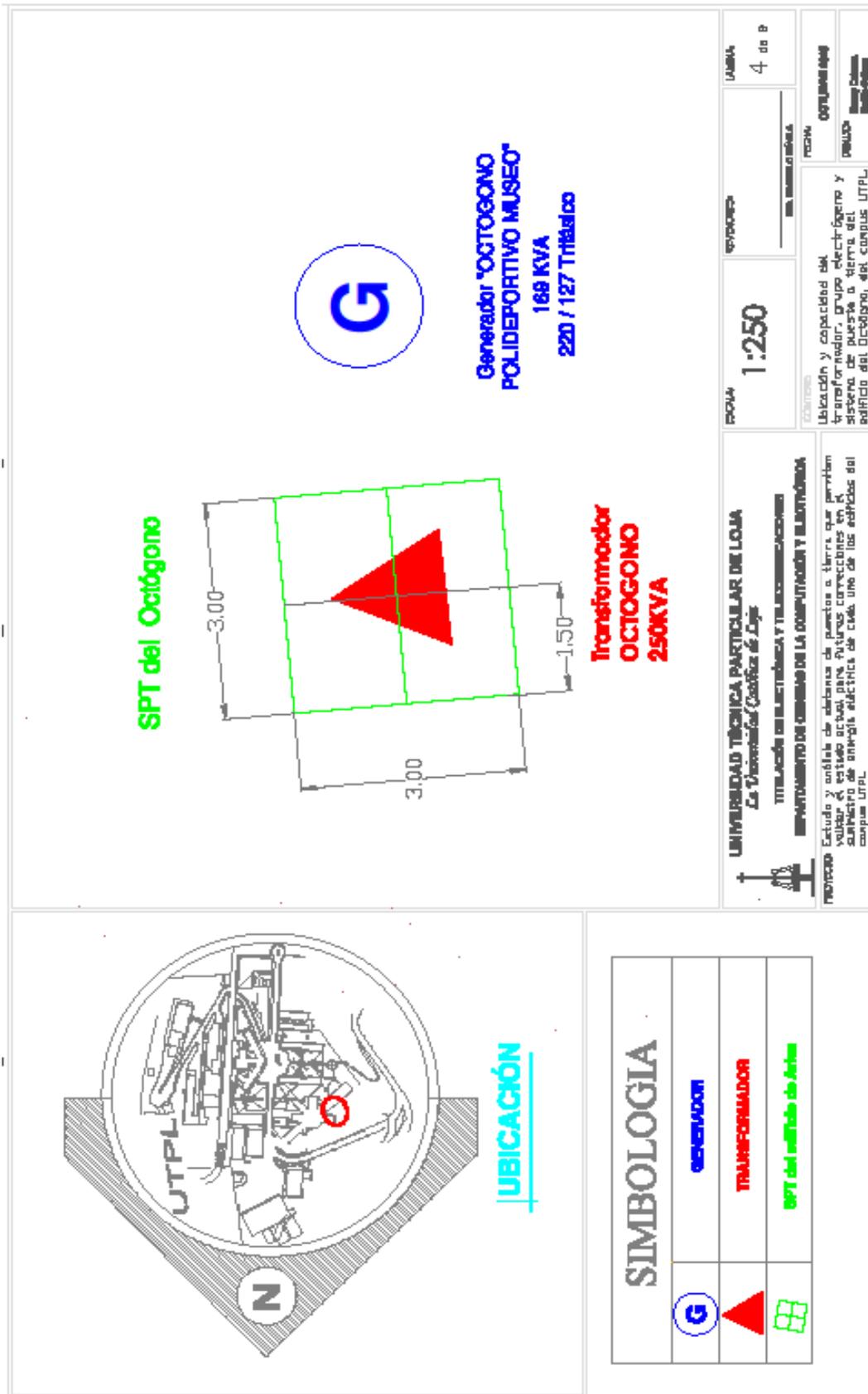


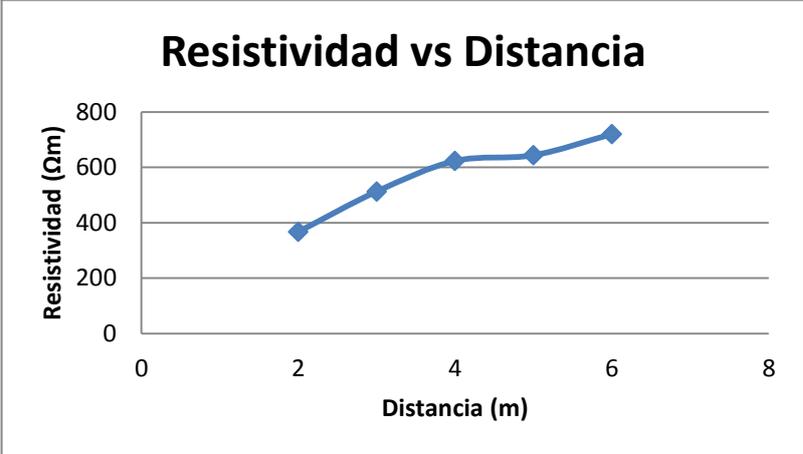
Figura 4.26. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del edificio del Octógono.

Fuente: Elaborado por los autores.

4.2.4.4. Ficha técnica de mediciones del edificio del Octógono.

En la Tabla 4.6 se resumen las mediciones realizadas en el edificio del Octógono.

Tabla 4.6. Ficha de mediciones realizadas en el edificio del Octógono.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones					
Medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra y resistividad del terreno en el campus UTPL							
Datos informativos							
Provincia/Ciudad:		Loja		Hora:		09:15 am	
Fecha:		13/09/2013		Empresa:		UTPL	
Dirección:		San Cayetano Alto		Sitio:		Octógono	
Detalle del transformador				Detalle del equipo:			
Ubicación	Latitud	70° 00' 02"		Equipo:	Earth/Ground Tester		
	Longitud	95° 58' 92,8"					
Voltaje	Primario	13,800		Marca:	Fluke 1625		
	Secundario	220/127					
Capacidad del transformador:		250 kVA		Error Intrínseco:		±2%	
Grupo electrógeno:		169 kVA		Error de operación:		±5%	
Medición de resistividad del terreno							
Método de medición:		Método de Wenner		Área del terreno		A = 6 * 3 = 18m ²	
Nro	Profundidad de picas (m)	Separación de picas (m)	Re (Ω)	Rh (kΩ)	Rs (kΩ)	Resistividad (Ωm)	
1	0.20	2	29,2	7	17,5	266.75	
2	0.20	3	27,2	7,7	13,6	512.448	
3	0.20	4	24,8	7	28,6	622.976	
4	0.20	5	20,5	9,6	6,5	643.7	
5	0.20	6	17,79	6,4	19,1	719.688	
							
<p>Figura 4.27. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Edificio del Octógono.</p> <p>Fuente: Elaborado por los autores.</p>							

Resistividad de las capas del suelo			
Capa superficial (ρ_1)	Capa Inferior (ρ_2)	Altura de la capa superficial (h)	
266,8 Ω m	719,7 Ω m	1,075 m	
Medición de resistencia de SPT			
Método de medición	Re (Ω)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)
Método sin estacas	0.14 Ω	48 V	111
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> • La medición de la resistencia de puesta a tierra se la realizó con el método sin estacas, debido al espacio disponible y a que, por seguridad, no se recomienda desconectar las cargas eléctricas para realizar la medición con el método de las 4 puntas. • Los resultados de las mediciones se consideran valores inconsistentes, posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. 			
Responsables de mediciones	Cabrera Ronny Salinas Emilio		

Fuente: Elaborada por los autores.

4.2.4.5. Cálculo de la resistividad del terreno del Octógono.

Para aproximar un modelo de suelo de dos capas para el terreno del edificio de Unidades productivas, se sigue el método de Sunde, descrito la metodología de diseño de SPT, en la sección 3.2.1, de la siguiente manera:

a)

Gráfica Resistividad vs Distancia. Ver Figura 4.27.

b)

$\rho_1 = 366,75 \Omega$ m Resistividad capa superficial
 $\rho_2 = 719,688 \Omega$ m Resistividad de la capa inferior

c)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{719,688}{266,75} = 1,96$$

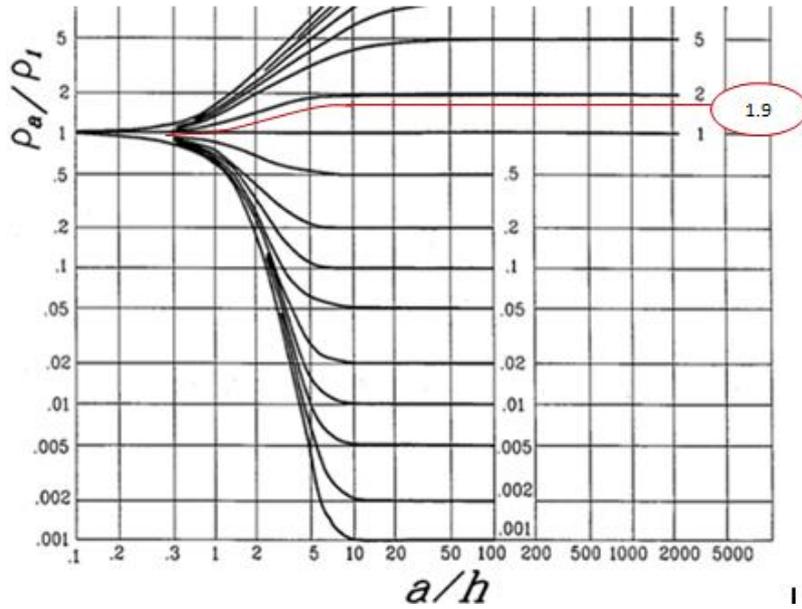


Figura 4.28. Estimación de la relación p_a/p_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio del Octógono.
Fuente: Elaborado por los autores.

d)

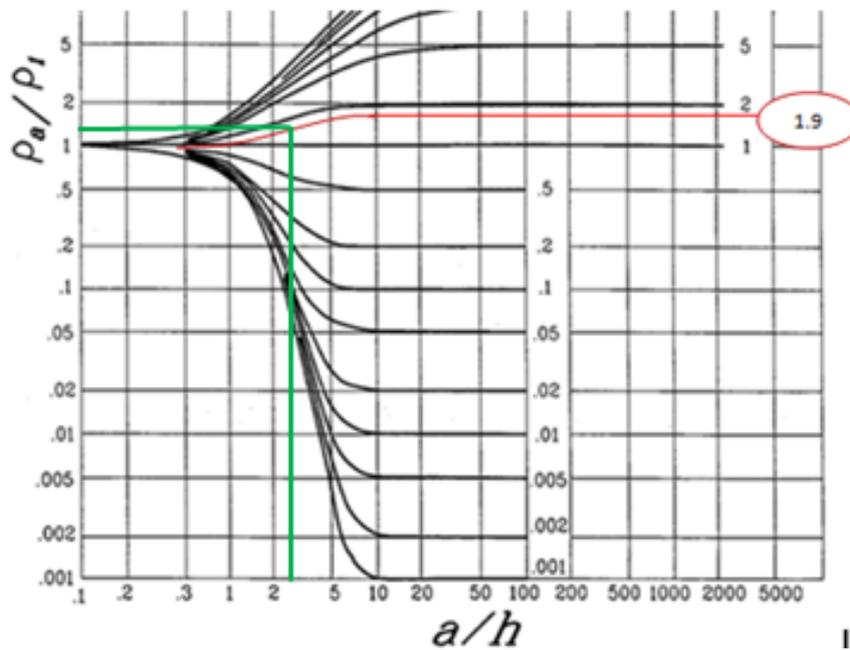


Figura 4.29. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio del Octógono.
Fuente: Elaborado por los autores.

e)

$$\frac{a}{h} = 2,8$$

f)

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1,4$$

$$\rho_a = 1,4 * 366,75 = 513,45 \Omega m$$

g)

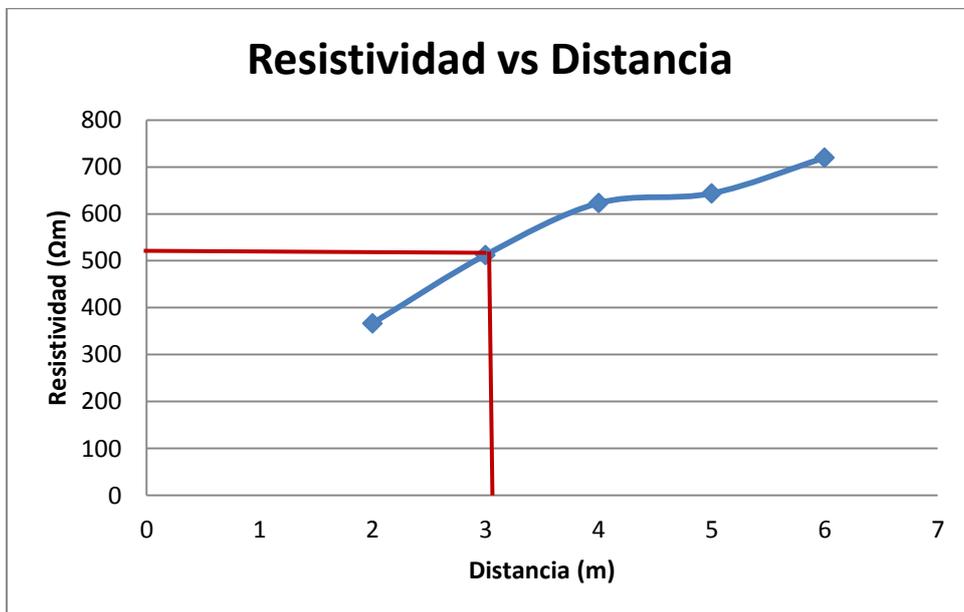


Figura 4.30. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio del Octógono.

Fuente: Elaborado por los autores.

$$a = 3,01m$$

h)

$$\frac{a}{h} = 2,8$$

$$h = \frac{3,01}{2,8}$$

$$h = 1,075 m \quad \text{profundidad de la capa superior}$$

4.2.5. Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado al centro de convenciones.

4.2.5.1. Antecedentes.

La malla de puesta a tierra ubicada en la parte posterior de la Planta del CEDIB es compartida por dos transformadores, uno de ellos suministra energía eléctrica al centro de convenciones, a la editorial EdiLoja y al CEDIB, y el otro transformador suministra energía eléctrica al sistema de aire acondicionado del centro de convenciones.

El transformador que suministra energía eléctrica al CEDIB, EdiLoja y al centro de convenciones, posee una capacidad de 200 kVA. El transformador que suministra energía eléctrica al sistema de aire acondicionado del centro de convenciones, posee una capacidad de 112.5 kVA. Los dos transformadores son trifásicos, con un voltaje primario de 13800 V y un voltaje secundario de 220/110 V, y han venido funcionando por aproximadamente 11 años.

Para evitar cortes de energía eléctrica en las instalaciones, se cuenta con un Sistema de Emergencia dotado por un Grupo Electrónico de 170 kVA, marca Jhon Deere, que ha venido funcionando por aproximadamente 11 años.

El sistema de puesta a tierra de las instalaciones está ubicado debajo los transformadores, tiene un área aproximada de 9 m² y es compartido por los dos transformadores, el grupo electrónico y el tablero de distribución. El sistema de puesta a tierra ha venido funcionando aproximadamente 11 años.

El centro de convenciones, EdiLoja y el CEDIB poseen las siguientes cargas eléctricas: Computadoras, sistema de iluminación en su mayoría fluorescente, equipos de aire acondicionado, equipos UPS, sistemas de proyección audiovisual, centro de copiado, sistemas de impresión, y sistemas producción y distribución de textos.

4.2.5.2. Estado actual de las instalaciones eléctricas y del SPT.

Las instalaciones eléctricas del centro de convenciones y de la editorial CEDIB fueron remodeladas hace 11 años y se encuentran en buen estado.

El sistema de puesta a tierra de las instalaciones está ubicado debajo los transformadores, tiene un área aproximada de 9 m² y es compartido por los dos transformadores, el grupo electrógeno y el tablero de distribución. El sistema de puesta a tierra está compuesto por una malla, y tres varillas (una para cada transformador y otra para el grupo electrógeno). La malla ha sido instalada aproximadamente hace 11 años y en su instalación tuvo tratamiento de suelo y suelda exotérmica.

4.2.5.3. Ubicación del SPT del centro de convenciones.

En la Figura 4.26 se puede ver la ubicación del sistema de puesta a tierra, transformador y grupo electrógeno del edificio del Centro de convenciones.

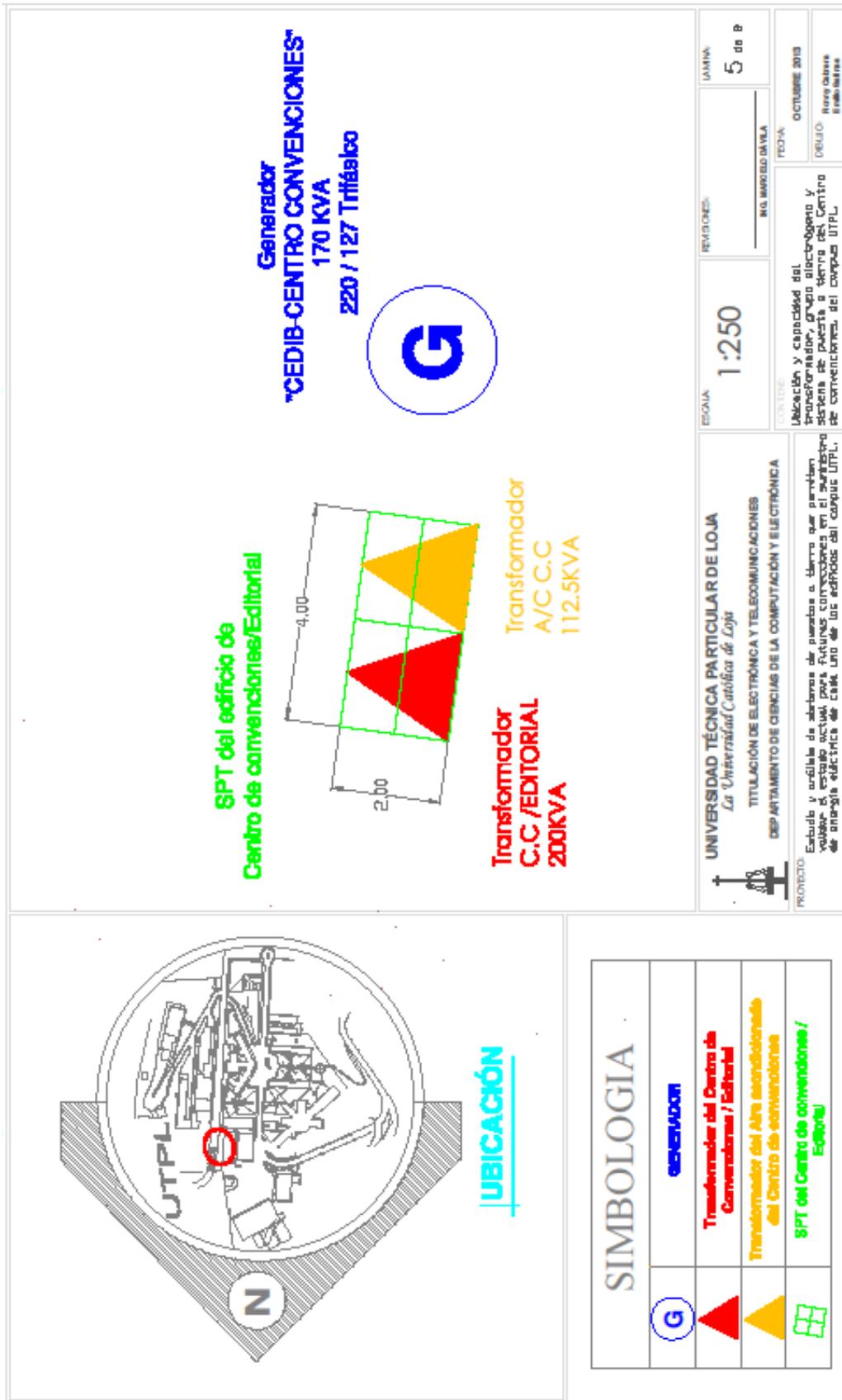


Figura 4.31. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno del centro de convenciones.

Fuente: Elaborado por los autores.

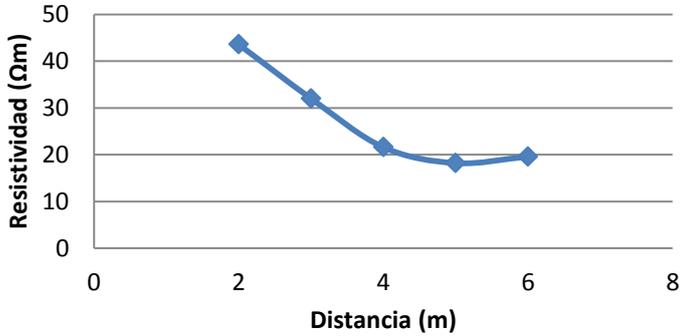
4.2.5.4. Ficha técnica de mediciones del Centro de convenciones.

En la Tabla 4.7 se resumen las mediciones realizadas en el edificio del centro de convenciones.

Tabla 4.7. Ficha de mediciones realizadas en el Centro de convenciones.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones				
Medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra y resistividad del terreno en el campus UTPL						
Datos informativos						
Provincia/Ciudad:		Loja		Hora: 09:45 am		
Fecha:		13/09/2013		Empresa: UTPL		
Dirección:		San Cayetano Alto		Sitio: Centro de convenciones/CEDIB		
Detalle del transformador			Detalle del equipo:			
Ubicación	Latitud	70° 00' 02"		Equipo:	Earth/Ground Tester	
	Longitud	95° 58' 92,8"				
Voltaje	Primario	13,800		Marca:	Fluke 1625	
	Secundario	220/127				
Capacidad del transformador:		Transf. 1: 200 kVA		Error Intrínseco:	±2%	
		Transf. 2: 112.5 kVA				
Grupo electrógeno:		170 kVA		Error de operación:	±5%	
Medición de resistividad del terreno						
Método de medición:		Método de Wenner		Área del terreno		A = 5 * 10 = 50 m ²
Nro	Profundidad de picas (m)	Separación de picas (m)	Re (Ω)	Rh (kΩ)	Rs (kΩ)	Resistividad (Ωm)
1	0.20	2	3,47	0,7	0,9	43,58
2	0.20	3	1,7	0,7	0,8	32,02
3	0.20	4	0,86	1,2	0,3	21,60
4	0.20	5	0,58	0,9	0,4	18,21
5	0.20	6	0,52	0,8	0,7	19,59

Resistividad vs Distancia



Distancia (m)	Resistividad (Ωm)
2	43,58
3	32,02
4	21,60
5	18,21
6	19,59

Figura 4.32. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - CC.
Fuente: Elaborado por los autores.

Resistividad de las capas del suelo			
Capa superficial (ρ_1)	Capa Inferior (ρ_2)	Altura de la capa superficial (h)	
43,58 Ωm	19,59 Ωm	1,64 m	
Medición de resistencia de SPT			
Método de medición	Re (Ω)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)
Método sin estacas	0,139 Ω	48 V	111
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> • La medición de la resistencia de puesta a tierra se la realizó con el método sin estacas, debido al espacio disponible y a que, por seguridad, no se recomienda desconectar las cargas eléctricas para realizar la medición con el método de las 4 puntas. • Los resultados de las mediciones se consideran valores inconsistentes, posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. 			
Responsables de mediciones		Cabrera Ronny Salinas Emilio	

Fuente: Elaborada por los autores.

4.2.5.5. Cálculo de la resistividad del terreno del Centro de convenciones.

Para aproximar un modelo de suelo de dos capas para el terreno del edificio de Unidades productivas, se sigue el método de Sunde, descrito la metodología de diseño de SPT, en la sección 3.2.1, de la siguiente manera:

a)

Gráfica Resistividad vs Distancia. Ver Figura 4.32.

b)

$\rho_1 = 43,58 \Omega\text{m}$ Resistividad capa superficial
 $\rho_2 = 19,59 \Omega\text{m}$ Resistividad de la capa inferior

c)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{19,59}{43,58} = 0,44$$

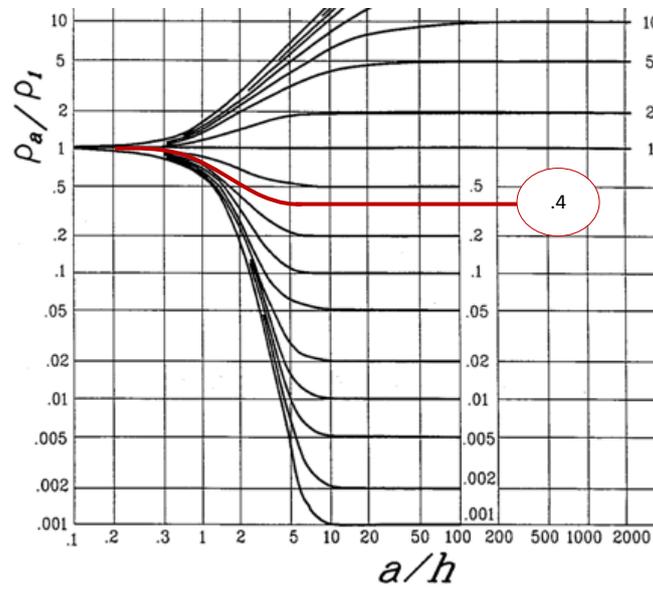


Figura 4.33. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del centro de convenciones.

Fuente: Elaborado por los autores.

d)

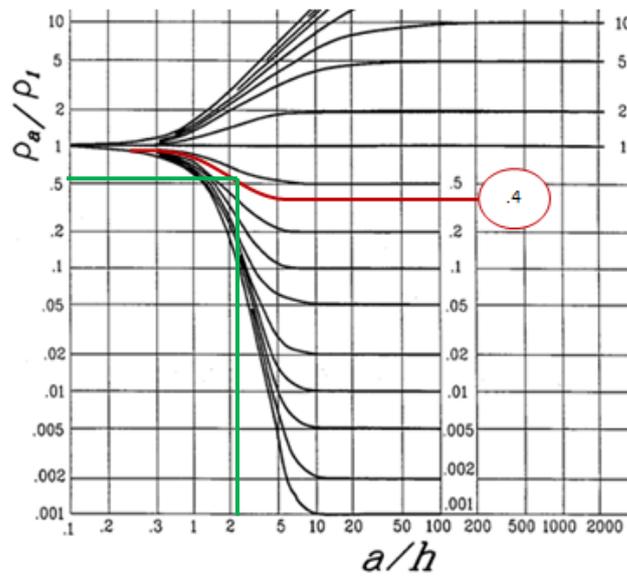


Figura 4.34. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del centro de convenciones.

Fuente: Elaborado por los autores.

e)

$$\frac{a}{h} = 2,5$$

f)

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0,5$$

$$\rho_a = 0,5 * 43,58 \Omega\text{m} = 21,79 \Omega\text{m}$$

g)

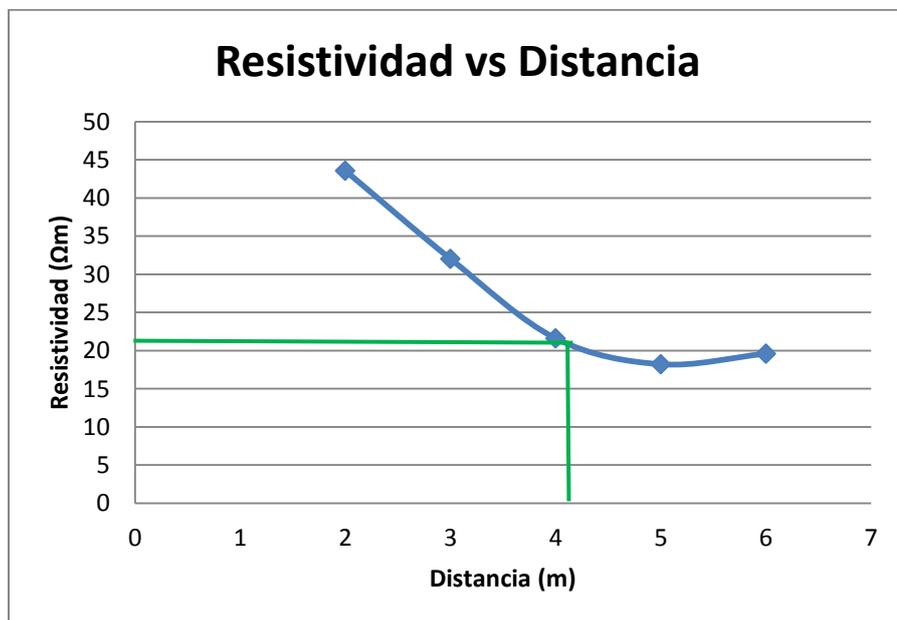


Figura 4.35. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio del centro de convenciones.

Fuente: Elaborado por los autores.

$$a = 4,1\text{m}$$

h)

$$\frac{a}{h} = 2,5$$

$$h = \frac{4.1}{2.5}$$

$$h = 1,64\text{m} \quad \text{profundidad de la capa superior}$$

4.2.6. Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado a la Cafetería.

4.2.6.1. Antecedentes.

El edificio de la cafetería se ha venido remodelando proporcionalmente según ha sido el crecimiento de la Universidad, la última remodelación en el aspecto eléctrico se realizó en el año 2004. En la cafetería posee las siguientes dependencias: oficina, área de cocina y patio de comidas.

La cafetería posee un transformador marca Inatra de 75 kVA, con voltajes primario y secundario equivalentes a 13800 V y 220/127 V respectivamente, ha venido funcionando desde hace 9 años aproximadamente. Para contrarrestar cortes y fallas eléctricas inesperadas, el edificio cuenta con un grupo electrógeno trifásico, de 170 kVA, marca Mercedes Benz, el cual es compartido con el edificio de Modalidad abierta, y viene funcionando igualmente 9 años.

No existe información exacta sobre el sistema de puesta a tierra de la cafetería, por lo que se supone que se encuentra bajo el transformador, y es compartido por las cargas de la cafetería, el grupo electrógeno y el mismo transformador.

Las cargas eléctricas que tiene la cafetería son: Computadoras, sistema de iluminación HQ, fluorescentes e incandescentes, hornos, motores, y cocinas y refrigeradores industriales.

4.2.6.2. Estado actual de las instalaciones eléctricas y del SPT.

Las instalaciones eléctricas son relativamente nuevas ya que fueron remodeladas en el año 2009. El sistema de puesta tierra con el que cuenta la Cafetería tiene un área aproximada de 12 m² y se encuentra bajo el transformador.

4.2.6.3. Ubicación del SPT de la Cafetería.

En la Figura 4.35 se puede ver la ubicación del sistema de puesta a tierra, transformador y grupo electrógeno de la Cafetería de la UTPL.

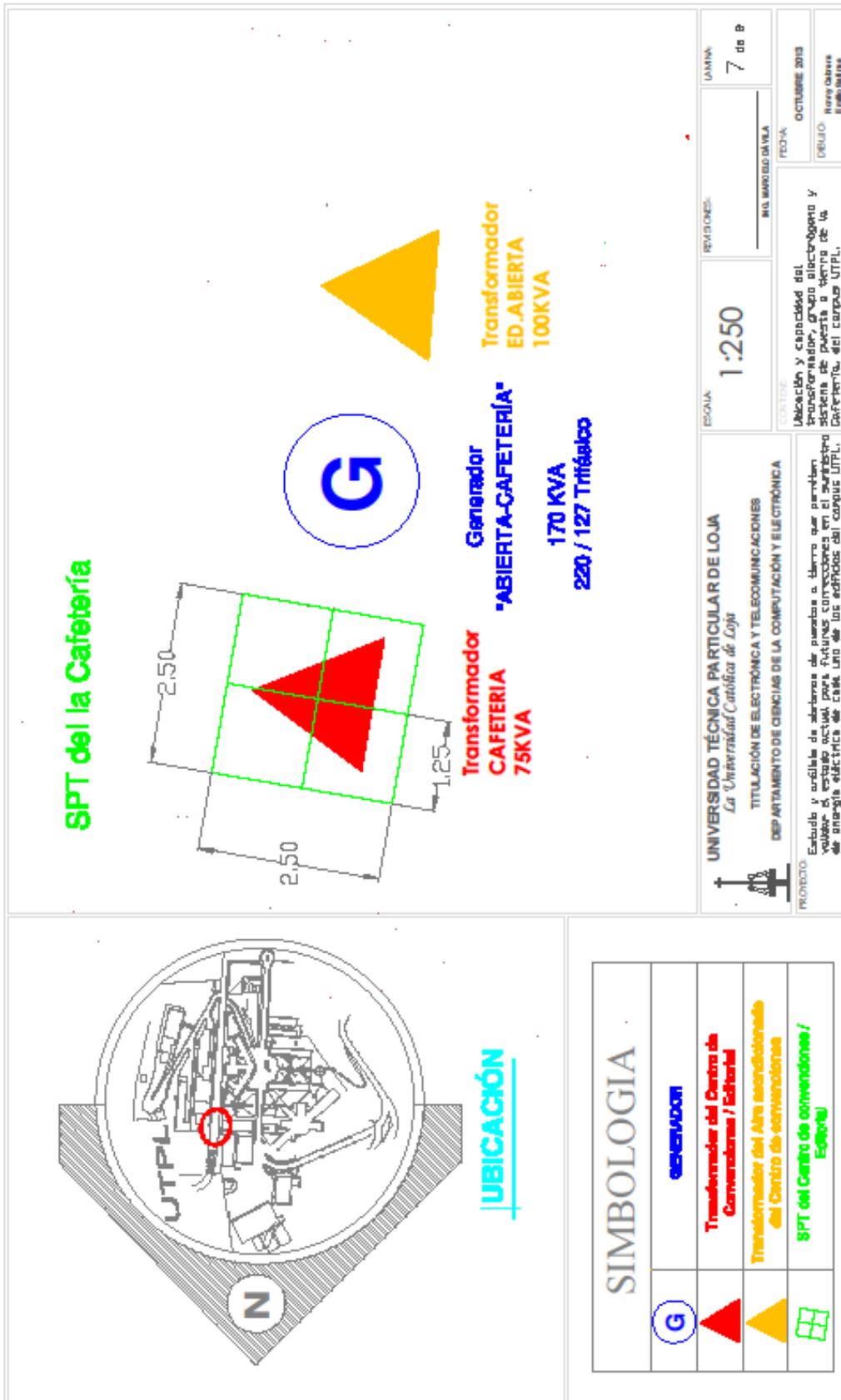


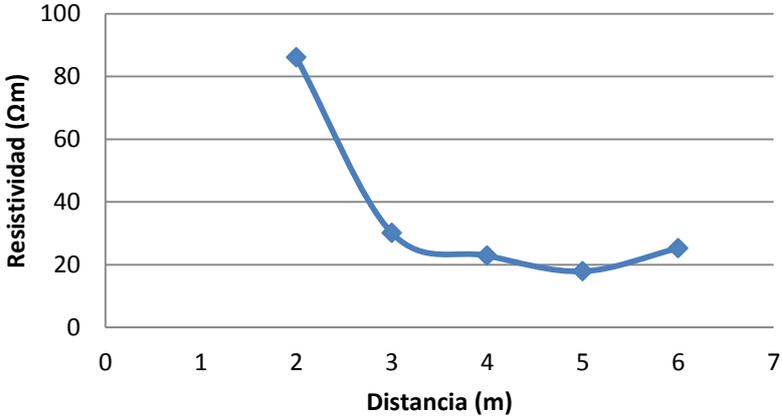
Figura 4.36. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno de la Cafetería.

Fuente: Elaborado por los autores.

4.2.6.4. Ficha técnica de mediciones del edificio de la Cafetería.

En la Tabla 4.8 se resumen las mediciones realizadas en la Cafetería.

Tabla 4.8. Ficha de mediciones realizadas en la Cafetería.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones				
Medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra y resistividad del terreno en el campus UTPL						
Datos informativos						
Provincia/Ciudad:		Loja		Hora:		09:00 am
Fecha:		13/09/2013		Empresa:		UTPL
Dirección:		San Cayetano Alto		Sitio:		Cafetería
Detalle del transformador				Detalle del equipo:		
Ubicación	Latitud	70° 00' 02"		Equipo:	Earth/Ground Tester	
	Longitud	95° 58' 92,8"				
Voltaje	Primario	13,800		Marca:	Fluke 1625	
	Secundario	220/127				
Capacidad del transformador:		Transf. 1: 200 kVA		Error Intrínseco:	±2%	
		Transf. 2: 112.5 kVA				
Grupo electrógeno:		170 kVA		Error de operación:	±5%	
Medición de resistividad del terreno						
Método de medición:		Método de Wenner		Área del terreno		A = 5 * 10 = 50 m ²
Nro	Profundidad de picas (m)	Separación de picas (m)	Re (Ω)	Rh (kΩ)	Rs (kΩ)	Resistividad (Ωm)
1	0.20	2	6,85	1,5	0,7	86,03
2	0.20	3	1,6	0,5	1,6	30,14
3	0.20	4	0,91	1,5	1,5	22,85
4	0.20	5	0,57	0,8	3,7	17,89
5	0.20	6	0,67	0,7	1,4	25,24
Resistividad vs Distancia						
						
<p>Figura 4.37. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Cafetería. Fuente: Elaborado por los autores.</p>						

Resistividad de las capas del suelo			
Capa superficial (ρ_1)	Capa Inferior (ρ_2)	Altura de la capa superficial (h)	
86,03 Ω m	25,24 Ω m	1,14 m	
Medición de resistencia de SPT			
Método de medición	Re (Ω)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)
Método sin estacas	Tablero Principal = 0,517 Ω Generador = 0,019 Ω Tablero de transformador = 0,036 Ω Transformador = 13,21 Ω	48 V	111
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> La medición de la resistencia de puesta a tierra se la realizó con el método sin estacas, debido al espacio disponible y a que, por seguridad, no se recomienda desconectar las cargas eléctricas para realizar la medición con el método de las 4 puntas. Los resultados de las mediciones se consideran valores inconsistentes, posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. 			
Responsables de mediciones	Cabrera Ronny Salinas Emilio		

Fuente: Elaborada por los autores.

4.2.6.5. Cálculo de la resistividad del terreno de la Cafetería.

Para aproximar un modelo de suelo de dos capas para el terreno del edificio de la Cafetería, se sigue el método de Sunde, descrito la metodología de diseño de SPT, en la sección 3.2.1, de la siguiente manera:

a)

Gráfica Resistividad vs Distancia. Ver Figura 4.37.

b)

$\rho_1 = 86,03 \Omega$ m Resistividad capa superficial

$\rho_2 = 25,24 \Omega$ m Resistividad de la capa inferior

c)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{25,24}{86,03} = 0,29$$

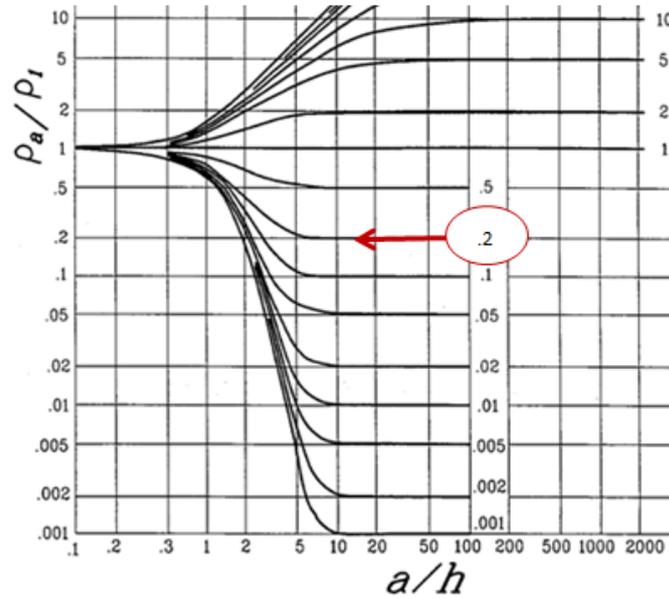


Figura 4.38. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la cafetería.

Fuente: Elaborado por los autores.

d)

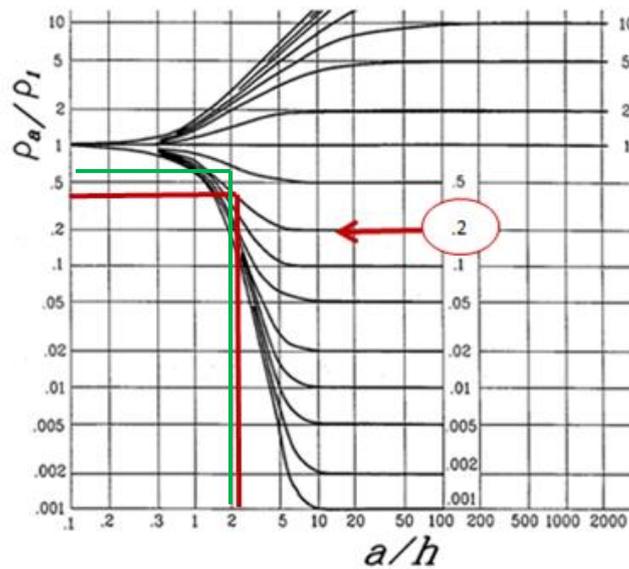


Figura 4.39. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la cafetería.

Fuente: Elaborado por los autores.

e)

$$\frac{a}{h} = 2,5$$

f)

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0,4$$

$$\rho_a = 0,4 * 86,03 = 34,41\Omega m$$

g)

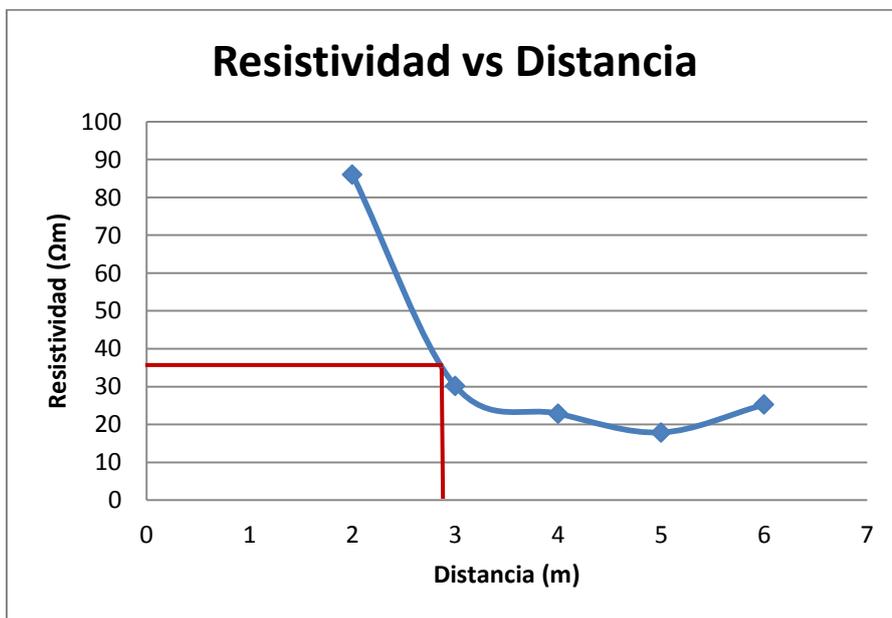


Figura 4.40. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la Cafetería.

Fuente: Elaborado por los autores.

$$a = 2,85m$$

h)

$$\frac{a}{h} = 2,5$$

$$h = \frac{2,85}{2,5}$$

$$h = 1,14m \quad \text{profundidad de la capa superior}$$

4.2.7. Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado al edificio de Laboratorios.

4.2.7.1. Antecedentes.

El edificio de Laboratorios, es un área muy importante dentro de la Universidad y está muy bien abastecido con equipos de instrumentación del área biológica y médica, utilizados para la investigación y la práctica de estudiantes y docentes de dicha área. Su última remodelación total fue en el año 2011.

Este edificio posee un transformador marca Inatra de 250 kVA, con voltajes primario y secundario equivalentes a 13800 V y 220/127 V respectivamente, ha venido funcionando desde hace 3 años aproximadamente. Para contrarrestar cortes y fallas eléctricas inesperadas, el edificio cuenta con un grupo electrógeno trifásico de 300 kVA, marca Perkins, que ha venido funcionando aproximadamente 3 años.

El sistema de puesta a tierra del edificio es una malla, ubicada bajo el transformador y tiene aproximadamente 3 años de funcionamiento.

Las cargas eléctricas que tiene el edificio son: equipos de aclimatación, equipos de extracción de olores, aire acondicionado, extractor de olores, computadores, sistemas contra incendio, circuito cerrado de TV, acceso de personal, equipos de investigación, y lámparas fluorescentes.

4.2.7.2. Estado actual de las instalaciones eléctricas y del SPT.

Las instalaciones eléctricas tuvieron su última remodelación en el año 2009, por lo que se encuentran en muy buen estado y no han presentad problema alguno. El sistema de puesta a tierra del edificio es una malla, ubicada bajo el transformador y tiene aproximadamente 3 años de funcionamiento. Para su instalación se realizó tratamiento de suelo con cemento GEM, se utilizó suelda exotérmica en cada unión y su área es de 3 metros x 3 metros.

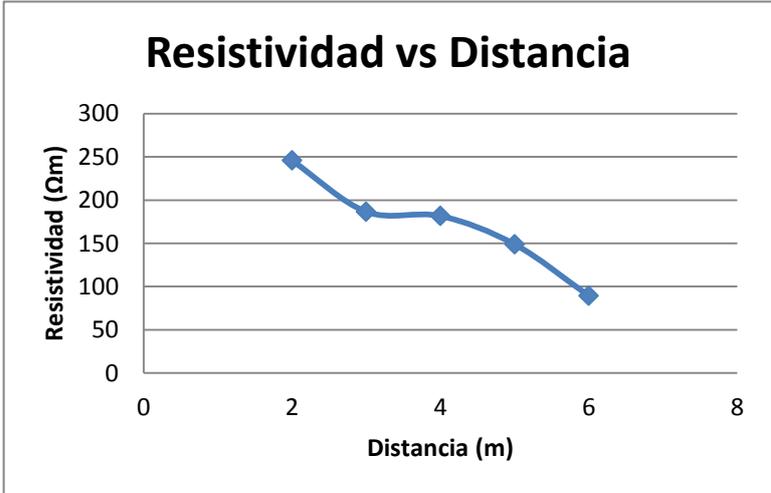
4.2.7.3. Ubicación del SPT del edificio de Laboratorios.

En la Figura 4.41 se puede ver la ubicación del sistema de puesta a tierra, transformador y grupo electrógeno del edificio de Laboratorios.

4.2.7.4. Ficha técnica de mediciones del edificio de Laboratorios.

En la Tabla 4.9 se resumen las mediciones realizadas en el edificio de Laboratorios.

Tabla 4.9. Ficha de mediciones realizadas en el edificio de Laboratorios.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones					
Medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra y resistividad del terreno en el campus UTPL							
Datos informativos							
Provincia/Ciudad:		Loja		Hora:		11:30 am	
Fecha:		13/09/2013		Empresa:		UTPL	
Dirección:		San Cayetano Alto		Sitio:		Edificio de Laboratorios.	
Detalle del transformador				Detalle del equipo:			
Ubicación	Latitud	70° 00' 02"		Equipo:	Earth/Ground Tester		
	Longitud	95° 58' 92,8"					
Voltaje	Primario	13,800		Marca:	Fluke 1625		
	Secundario	220/127					
Capacidad del transformador:		250 kVA		Error Intrínseco:		±2%	
Grupo electrógeno:		300 kVA		Error de operación:		±5%	
Medición de resistividad del terreno							
Método de medición:		Método de Wenner		Área del terreno		A = 6 * 3 = 18m ²	
Nro	Profundidad de picas (m)	Separación de picas (m)	Re (Ω)	Rh (kΩ)	Rs (kΩ)	Resistividad (Ωm)	
1	0.20	2	19,56	2,8	1,2	245,67	
2	0.20	3	9,90	2,2	2,3	186,51	
3	0.20	4	7,23	2	0,8	181,61	
4	0.20	5	4,74	3,4	2,5	148,83	
5	0.20	6	2,37	3	1	89,30	
							
<p>Figura 4.42. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Edificio de Laboratorios.</p> <p>Fuente: Elaborado por los autores.</p>							

Resistividad de las capas del suelo			
Capa superficial (ρ_1)	Capa Inferior (ρ_2)	Altura de la capa superficial (h)	
245,67 Ωm	89,3 Ωm	3,28 m	
Medición de resistencia de SPT			
Método de medición	Re (Ω)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)
Método sin estacas	Resistencia del Generador 3,74	48 V	111
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> La medición de la resistencia de puesta a tierra se la realizó con el método sin estacas, debido al espacio disponible y a que, por seguridad, no se recomienda desconectar las cargas eléctricas para realizar la medición con el método de las 4 puntas. Los resultados de las mediciones se consideran valores inconsistentes, posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. 			
Responsables de mediciones	Cabrera Ronny Salinas Emilio		

Fuente: Elaborada por los autores.

4.2.7.5. Cálculo de la resistividad del terreno del edificio de Laboratorios.

Para aproximar un modelo de suelo de dos capas para el terreno del edificio de Laboratorios, se sigue el método de Sunde, descrito la metodología de diseño de SPT, en la sección 3.2.1, de la siguiente manera:

a)

Gráfica Resistividad vs Distancia. Ver Figura 4.42.

b)

$\rho_1 = 245,67 \Omega\text{m}$ Resistividad capa superficial

$\rho_2 = 89,30 \Omega\text{m}$ Resistividad de la capa inferior

c)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{89,30}{245,67} = 0,90$$

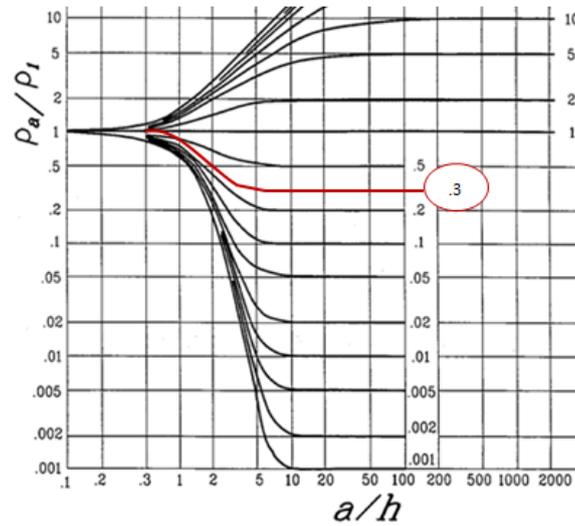


Figura 4.43. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Laboratorios.

Fuente: Elaborado por los autores.

d)

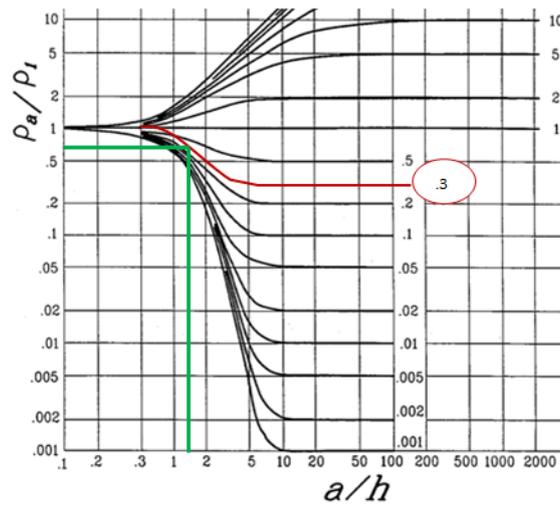


Figura 4.44. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Laboratorios.

Fuente: Elaborado por los autores.

e)

$$\frac{a}{h} = 1,4$$

f)

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0,7$$

$$\rho_a = 0,7 * 245,67 \Omega\text{m} = 171,96 \Omega\text{m}$$

g)

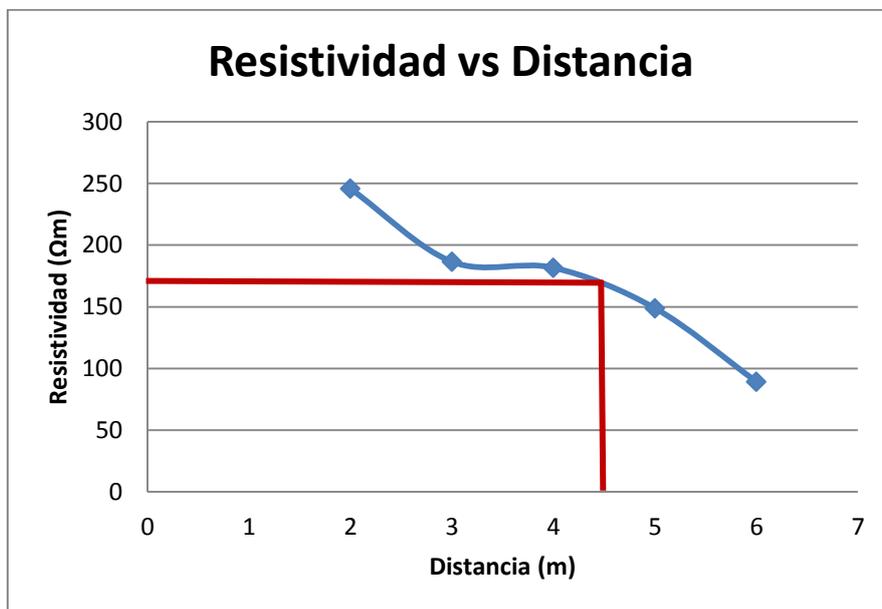


Figura 4.45. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno del edificio de Laboratorios.

Fuente: Elaborado por los autores.

$$a = 4,6 \text{ m}$$

h)

$$\frac{a}{h} = 1,4$$

$$h = \frac{4,6}{1,4}$$

$$h = 3,28 \text{ m} \quad \text{profundidad de la capa superior}$$

4.2.8. Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado a la Planta ECOLAC.

4.2.8.1. Antecedentes.

La planta de lácteos ECOLAC se dedica a la producción de leche pasteurizada una variedad de quesos, así como crema y yogurt. La planta de lácteos ECOLAC inició sus actividades productivas como planta piloto en 1983, teniendo importantes incrementos en su capacidad de producción en 1985 y 1997.

Actualmente el edificio posee un transformador de 300 kVA, con un voltaje primario de 13800 V y un voltaje secundario de 220/110 V, este transformador fue instalado hace un año, reemplazando a un transformador de 75 kVA que funcionaba desde el inicio de operaciones de la planta. Éste transformador abastece de energía eléctrica a la planta de lácteos ECOLAC, el Instituto de Química Aplicada y el Laboratorio de industrias. Para evitar cortes de energía eléctrica en la planta, éste cuenta con un Sistema de Emergencia dotado por un Grupo Electrónico de 100 kVA, marca Deutz, que viene funcionando desde aproximadamente 30 años.

La malla de puesta a tierra fue instalada hace un año aproximadamente, tiene un área de 12m², y en su instalación recibió tratamiento de suelo y soldadura exotérmica. El transformador que abastece a la planta ECOLAC posee las siguientes cargas: computadores, sistemas de iluminación fluorescente, lámparas de vapor de mercurio, motores de CA, sistemas de enfriamiento, chillers, calderos, sistemas de instrumentación y control.

4.2.8.2. Estado actual de las instalaciones eléctricas y del SPT.

Las instalaciones eléctricas de Unidades productivas fueron remodeladas en el año 2009 y se encuentran en buen estado, no han presentado problema hasta la actualidad. El sistema de puesta a tierra de la planta ECOLAC fue colocado hace un año, instalando una malla de puesta a tierra de 4mx3m. En su instalación se dio tratamiento de suelo y se realizó la malla con suelda exotérmica.

4.2.8.3. Ubicación del SPT de la Planta ECOLAC.

En la Figura 4.46 se puede ver la ubicación del sistema de puesta a tierra, transformador y grupo electrónico del edificio de Laboratorios.

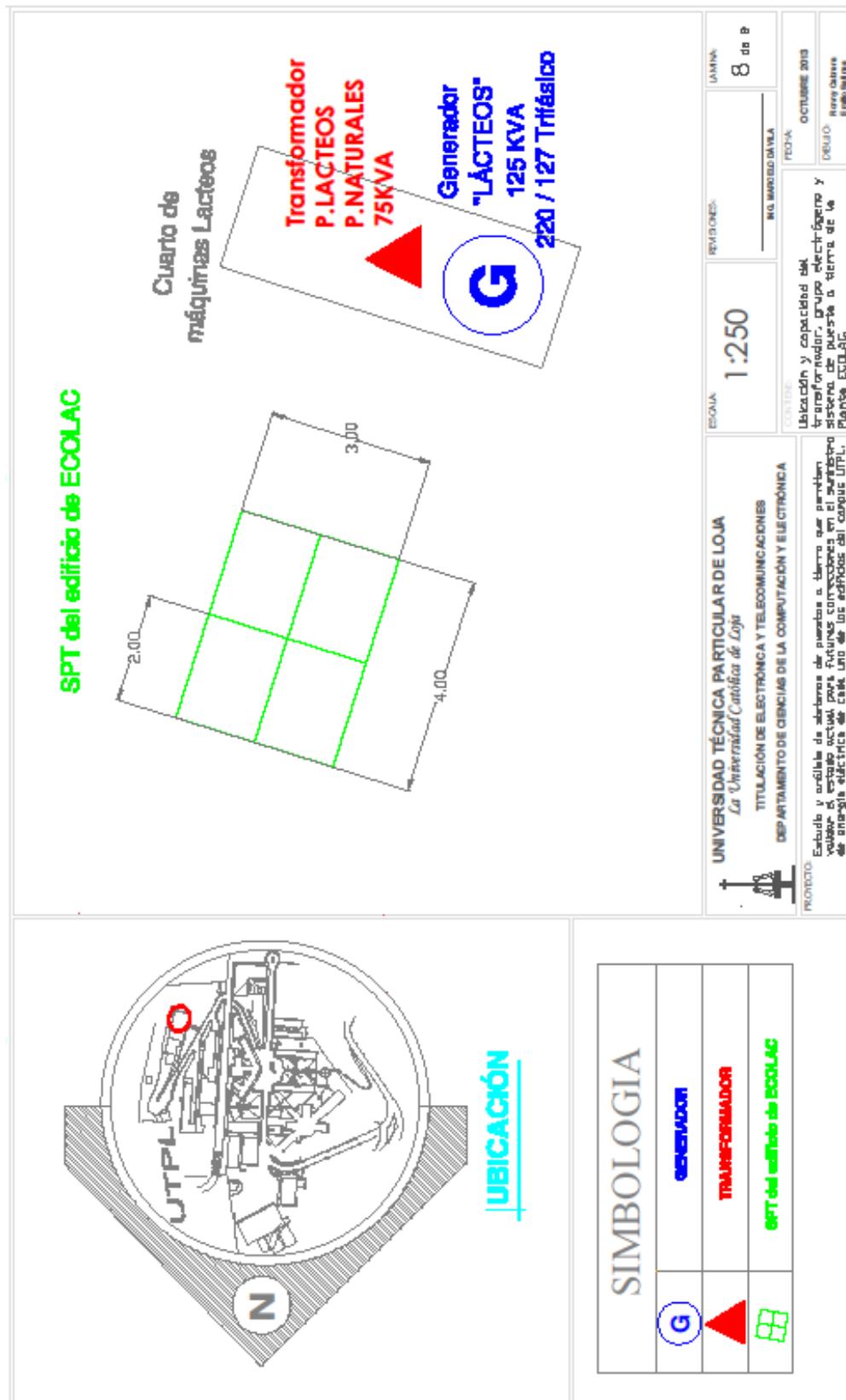


Figura 4.46. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno de la Planta ECOLAC.

Fuente: Elaborado por los autores.

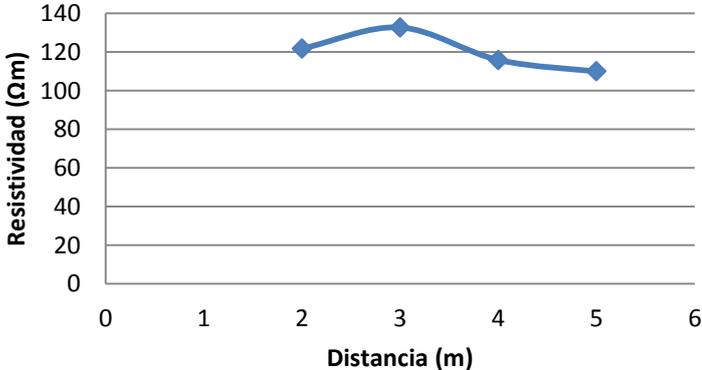
4.2.8.4. Ficha técnica de mediciones de la planta ECOLAC.

En la Tabla 4.10 se resumen las mediciones realizadas en la planta ECOLAC.

Tabla 4.10. Ficha de mediciones realizadas en la planta ECOLAC.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones				
Medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra y resistividad del terreno en el campus UTP						
Datos informativos						
Provincia/Ciudad:		Loja		Hora:		11:00 am
Fecha:		13/09/2013		Empresa:		UTPL
Dirección:		San Cayetano Alto		Sitio:		ECOLAC
Detalle del transformador				Detalle del equipo:		
Ubicación	Latitud	70° 00' 02"		Equipo:	Earth/Ground Tester	
	Longitud	95° 58' 92,8"			Marca:	Fluke 1625
Voltaje	Primario	13,800		Error Intrínseco: ±2%		
	Secundario	220/127		Error de operación: ±5%		
Capacidad del transformador:		300 kVA				
Grupo electrógeno:		100 kVA				
Medición de resistividad del terreno						
Método de medición:		Método de Wenner		Área del terreno		A = 8 * 6 = 48 m ²
Nro	Profundidad de picas (m)	Separación de picas (m)	Re (Ω)	Rh (kΩ)	Rs (kΩ)	Resistividad (Ωm)
1	0.20	2	9,69	1,4	4,3	121,7
2	0.20	3	7,04	5,8	4	132,63
3	0.20	4	4,61	7	4,5	115,8
4	0.20	5	3,50	6.5	7	109,9

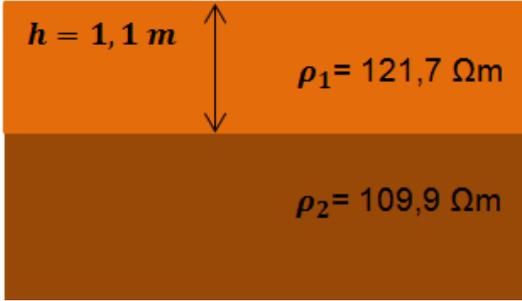
Resistividad vs Distancia



Distancia (m)	Resistividad (Ωm)
2	121,7
3	132,63
4	115,8
5	109,9

Figura 4.47. Gráfica de la resistividad medida vs la distancia de separación de las picas de prueba - Planta ECOLAC.

Fuente: Elaborado por los autores.

Resistividad de las capas del suelo			
Capa superficial (ρ_1)	Capa Inferior (ρ_2)	Altura de la capa superficial (h)	
121,70 Ωm	109,90 Ωm	1,10 m	
			
Medición de resistencia de SPT			
Método de medición	Re (Ω)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)
Método sin estacas	0.21 Ω	48 V	111
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> • La medición de la resistencia de puesta a tierra se la realizó con el método sin estacas, debido al espacio disponible y a que, por seguridad, no se recomienda desconectar las cargas eléctricas para realizar la medición con el método de las 4 puntas. • Los resultados de las mediciones se consideran valores inconsistentes, posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. 			
Responsables de mediciones	Cabrera Ronny Salinas Emilio		

Fuente: Elaborada por los autores.

4.2.8.5. Cálculo de la resistividad del terreno de la Planta ECOLAC.

Para aproximar un modelo de suelo de dos capas para el terreno de la planta ECOLAC, se sigue el método de Sunde, descrito la metodología de diseño de SPT, en la sección 3.2.1, de la siguiente manera:

a)

Gráfica Resistividad vs Distancia. Ver Figura 4.47.

b)

$\rho_1 = 121,7 \Omega\text{m}$ Resistividad capa superficial
 $\rho_2 = 109,9 \Omega\text{m}$ Resistividad de la capa inferior

c)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{109,9}{121,7} = 0,90$$

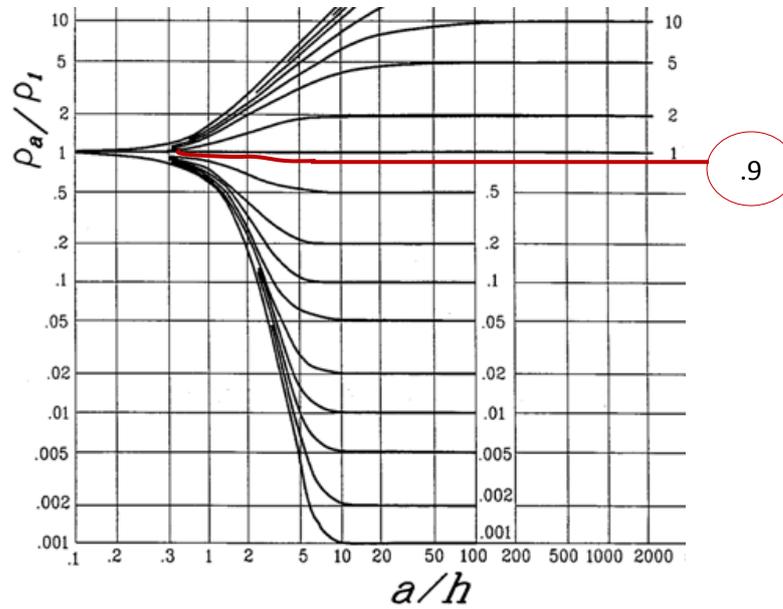


Figura 4.48. Estimación de la relación ρ_a/ρ_1 a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la Planta ECOLAC.

Fuente: Elaborado por los autores.

d)

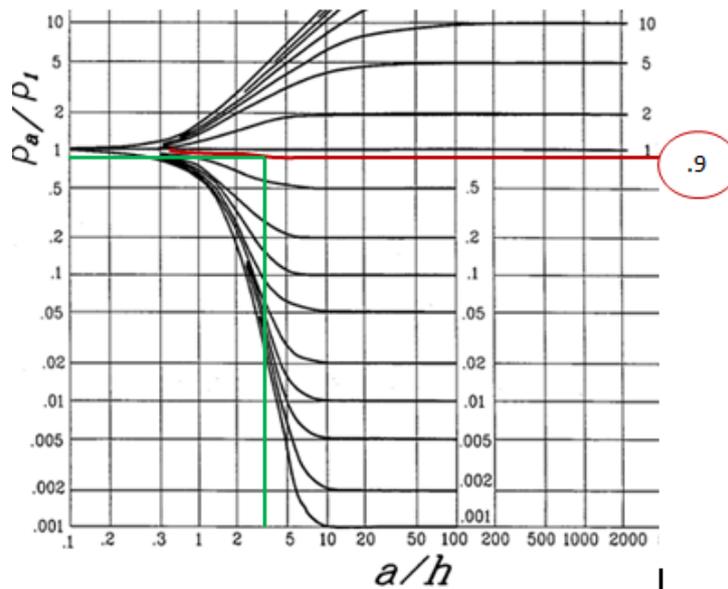


Figura 4.49. Estimación de la relación a/h a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la Planta ECOLAC.

Fuente: Elaborado por los autores.

e)

$$\frac{a}{h} = 3,7$$

f)

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0,95$$

$$\rho_a = 0,95 * 121,7 = 115,61 \Omega\text{m}$$

g)

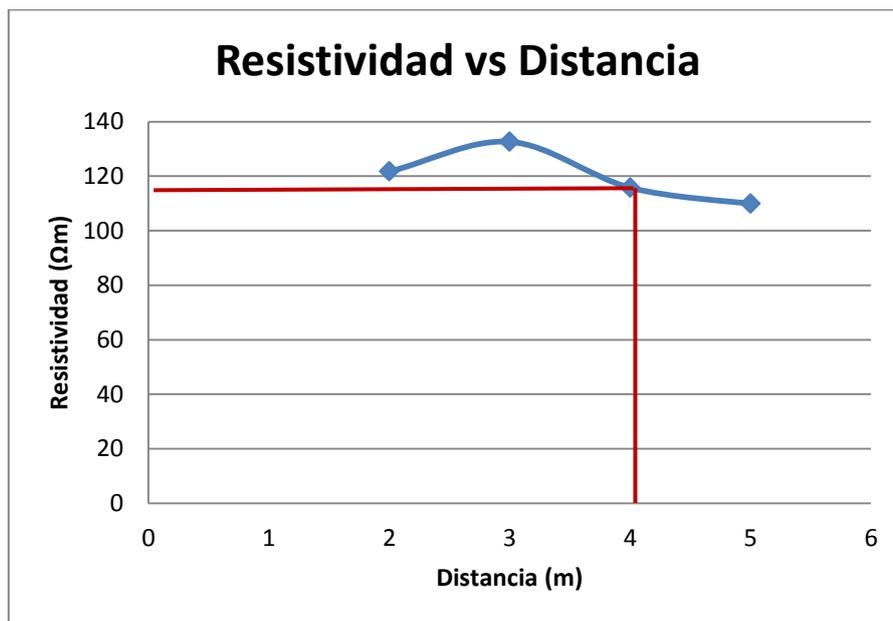


Figura 4.50. Estimación de la distancia "a" a partir de método gráfico de Sunde, para el terreno de la Planta ECOLAC.

Fuente: Elaborado por los autores.

$$a = 4,1 \text{ m}$$

h)

$$\frac{a}{h} = 3,7$$

$$h = \frac{4,1}{3,7}$$

$h = 1,1 \text{ m}$ profundidad de la capa superior

4.2.9. Mediciones del sistema de puesta a tierra conectado a la Planta CERART.

4.2.9.1. Antecedentes.

CERART es una planta de producción creada para soporte académico y producción industrial de cerámicas. Desde su creación en 1983, CERART produce la cerámica “Ñukanchik” y en 2002, CERART incorporó la fábrica “Yapacunchi”, (Dar algo más), con esta incorporación se actualizaron equipos e instalaciones en general.

La planta posee un transformador trifásico de 180 kVA con un voltaje primario de 13800 V y un voltaje secundario de 220/110 V, que abastece a la planta CERART y al edificio de la Unidad Civil Geominera – UCG. Este transformador ha venido funcionando por aproximadamente 2 años. Para evitar cortes de energía eléctrica en la planta, ésta cuenta con un Sistema de Emergencia dotado por un Grupo Electrógeno de 100 kVA, marca Jhon Deere, que viene funcionando desde aproximadamente 30 años. La planta posee una malla de puesta a tierra que está ubicada debajo del transformador, con un área aproximada de 9 m².

La planta CERART y el edificio de la UCG poseen las siguientes cargas eléctricas: Computadoras, sistema de iluminación fluorescente, sistemas de iluminación industrial de vapor de mercurio, agitador, filtro prensa, estrusor, torno, cámara de secado, horno de prueba, horno biscocho, molinos, compresores, sistemas de instrumentación y control, equipos de medición y equipos UPS.

4.2.9.2. Estado actual de las instalaciones eléctricas y del SPT.

Las instalaciones eléctricas de la planta CERART fueron remodeladas con la incorporación de la línea Yapacunchi, hace 12 años. Por lo tanto las instalaciones son relativamente nuevas y se conservan en buen estado. La planta cuenta con una malla de puesta a tierra, ubicada bajo el transformador, tiene un área de 9 m² aproximadamente. La malla fue instalada aproximadamente hace dos años.

4.2.9.3. Ubicación del SPT de la Planta CERART.

En la Figura 4.46 se puede ver la ubicación del sistema de puesta a tierra, transformador y grupo eléctrico de la Planta CERART.

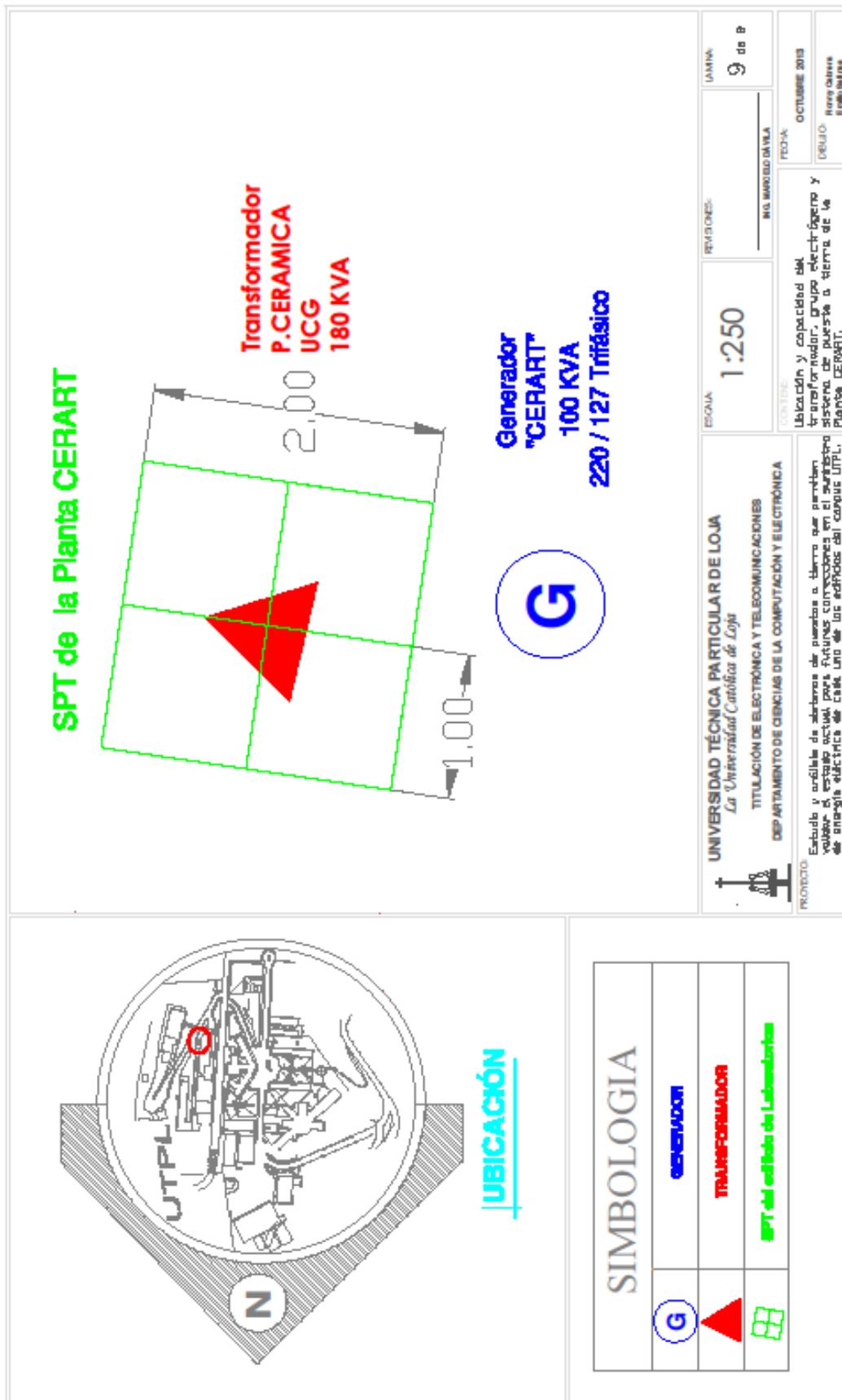


Figura 4.51. Ubicación de los SPT, transformador y grupo electrógeno de la Planta CERART.

Fuente: Elaborado por los autores.

4.2.9.4. Ficha técnica de mediciones de la planta CERART.

En la Tabla 4.11 se resumen las mediciones realizadas en la planta CERART.

Tabla 4.11. Ficha de mediciones realizadas en la planta CERART.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones					
Medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra y resistividad del terreno en el campus UTPL							
Datos informativos							
Provincia/Ciudad:		Loja		Hora:		10:30 am	
Fecha:		13/09/2013		Empresa:		UTPL	
Dirección:		San Cayetano Alto		Sitio:		CERART	
Detalle del transformador				Detalle del equipo:			
Ubicación	Latitud	70° 00' 02"		Equipo:	Earth/Ground Tester		
	Longitud	95° 58' 92,8"					
Voltaje	Primario	13,800		Marca:	Fluke 1625		
	Secundario	220/127					
Capacidad del transformador:		250 kVA		Error Intrínseco:		±2%	
Grupo electrógeno:		300 kVA		Error de operación:		±5%	
Medición de resistividad del terreno							
Método de medición:		Método de Wenner		Área del terreno		A = 1 * 1 = 1 m ²	
Nro	Profundidad de picas (m)	Separación de picas (m)	Re (Ω)	Rh (kΩ)	Rs (kΩ)	Resistividad (Ωm)	
-	-	-	-	-	-	-	
No se realizó mediciones de resistividad del terreno por las condiciones de infraestructura que presenta la planta CERART.							
Resistividad de las capas del suelo							
Capa superficial (ρ_1)		Capa Inferior (ρ_2)		Altura de la capa superficial (h)			
-		-		-			
Medición de resistencia de SPT							
Método de medición		Re (Ω)		Voltaje (V)		Frecuencia (Hz)	
Método sin estacas		0.21 Ω		48 V		111	
Observaciones							
<ul style="list-style-type: none"> La medición de la resistencia de puesta a tierra se la realizó con el método sin estacas, debido al espacio disponible y a que, por seguridad, no se recomienda desconectar las cargas eléctricas para realizar la medición con el método de las 4 puntas. Los resultados de las mediciones se consideran valores inconsistentes, posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. 							
Responsables de mediciones			Cabrera Ronny Salinas Emilio				

Fuente: Elaborada por los autores.

4.3. Resumen de mediciones de los sistemas de puesta a tierra en el campus UTPL.

En la Tabla 4.12 se resumen los resultados de las mediciones realizadas en los edificios del campus UTPL.

Tabla 4.12. Resumen los resultados de las mediciones realizadas en los edificios del campus UTPL.

Edificios que abastece el transformador	Área	Resistividad de capa superficial	Resistividad de capa inferior	Altura de la capa superficial	Resistencia del SPT	Cumple la normativa
Unidades Productivas	24m ²	10,67 Ωm	30,14 Ωm	1,25 m	11.58 Ω	No
Aulas	8m ²	186,01 Ωm	131,56 Ωm	1,13 m	41 Ω	No
Administración Central. Capilla	18m ²	158,75 Ωm	127,35 Ωm	1,07 m	22,3 Ω	No
Octógono Polideportivo Museo Canchas deportivas	1m ²	366,8 Ωm	719,7 Ωm	1,25 m	0.14 Ω (inconsistente)	No
Centro de convenciones EdiLoja CEDIB	8m ²	43,58 Ωm	19,59 Ωm	1,64 m	0,139 Ω (inconsistente)	No
Cafetería	32m ²	86,03 Ωm	25,24 Ωm	1,14 m	0,517Ω (inconsistente)	No
Laboratorios	50m ²	245,67 Ωm	89,3 Ωm	3,28 m	0,43 Ω (inconsistente)	No
ECOLAC Instituto de Química Aplicada Laboratorio de Industrias	50m ²	121,70 Ωm	109,90 Ωm	1,10 m	0.21 Ω (inconsistente)	No
CERART UCG	48m ²	-	-	-	0.21 Ω (inconsistente)	No
Método de medición de resistividad:			Método de medición de resistencia:			
Método de cuatro puntas de Wenner			Método sin estacas			

Fuente: Elaborada por los autores.

CAPÍTULO 5

5. PLAN DE MEJORAS Y ACCIONES CORRECTIVAS SOBRE POSIBLES IMPLEMENTACIONES DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN CADA EDIFICIO DEL CAMPUS UTP

En el presente capítulo se propone un plan de mejoras y acciones correctivas sobre posibles implementaciones de sistemas de puesta a tierra en cada edificio con anomalías del Campus UTPL. El plan de mejoras incluye sugerencias sobre el mantenimiento y acciones correctivas de los sistemas de puesta a tierra, a mediano y a largo plazo.

El plan de mejoras se aplica en todos los edificios de campus, y se compone de mejoras en el SPT o de un nuevo diseño de SPT y del análisis de los costos que involucran la ejecución del plan de mejoras y acciones correctivas.

En la Tabla 5.1 se presentan las principales anomalías encontradas en cada uno de los edificios del campus UTPL y las posibles soluciones que pueden implementarse.

Tabla 5.1. Plan de mejoras y acciones correctivas en los SPT de los edificios del campus UTPL.

Edificios que abastece el transformador	Resistencia del SPT	Cumple la normativa ($\leq 5\Omega$)	Anomalías detectadas	Posibles acciones correctivas
Unidades Productivas	11.58 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Mallas desconectadas	- Implementar electrodo químico - Unir mallas con equipotencializador de mallas - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
Aulas	41 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
-Administración Central. -Capilla	22,3 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla)
-Octógono -Polideportivo -Museo -Canchas deportivas	0.14 Ω (inconsistente)	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años

-Centro de convenciones -EdiLoja -CEDIB	0,139 Ω (inconsistente)	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT - Línea principal de tierra en mal estado - Uniones en mal estado	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
Cafetería	0,517 Ω (inconsistente)	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT - Línea principal de tierra en mal estado	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
Laboratorios	0,47 Ω (inconsistente)	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
-ECOLAC -Instituto de Química Aplicada - Laboratorio de Industrias	0.21 Ω (inconsistente)	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
- CERART - UCG	0.21 Ω (inconsistente)	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT	- Implementar nuevo SPT (electrodo químico) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años

Fuente: Elaborado por los autores.

A continuación se detallan las posibles acciones correctivas de los sistemas de puesta a tierra de cada edificio del campus UTPL.

5.1. PLAN DE MEJORAS DEL EDIFICIO DE UNIDADES PRODUCTIVAS.

5.1.1. Análisis Técnico: Diseño.

El sistema de puesta a tierra del edificio de Unidades Productivas, al poseer una resistencia de 11,58 Ω y al haberse implementado mallas de puesta a tierra en 2007 y 2012, se considera que no es necesario el diseño y la implementación de una nueva malla de puesta a tierra. Esto se confirma al realizar el análisis de costos de un nuevo diseño de puesta a tierra, que es de \$1390,50.

Las técnicas para mejorar la resistividad del terreno y con ello mejorar la resistencia del SPT se mencionan en la sección 1.9. Entre las técnicas más eficientes para mejorar la resistividad del terreno está el tratamiento químico del terreno, entre éstas ya no será necesario mejorar la calidad del terreno con cemento químico GEM, pues ya ha sido implementado, por lo que la acción correctiva para el edificio de Unidades Productivas será la implementación de electrodos químicos.

Se han analizado los electrodos químicos que ofrecen fabricantes como Erico, Parres y System Ohm Less, y se ha concluido que éste último ofrece electrodos químicos con mayor eficiencia en relación a su operación y costos. El sistema Ohm-Less está integrado por un electrodo formador por cable de cobre 2/0 AWG cubierto por un compuesto formado a base de grafito de alta pureza, que convierte un electrodo en un cilindro conductor que favorece la reducción de resistencia por incremento del área de contacto, y que además previene de la corrosión al conductor.

Las características del electrodo químico del sistema Ohm-Less son las siguientes:

- Longitud: 1m
- Diámetro: 0.1 m
- Peso aproximado: 20 Kg
- Porcentaje de reducción de resistividad con una dosis de THOR GEL en 1 m³ de tierra: 80%
- Composición: Grafito compactado

La reducción de resistencia se complementa con el uso del mejorador de resistividad THOR-GEL, cuya partícula absorbe humedad y la conserva aún en condiciones de sequía del suelo, favoreciendo la conductividad entre el electrodo y el terreno circundante.

El fabricante ha proporcionado un software en el que se puede calcular la resistencia del sistema de puesta a tierra con un electrodo químico del Sistem Ohm-Less, el cálculo que realiza es el siguiente:

$$R = \left| \frac{\rho}{2,73L} \text{Log}_{10} \frac{4L}{d} \right| \%TG$$

Reemplazando los datos del electrodo químico seleccionado, y que la resistividad medida en el terreno de Unidades productivas es de 30 ohm-m, se tiene la resistencia del sistema de puesta a tierra es:

$$R = 3,52 \Omega$$

Con este valor de resistencia de puesta a tierra se asegura en el cumplimiento de lo establecido en el Código Eléctrico Nacional del Ecuador y en el IEEE Std-142.

El procedimiento de instalación del electrodo químico se lo detalla en la sección 1.9.5.3.

La norma de la Comisión Electrotécnica Internacional sugiere unir las mallas que actualmente están construidas en el edificio. Para la unión de las mallas se recomienda usar un equipotencializador de mallas, el cual tendrá las funciones de un fusible para proteger las mallas y demás equipos en caso de corrientes de falla.

5.1.2. Análisis Económico: Presupuesto.

La información de precios fue obtenida por proveedores locales y nacionales: INDELEC (Loja) y COMELEC (Guayaquil). El análisis económico ha sido elaborado con precios vigentes a noviembre de 2013.

El valor del costo total de la malla, tomando en cuenta la mano de obra necesaria para implementación de la misma, se muestra en la Tabla 5.2. Se realizan las siguientes consideraciones:

- Para la unión de las mallas y el electrodo químico se usará suelda exotérmica. En este caso se usarán 6 uniones.
- Se estima que para la conexión del electrodo químico y las mallas se usará cable # 2/0 AWG.

Tabla 5.2. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio de Unidades productivas

			Proveedor (Loja)	
			INDELEC	
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T
1	4	Conductor desnudo Nro. 2/0 AWG Cu	\$ 9,00	\$ 36,00
2	1	Electrodo químico Ohm-Less System, 1m, 80%.	\$ 350,00	\$ 350,00
3	6	Cápsulas de suelda exotérmica	\$ 8,00	\$ 48,00
4	1	Equipotencializador de mallas, de 10 KA.	\$ 85,00	\$ 85,00
5	1	Operador de control	\$ 100,00	\$ 100,00
6	1	Mano de obra civil, excavaciones	\$ 120,00	\$ 120,00
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 739,00	

Fuente: Elaborado por los autores

Se sugiere adquirir los materiales de la empresa INDELEC, debido al ahorro económico y al ser un proveedor local se puede dar la operable asesoría que se tendrá de parte de los técnicos de la empresa.

5.2. PLAN DE MEJORAS DEL EDIFICIO DE AULAS.

5.2.1. Análisis Técnico: Diseño.

Debido a que el sistema de puesta a tierra del edificio de Aulas no cumple con la resistencia establecida por las normas nacionales e internacionales y al no existir mayor información sobre el actual SPT, se sugiere diseñar una malla de puesta a tierra utilizando la metodología de la sección 3.2.

Según la Tabla 4.12 el edificio de Aulas dispone un área de 3m x 3m.

De la sección 3.2.1, se tiene que el valor de la resistividad superficial es de 3000 Ω m. Así mismo se tiene que la altura de la capa superficial es de 15 cm.

De la Tabla 4.12 se tiene que el valor de la resistividad de la primera capa del suelo en el edificio de Aulas es de 152,48 Ω .m. Tomando como referencia otros cálculos de mallas de puesta a tierra, éste valor de resistividad es elevado, por lo que se debe realizar tratamiento en el suelo para bajar su resistividad. En la sección 1.9 se pueden observar las principales técnicas para mejorar la resistividad del suelo, se recomienda usar un tratamiento químico aplicando el cemento químico GEM, siguiendo los pasos que se detallan en la sección 1.9.5.4. Como ya se revisó en ésta sección, la resistividad del terreno una vez aplicado el cemento químico GEM en terrenos de 50 Ω .m a 300 Ω .m, es de 30 Ω .m.

Con las ecuaciones 3.1 y 3.2 se pueden calcular la sección mínima del conductor, partiendo de los siguientes datos:

- $K_f = 7,06$
- $t_c = 0,5$ s
- $P = 35$ kVA
- $V_{\text{prim}} = 13200$ V
- $V_{\text{sec}} = 220$ V
- $Z = 3.5$
- $F_{\text{asim}} = 1,25$

$$I_{\text{cc-max-sec}} = 2624,32 \text{ A}$$

$$I_{\text{cc-asim}} = 3280,40 \text{ A}$$

$$A_{\text{kcmil}} = 3,280 * 7,06 * \sqrt{0,5} = 16,37 \text{ kcmil}$$

Según el cálculo se debería utilizar un cable 16,37 kcmil, pero por recomendación de las normativas nacionales e internacionales se utilizará el calibre 2/0 AWG, con sección de 133 kcmil, que tiene un radio de 4,63mm.

Con las ecuaciones 3.3, 3.5 y 3.8 se procede a calcular los voltajes de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano, pero antes se debe partir de los siguientes datos:

- Peso del cuerpo humano: 50 kg
- $\rho_s = 3000\Omega m$
- $\rho = 30\Omega m$
- $t_s = 0,5\text{ s}$
- $h_s = 0,15\text{ m}$

$$C_s = 0,772$$

$$E_{s50} = 2442,31\text{ V}$$

$$E_{t50} = 733,61\text{ V}$$

La malla será un cuadrado de 4m x 4m y se enterrará a 0,5m de profundidad. La malla se complementará con 4 varillas de 1,5m ubicadas en cada esquina.

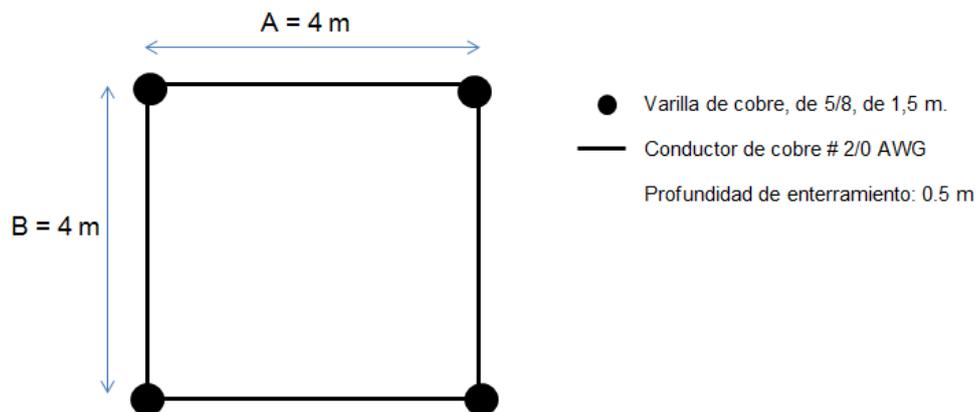


Figura 5.2. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Edificio de Aulas.

Fuente: Elaborado por los autores.

Por lo tanto, la longitud de cable horizontal, de las varillas y la total es la siguiente:

$$L_C = 16\text{m}$$

$$L_T = L_C + 4\text{ varillas de }1,5\text{ m}$$

$$L_T = 16 + (4 * 1,5) = 22\text{ m}$$

Usando la ecuación 3.10 y partiendo de los siguientes datos se obtiene la resistencia de la malla.

$$\rho = 30 \Omega\text{m}$$

$$L_T = 16\text{m} + 6\text{m} = 22 \text{ m}$$

$$S = 9 \text{ m}^2.$$

$$h = 0,5$$

$$R_g = 2,47 \Omega$$

La corriente de la malla se calcula con la ecuación 3.16, tomando en cuenta un factor de decremento de 1,043 y un factor de división de corriente de falla de 0.6.

$$I_{cc-\text{max-pri}} = 75,76 \text{ A}$$

$$I_G = (3)75,76 \text{ A} * 0,6 * 1,043 = 142,23 \text{ A}$$

El GPR es calculado con la fórmula 3.17:

$$\text{GPR} = 142,43 \text{ A} * 2,47 \Omega = 351,38 \text{ V}$$

Debido a que GPR es menor que el voltaje de toque $E_{t50} = 733,61 \text{ V}$ se puede dar por finalizado el diseño.

En la Tabla 5.3 se pueden ver los detalles de la malla de puesta a tierra diseñada para el edificio de Aulas.

Tabla 5.3. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio de Aulas

Ítem	Descripción	Variable	Valor
1	Área de la malla	S	4m x 4m
2	Capa superficial	h_s	0,15 m
3	Resistividad de la capa superficial	ρ_s	3000 $\Omega\cdot\text{m}$
4	Tratamiento de suelo	Cemento químico GEM	
5	Diámetro del conductor	d	2/0 AWG
6	Espaciamiento entre conductores paralelos	D	4 m
7	Profundidad de enterramiento de la malla	h	0,5 m
8	Longitud de la malla horizontal	L_C	16 m
9	Número de barras verticales	n_r	4
10	Longitud de las barras verticales	L_r	1,5 m
11	Longitud efectiva de la malla	L_T	22 m
12	Distancia entre la malla y el tablero principal		5 m
13	Uniones	Solda exotérmica	
14	Diagrama de la malla de puesta a tierra		Figura 5.3

Fuente:
Elaborado por el autor.

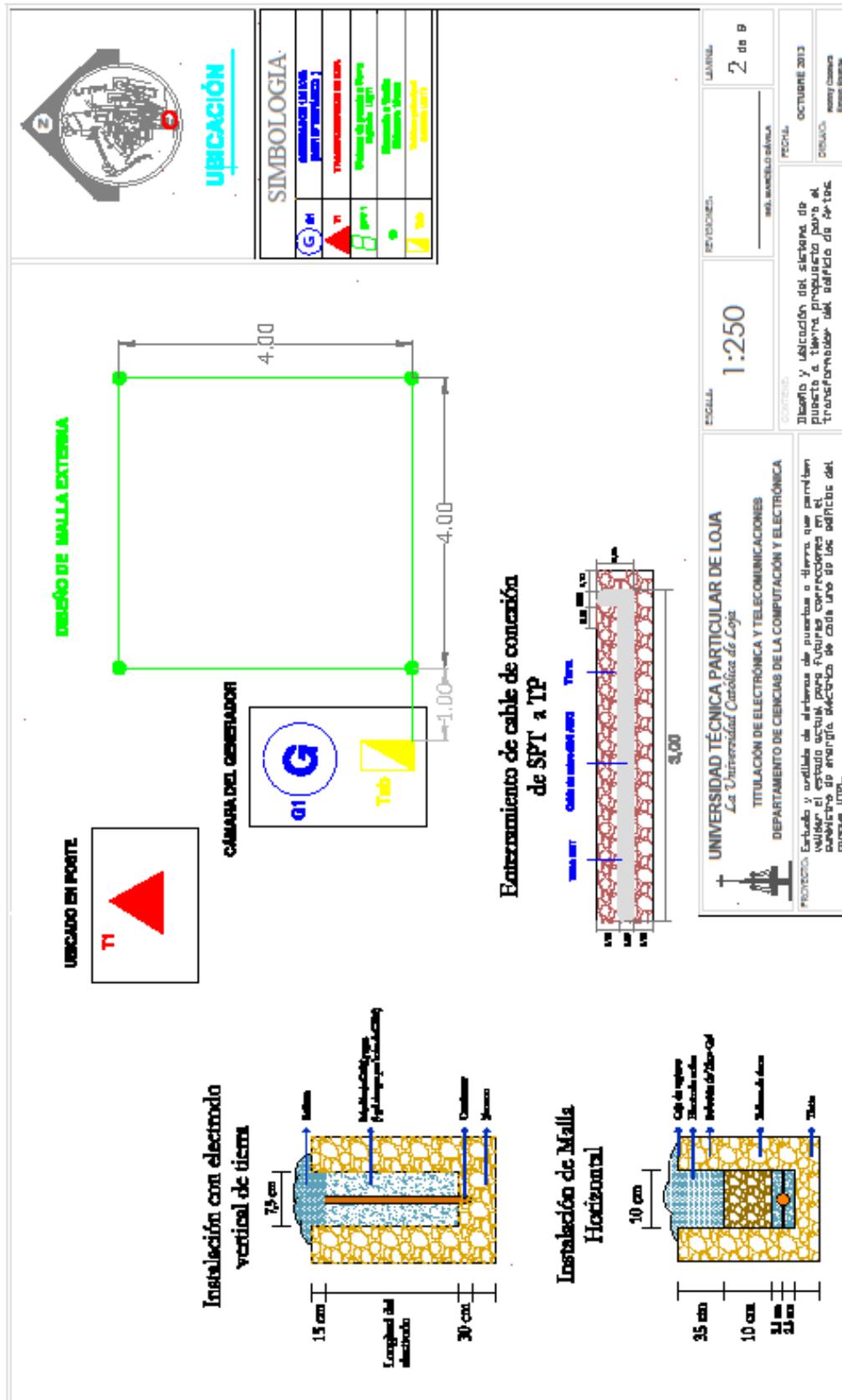


Figura 5.3. Acciones correctivas del SPT del edificio de Aulas.

Fuente: Elaborado por los autores.

5.2.2. Análisis Económico: Presupuesto.

Una vez realizadas las mediciones de la resistencia del sistema de puesta a tierra actual y realizando las acciones correctivas, basadas en normas nacionales e internacionales se procedió a realizar el diseño de un óptimo sistema de puesta a tierra para el edificio de Aulas.

La información de precios fue obtenida por proveedores locales y nacionales: INDELEC (Loja) y COMELEC (Guayaquil). El análisis económico ha sido elaborado con precios vigentes a noviembre de 2013.

El valor del costo total de la malla, tomando en cuenta la mano de obra necesaria para implementación de la misma, se muestra en la Tabla 5.4. Se realizan las siguientes consideraciones:

- Para el tratamiento de suelo se usará GEM. Fabricantes como Erico y Parres recomiendan que un saco de 10 Kg sea utilizado en 3 metros de cable horizontal, o en un pozo de barras verticales, siguiendo el procedimiento de la sección 1.9.5.4. Por lo tanto se tiene que para el tratamiento de suelo de la malla horizontal se ocuparán 6 sacos de GEM y para el tratamiento de suelo de las barras verticales se usarán 4 sacos.
- Se recomienda mezclar el cemento GEM con tierra de cultivo (humus) y carbón triturado para aumentar la eficiencia del tratamiento del suelo, tanto en su resistividad como en la cantidad de cemento GEM usado. Proveedores locales recomiendan una relación de un saco de tierra de cultivo y de carbón por cada saco de cemento GEM.
- Para las uniones se usará suelda exotérmica, en este caso en los 4 puntos de la malla.
- La distancia entre la malla y el tablero principal es de 5 m, por lo que se debe considerar esta cantidad de cable # 2/0 AWG para su unión.

Tabla 5.4. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio de Aulas

			Proveedores (Loja/Guayaquil)			
			INDELEC		COMELEC	
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T	Costo U	Costo T
1	21	Conductor desnudo Nro. 2/0 AWG Cu	\$ 9,00	\$ 189,00	\$ 8,00	\$ 168,00
2	4	Varillas Copperweld de 5/8, Cu, de 1,5m.	\$ 8,00	\$ 32,00	\$ 8,84	\$ 35,36
3	4	Cápsulas de suelda exotérmica	\$ 8,00	\$ 32,00	\$ 6,10	\$ 24,40
4	10	Sacos de GEM	\$ 30,00	\$ 300,00	\$ 35,79	\$ 357,90
5	1	Operador de control	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 180,00	\$ 180,00
6	1	Transporte de materiales	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 30,00	\$ 30,00
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 653,00		\$ 795,66	
OTROS MATERIALES						
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T		
1	10	Sacos de tierra de cultivo	\$ 5,00	\$ 50,00		
2	10	Sacos de carbón	\$ 7,50	\$ 75,00		
3	gbl	Mano de obra civil, excavaciones		\$ 234,00		
TOTAL (Incluye IVA)			359,00 \$			
RESUMEN DE PRESUPUESTO						
Proveedor local			\$ 653,00			
Otros materiales			\$ 359,00			
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 1.012,00			

Fuente: Elaborado por los autores.

Se sugiere adquirir los materiales de la empresa INDELEC, debido al ahorro económico y al ser un proveedor local se puede dar la operable asesoría que se tendrá de parte de los técnicos de la empresa.

5.3. PLAN DE MEJORAS DEL EDIFICIO DE ADMINISTRACIÓN CENTRAL.

5.3.1. Análisis Técnico: Diseño.

Debido a que el sistema de puesta a tierra del edificio de Administración Central no cumple con la resistencia establecida por las normas nacionales e internacionales y al no existir mayor información sobre el actual SPT, se sugiere diseñar una malla de puesta a tierra utilizando la metodología de la sección 3.2.

Según la Tabla 4.12 se dispone de un área de 8m x 4m.

De la sección 3.2.1, se tiene que el valor de la resistividad superficial es de 3000 Ωm . Así mismo se tiene que la altura de la capa superficial es de 15 cm.

De la Tabla 4.12 se tiene que el valor de la resistividad de la primera capa del suelo en el edificio de Administración Central es de 146,13 Ωm . Tomando como referencia otros cálculos de mallas de puesta a tierra, éste valor de resistividad es elevado, por lo que se debe realizar tratamiento en el suelo para bajar su resistividad. En la sección 1.9 se pueden ver las principales técnicas para mejorar la resistividad del suelo, se recomienda usar un tratamiento químico aplicando el cemento químico GEM, siguiendo los pasos que se detallan en la sección 1.9.5.4. Como ya se revisó en ésta sección, la resistividad del terreno una vez aplicado el cemento químico GEM en terrenos de 50 Ωm a 300 Ωm , es de 30 Ωm .

Con las ecuaciones 3.1 y 3.2 se pueden calcular la sección mínima del conductor, partiendo de los siguientes datos:

- $K_f = 7,06$
- $t_c = 0,5 \text{ s}$
- $P = 125 \text{ kVA}$
- $V_{\text{prim}} = 13200 \text{ V}$
- $V_{\text{sec}} = 220 \text{ V}$
- $Z = 3.5$
- $F_{\text{asim}} = 1,25$

$$I_{\text{cc-max-sec}} = 9372,6 \text{ A}$$

$$I_{\text{cc-asim}} = 11715,7 \text{ A}$$

$$A_{\text{kcmil}} = 11,715 * 7,06 * \sqrt{0,5} = 58,48 \text{ kcmil}$$

Según el cálculo se debería utilizar un cable 58,48 kcmil, pero por recomendación de las normativas nacionales e internacionales se utilizará el calibre 2/0 AWG, con sección de 133 kcmil, que tiene un radio de 4,63mm.

Con las ecuaciones 3.3, 3.5 y 3.8 se procede a calcular los voltajes de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano, pero antes se debe partir de los siguientes datos:

- Peso del cuerpo humano: 50 kg
- $\rho_s = 3000\Omega\text{m}$
- $\rho = 30 \Omega\text{m}$

- $t_s = 0,5 \text{ s}$
- $h_s = 0,15 \text{ m}$

$$C_s = 0,772$$

$$E_{s50} = 2442,31 \text{ V}$$

$$E_{t50} = 733,61 \text{ V}$$

La malla será rectangular, tendrá un área de 6m x 3m, la separación entre conductores paralelos será de 3 m. La malla será enterrada a 0,5 m de profundidad.

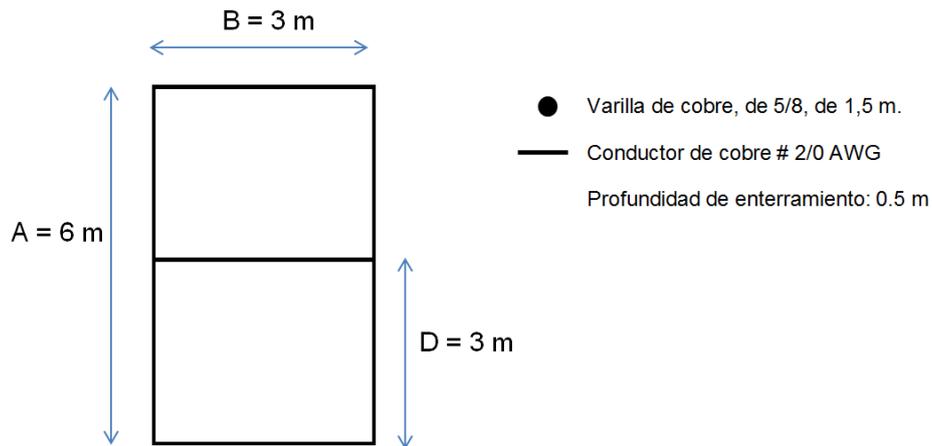


Figura 5.4. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Edificio de Administración Central.

Fuente: Elaborado por los autores.

Por lo tanto, la longitud de cable horizontal, de las varillas y la total es la siguiente:

$$L_C = 21 \text{ m}$$

$$L_T = L_C = 21 \text{ m}$$

Usando la ecuación 3.9 y partiendo de los siguientes datos se obtiene la resistencia de la malla:

$$\rho = 30 \Omega\text{m}$$

$$L_T = 21\text{m} = 21\text{m}$$

$$S = 18 \text{ m}^2.$$

$$h = 0,5$$

$$R_g = 3,9 \Omega$$

La corriente de la malla se calcula con la ecuación 3.16, tomando en cuenta un factor de decremento de 1,043 y un factor de división de corriente de falla de 0.6.

$$I_{cc\text{-max-pri}} = 270,56 \text{ A}$$

$$I_G = (3)270,56 \text{ A} * 0,6 * 1,043 = 507,95 \text{ A}$$

El GPR es calculado con la fórmula 3.17:

$$\text{GPR} = 507,95 * 3,9 \Omega = 2054,9 \text{ V}$$

Debido a que GPR es mayor que el voltaje de toque $E_{t50} = 733,61 \text{ V}$ se debe continuar con la comparación de los voltajes de toque y de paso de la malla con los voltajes de toque y de paso tolerables para el cuerpo humano.

Para el cálculo del voltaje de toque y de paso de la malla se deben usar las ecuaciones 3.18 y 3.30, pero antes se deben realizar los cálculos necesarios partiendo de los siguientes datos:

- $h_0 = 1 \text{ m}$
- $D = 3 \text{ m}$
- $h = 0,5 \text{ m}$
- $S = 18 \text{ m}^2$
- $d = 4,63 \text{ mm}$
- $L_c = 21 \text{ m}$
- $L_r = 0 \text{ m}$
- $L_p = 18 \text{ m}$

$$K_i = 0,27$$

$$K_h = 1,225$$

Ya que la malla es rectangular se tiene que $n_c = n_d = 1$ y queda por calcular n_a y n_b :

$$n_a = 2,33$$

$$n_b = 1,03$$

$$n = 2,33 * 1,03 * 1 * 1 = 2,4$$

$$K_m = 0,991$$

$$K_i = 1$$

$$L_M = 21$$

$$E_m = 718,91 \text{ V}$$

$$K_S = 0,49$$

$$L_S = 15,75 \text{ m}$$

$$E_s = 473,44 \text{ V}$$

Voltaje de toque:

$$718,91 \text{ V} < 733,61 \text{ V}$$

Voltaje de paso:

$$473,44 \text{ V} < 2442,61 \text{ V}$$

Debido a que los voltajes de toque y de paso de la malla son menores a sus respectivos voltajes tolerables por el ser humano, se puede asegurar que el diseño de la malla es el óptimo.

En la Tabla 5.5 se pueden ver los detalles de la malla de puesta a tierra diseñada para el edificio de Administración Central.

Tabla 5.5. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio de Administración Central.

Ítem	Descripción	Variable	Valor
1	Área de la malla	S	6m x 3m
2	Capa superficial	h_s	0,15 m
3	Resistividad de la capa superficial	ρ_s	3000 Ω .m
4	Tratamiento de suelo	Cemento químico GEM	
5	Diámetro del conductor	d	2/0 AWG
6	Espaciamiento entre conductores paralelos	D	3 m
7	Profundidad de enterramiento de la malla	h	0,5 m
8	Longitud de la malla horizontal	L_C	21 m
9	Número de barras verticales	n_r	0
10	Longitud de las barras verticales	L_r	0 m
11	Longitud efectiva de la malla	L_T	21 m
12	Distancia entre la malla y el tablero principal		5 m
13	Uniones	Suelda exotérmica	
14	Diagrama de la malla de puesta a tierra		Figura 5.5

Fuente: Elaborado por los autores.

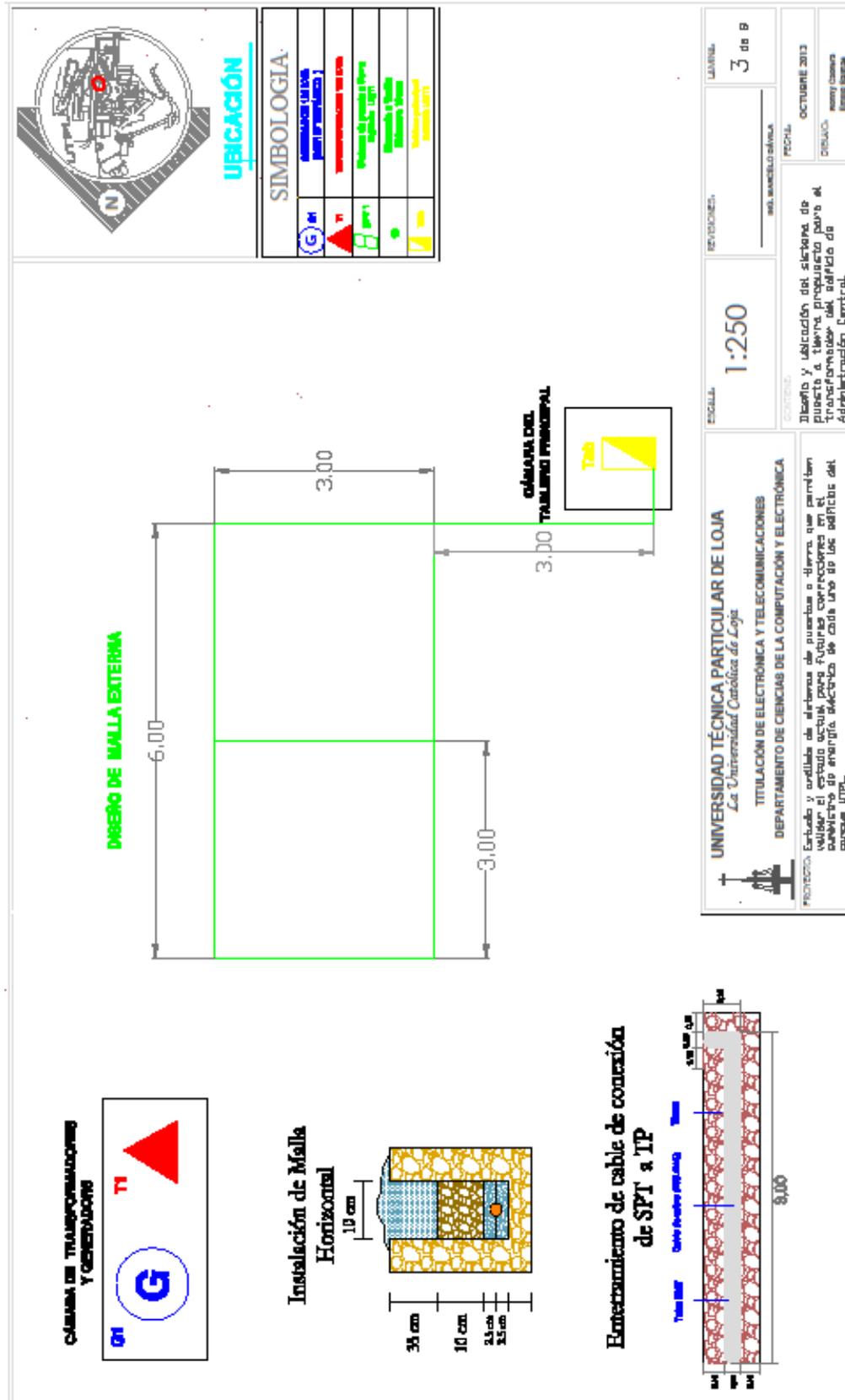


Figura 5.5. Acciones correctivas del SPT del edificio de Administración Central.

Fuente: Elaborado por los autores.

5.3.2. Análisis Económico: Presupuesto.

Una vez realizadas las mediciones de la resistencia del sistema de puesta a tierra actual y realizando las acciones correctivas, basadas en normas nacionales e internacionales se procedió a realizar el diseño de un óptimo sistema de puesta a tierra para el edificio de Administración Central.

La información de precios fue obtenida por proveedores locales y nacionales: INDELEC (Loja) y COMELEC (Guayaquil). El análisis económico ha sido elaborado con precios vigentes a noviembre de 2013.

El valor del costo total de la malla, tomando en cuenta la mano de obra necesaria para implementación de la misma, se muestra en la Tabla 5.6. Se realizan las siguientes consideraciones:

- Para el tratamiento de suelo se usará GEM. Fabricantes como Erico y Parres recomiendan que un saco de 10 Kg sea utilizado en 3 metros de cable horizontal, siguiendo el procedimiento de la sección 1.9.5.4. Por lo tanto se tiene que para el tratamiento de suelo de la malla horizontal se ocuparán 7 sacos de GEM.
- Se recomienda mezclar el cemento GEM con tierra de cultivo (humus) y carbón triturado para aumentar la eficiencia del tratamiento del suelo, tanto en su resistividad como en la cantidad de cemento GEM usado. Proveedores locales recomiendan una relación de un saco de tierra de cultivo y de carbón por cada saco de cemento GEM.
- Para las uniones se usará suelda exotérmica, en este caso en los 6 puntos de la malla.
- La distancia entre la malla y el tablero principal es de 5 m, por lo que se debe considerar esta cantidad de cable # 2/0 AWG para su unión.

Tabla 5.6. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio de Administración Central.

			Proveedores (Loja/Guayaquil)			
			INDELEC		COMELEC	
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T	Costo U	Costo T
1	26	Conductor desnudo Nro. 2/0 AWG Cu	\$ 9,00	\$ 234,00	\$ 8,00	\$ 208,00
2	0	Varillas Copperweld de 5/8, Cu, de 1,5m.	\$ 8,00	\$ 0,00	\$ 8,84	\$ 0,00
3	6	Cápsulas de suelda exotérmica	\$ 8,00	\$ 48,00	\$ 6,10	\$ 36,60
4	7	Sacos de GEM	\$ 30,00	\$ 210,00	\$ 35,79	\$ 250,53
5	1	Operador de control	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 180,00	\$ 180,00
6	1	Transporte de materiales	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 30,00	\$ 30,00
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 592,00		\$ 705,13	
OTROS MATERIALES						
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T		
1	7	Sacos de tierra de cultivo	\$ 5,00	\$ 35,00		
2	7	Sacos de carbón	\$ 7,50	\$ 52,50		
3	gbl	Mano de obra civil, excavaciones		\$ 204,00		
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 291,50			
RESUMEN DE PRESUPUESTO						
Proveedor local			\$ 592,00			
Otros materiales			\$ 291,50			
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 883,50			

Fuente: Elaborado por los autores.

Se sugiere adquirir los materiales de la empresa INDELEC, debido al ahorro económico y al ser un proveedor local se puede dar la operable asesoría que se tendrá de parte de los técnicos de la empresa.

5.4. PLAN DE MEJORAS DEL EDIFICIO DEL OCTÓGONO.

5.4.1. Análisis Técnico: Diseño.

Debido a que el sistema de puesta a tierra del edificio del Octógono no cumple con la resistencia establecida por las normas nacionales e internacionales y al no existir mayor información sobre el actual SPT, se sugiere diseñar una malla de puesta a tierra utilizando la metodología de la sección 3.2.

Según la Tabla 4.12 se dispone de un área de 6m x 4m.

De la sección 3.2.1, se tiene que el valor de la resistividad superficial es de 3000 Ω m. Así mismo se tiene que la altura de la capa superficial es de 15 cm.

De la Tabla 4.12 se tiene que el valor de la resistividad de la primera capa del suelo en el edificio del Octógono es de 366,1 Ω .m. Tomando como referencia otros cálculos de mallas de puesta a tierra, éste valor de resistividad es elevado, por lo que se debe realizar tratamiento en el suelo para bajar su resistividad. En la sección 1.9 se pueden ver las principales técnicas para mejorar la resistividad del suelo, se recomienda usar un tratamiento químico aplicando el cemento químico GEM, siguiendo los pasos que se detallan en la sección 1.9.5.4. Como ya se revisó en ésta sección, la resistividad del terreno una vez aplicado el cemento químico GEM en terrenos de 50 Ω .m a 300 Ω .m, es de 30 Ω .m.

Con las ecuaciones 3.1 y 3.2 se pueden calcular la sección mínima del conductor, partiendo de los siguientes datos:

- $K_f = 7,06$
- $t_c = 0,5$ s
- $P = 250$ kVA
- $V_{\text{prim}} = 13200$ V
- $V_{\text{sec}} = 220$ V
- $Z = 4$
- $F_{\text{asim}} = 1,25$

$$I_{\text{cc-max-sec}} = 16402 \text{ A}$$

$$I_{\text{cc-asim}} = 20502,40 \text{ A}$$

$$A_{\text{kcmil}} = 3,280 * 7,06 * \sqrt{0,5} = 102,3 \text{ kcmil}$$

Según el cálculo se debería utilizar un cable 102,3 kcmil, pero por recomendación de las normativas nacionales e internacionales se utilizará el calibre 2/0 AWG, con sección de 133 kcmil, que tiene un radio de 4,63mm.

Con las ecuaciones 3.3, 3.5 y 3.8 se procede a calcular los voltajes de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano, pero antes se debe partir de los siguientes datos:

- Peso del cuerpo humano: 50 kg
- $\rho_s = 3000\Omega$ m

- $\rho = 30 \Omega\text{m}$
- $t_s = 0,5 \text{ s}$
- $h_s = 0,15 \text{ m}$

$$C_s = 0,772$$

$$E_{s50} = 2442,31 \text{ V}$$

$$E_{t50} = 733,61 \text{ V}$$

La malla será rectangular, tendrá un área de 6m x 3m, la separación entre conductores paralelos será de 3m. La malla se complementará con 6 varillas de 1,5m cada una, ubicadas en las esquinas. La malla será enterrada a 0,5 metro de profundidad.

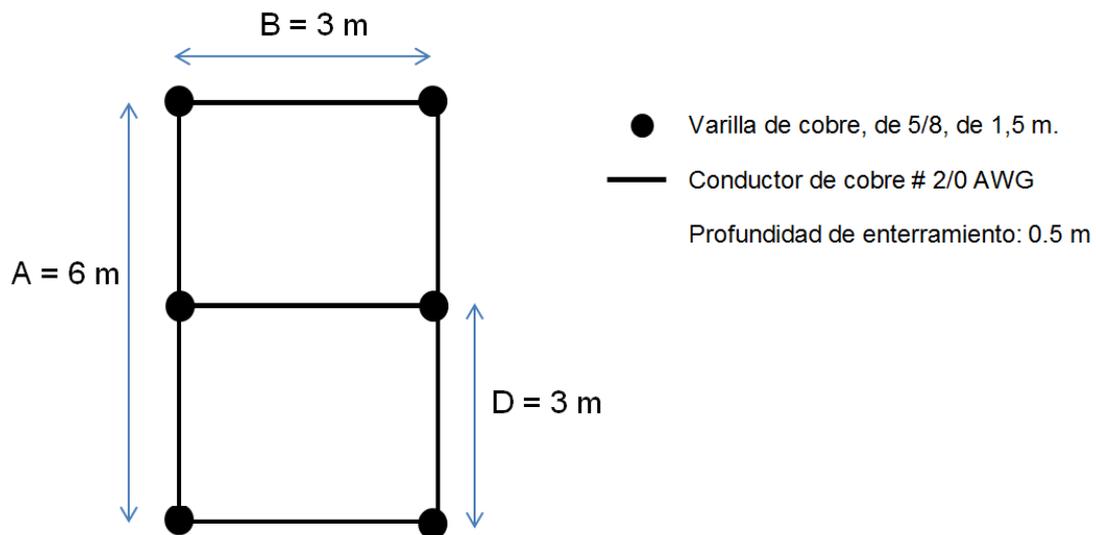


Figura 5.6. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Edificio del Octógono.

Fuente: Elaborado por los autores.

Por lo tanto, la longitud de cable horizontal, de las varillas y la total es la siguiente:

$$L_C = 21 \text{ m}$$

$$L_T = L_C + 6 \text{ varillas de } 1,5 \text{ m}$$

$$L_T = 21 + (6 * 1,5) = 30 \text{ m}$$

Usando la ecuación 3.9 y partiendo de los siguientes datos se obtiene la resistencia de la malla:

$$\rho = 30 \Omega\text{m}$$

$$L_T = 21\text{m} + 9\text{m} = 30\text{m}$$

$$S = 18 \text{ m}^2.$$

$$h = 0,5$$

$$R_g = 1,314 \Omega$$

La corriente de la malla se calcula con la ecuación 3.16, tomando en cuenta un factor de decremento de 1,043 y un factor de división de corriente de falla de 0.6.

$$I_{cc-max-pri} = 473,48 \text{ A}$$

$$I_G = (3)473,48 \text{ A} * 0,6 * 1,043 = 888,92 \text{ A}$$

El GPR es calculado con la fórmula 3.17:

$$\text{GPR} = 888,92 \text{ A} * 1,314 \Omega = 1168,2 \text{ V}$$

Debido a que GPR es mayor que el voltaje de toque $E_{t50} = 733,61 \text{ V}$ se debe continuar con la comparación de los voltajes de toque y de paso de la malla con los voltajes de toque y de paso tolerables para el cuerpo humano.

Para el cálculo del voltaje de toque y de paso de la malla se deben usar las ecuaciones 3.18 y 3.30, pero antes se deben realizar los cálculos necesarios partiendo de los siguientes datos:

- $K_{ji} = 1$ Cuando existen barras en las esquinas de la malla
- $h_0 = 1 \text{ m}$
- $D = 3 \text{ m}$
- $h = 0,5 \text{ m}$
- $S = 18 \text{ m}^2$
- $d = 4,63 \text{ mm}$
- $L_c = 21 \text{ m}$
- $L_r = 1,5 \text{ m}$
- $L_p = 18 \text{ m}$

$$K_h = 1,225$$

Ya que la malla es rectangular se tiene que $n_b = n_c = 1$ y queda por calcular n_a y n_b :

$$n_a = 2,33$$

$$n_b = 1,03$$

$$n = 2,33 * 1,03 * 1 * 1 = 2,4$$

$$K_m = 0,953$$

$$K_i = 1$$

$$L_M = 37,41$$

$$E_m = 679.21 \text{ V}$$

$$K_S = 0.489$$

$$L_S = 23,4 \text{ m}$$

$$E_S = 557,4 \text{ V}$$

Voltaje de toque:

$$679.21 \text{ V} < 733,61 \text{ V}$$

Voltaje de paso:

$$557,4 \text{ V} < 2442,31 \text{ V}$$

Debido a que los voltajes de toque y de paso de la malla son menores a sus respectivos voltajes tolerables por el ser humano, se puede asegurar que el diseño de la malla es el óptimo.

En la Tabla 5.7 se pueden ver los detalles de la malla de puesta a tierra diseñada para el edificio del Octógono.

Tabla 5.7. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio del Octógono.

Ítem	Descripción	Variable	Valor
1	Área de la malla	S	6m x 3m
2	Capa superficial	h_s	0,15 m
3	Resistividad de la capa superficial	ρ_s	3000 $\Omega \cdot m$
4	Tratamiento de suelo	Cemento químico GEM	
5	Diámetro del conductor	d	2/0 AWG
6	Espaciamiento entre conductores paralelos	D	3 m
7	Profundidad de enterramiento de la malla	h	0,5 m
8	Longitud de la malla horizontal	L_C	21 m
9	Número de barras verticales	n_r	6
10	Longitud de las barras verticales	L_r	1,5 m
11	Longitud efectiva de la malla	L_T	30 m
12	Distancia entre la malla y el tablero principal		15 m
13	Uniones	Suelda exotérmica	
14	Diagrama de la malla de puesta a tierra		Figura 5.7

Fuente: Elaborado por los autores.

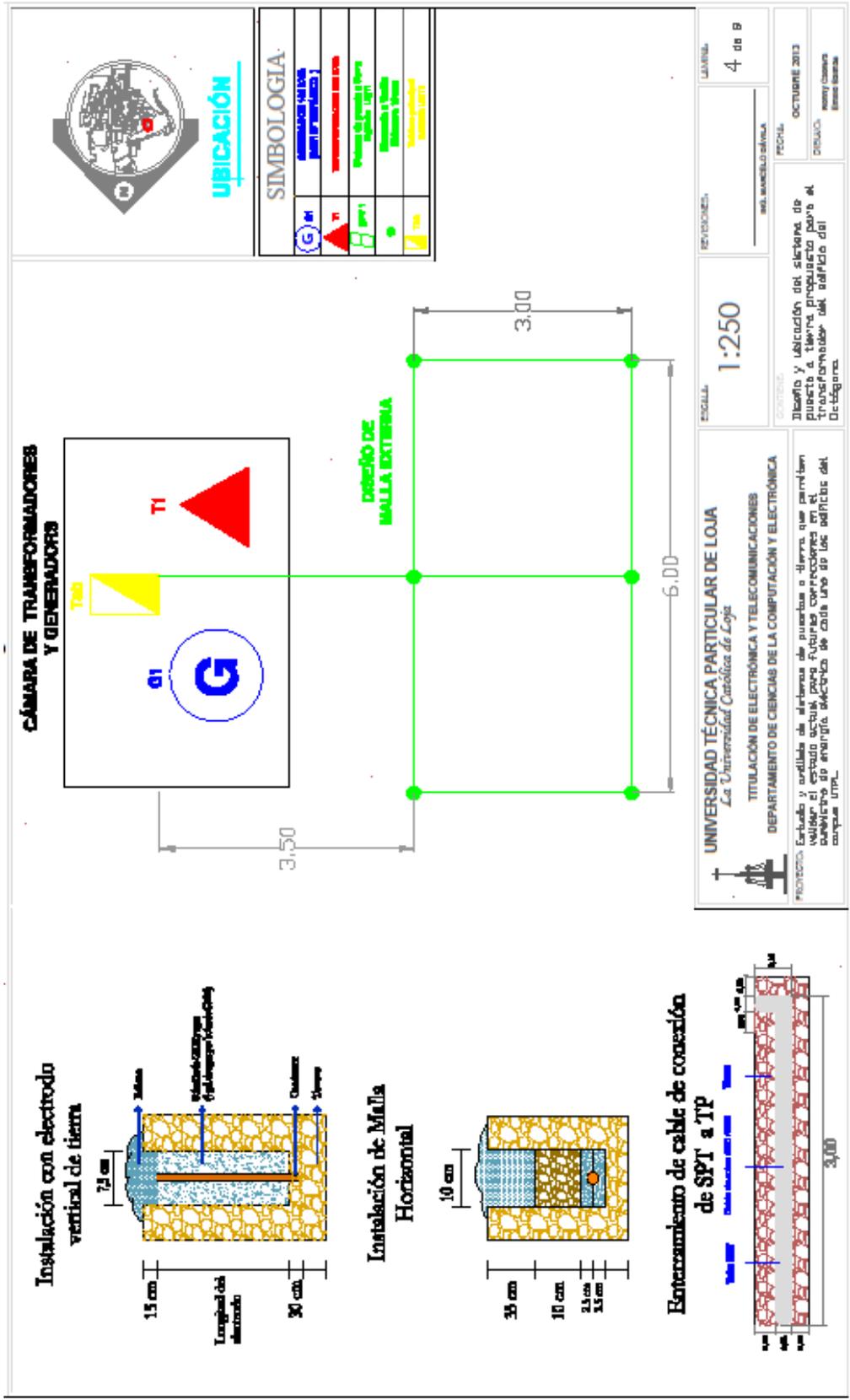


Figura 5.7. Acciones correctivas del SPT del edificio del Octógono.

Fuente: Elaborado por los autores.

5.4.2. Análisis Económico: Presupuesto.

Una vez realizadas las mediciones de la resistencia del sistema de puesta a tierra actual y realizando las acciones correctivas, basadas en normas nacionales e internacionales se procedió a realizar el diseño de un óptimo sistema de puesta a tierra para el edificio del Octógono.

La información de precios fue obtenida por proveedores locales y nacionales: INDELEC (Loja) y COMELEC (Guayaquil). El análisis económico ha sido elaborado con precios vigentes a noviembre de 2013.

El valor del costo total de la malla, tomando en cuenta la mano de obra necesaria para implementación de la misma, se muestra en la Tabla 5.8. Se realizan las siguientes consideraciones:

- Para el tratamiento de suelo se usará GEM. Fabricantes como Erico y Parres recomiendan que un saco de 10 Kg sea utilizado en 3 metros de cable horizontal, o en un pozo de barras verticales, siguiendo el procedimiento de la sección 1.9.5.4. Al tratarse de un suelo con resistividad alta se recomienda usar dos dosis de GEM por cada 3 metros, para de esta forma llegar a los 30 Ω m. Por lo tanto se tiene que para el tratamiento de suelo de la malla horizontal se ocuparán 14 sacos de GEM y para el tratamiento de suelo de las barras verticales se usarán 6 sacos.
- Se recomienda mezclar el cemento GEM con tierra de cultivo (humus) y carbón triturado para aumentar la eficiencia del tratamiento del suelo, tanto en su resistividad como en la cantidad de cemento GEM usado. Proveedores locales recomiendan una relación de un saco de tierra de cultivo y de carbón por cada saco de cemento GEM.
- Para las uniones se usará suelda exotérmica, en este caso en los 6 puntos de la malla.
- La distancia entre la malla y el tablero principal es de 15 m, por lo que se debe considerar esta cantidad de cable # 2/0 AWG para su unión.

Tabla 5.8. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio del Octógono.

			Proveedores (Loja/Guayaquil)			
			INDELEC		COMELEC	
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T	Costo U	Costo T
1	21	Conductor desnudo Nro. 2/0 AWG Cu	\$ 9,00	\$ 189,00	\$ 8,00	\$ 168,00
2	6	Varillas Copperweld de 5/8, Cu, de 1,5m.	\$ 8,00	\$ 48,00	\$ 8,84	\$ 53,04
3	6	Cápsulas de suelda exotérmica	\$ 8,00	\$ 48,00	\$ 6,10	\$ 36,60
4	20	Sacos de GEM	\$ 30,00	\$ 600,00	\$ 35,79	\$ 715,80
5	1	Operador de control	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 180,00	\$ 180,00
6	1	Transporte de materiales	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 30,00	\$ 30,00
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 985,00		\$ 1.183,44	
OTROS MATERIALES						
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T		
1	20	Sacos de tierra de cultivo	\$ 5,00	\$ 100,00		
2	20	Sacos de carbón	\$ 7,50	\$ 150,00		
3	gbl	Mano de obra civil, excavaciones		\$ 370,50		
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 620,50			
RESUMEN DE PRESUPUESTO						
Proveedor local			\$ 985,00			
Otros materiales			\$ 620,50			
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 1.605,00			

Fuente: Elaborado por los autores.

Se sugiere adquirir los materiales de la empresa INDELEC, debido al ahorro económico y al ser un proveedor local se puede dar la operable asesoría que se tendrá de parte de los técnicos de la empresa.

5.5. PLAN DE MEJORAS DEL CENTRO DE CONVENCIONES.

5.5.1. Análisis Técnico: Diseño.

Debido a que el sistema de puesta a tierra del Centro de convenciones no cumple con la resistencia establecida por las normas nacionales e internacionales y al no existir mayor información sobre el actual SPT, se sugiere diseñar una malla de puesta a tierra utilizando la metodología de la sección 3.2.

Según la Tabla 4.12 se dispone de un área de 10m x 6m.

De la sección 3.2.1, se tiene que el valor de la resistividad superficial es de 3000 Ωm . Así mismo se tiene que la altura de la capa superficial es de 15 cm.

De la Tabla 4.12 se tiene que el valor de la resistividad de la primera capa del suelo en el Centro de convenciones es 43,58 Ωm .

Con las ecuaciones 3.1 y 3.2 se pueden calcular la sección mínima del conductor, partiendo de los siguientes datos:

- $K_f = 7,06$
- $t_c = 0,5 \text{ s}$
- $P = 220\text{kVA} + 112,5 \text{ kVA} = 312 \text{ kVA}$
- $V_{\text{prim}} = 13200 \text{ V}$
- $V_{\text{sec}} = 220 \text{ V}$
- $Z = \frac{3.5+4}{2} = 3.75$
- $F_{\text{asim}} = 1,25$

$$I_{\text{cc-max-sec}} = 21344 \text{ A}$$

$$I_{\text{cc-asim}} = 26680 \text{ A}$$

$$A_{\text{kcmil}} = 26,68 * 7,06 * \sqrt{0,5} = 133,19 \text{ kcmil}$$

Según el cálculo se debería utilizar un cable calibre 2/0 AWG, con sección de 133 kcmil, que tiene un radio de 4,63mm.

Con las ecuaciones 3.3, 3.5 y 3.8 se procede a calcular los voltajes de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano, pero antes se debe partir de los siguientes datos:

- Peso del cuerpo humano: 50 kg
- $\rho_s = 3000\Omega\text{m}$
- $\rho = 43,5 \Omega\text{m}$
- $t_s = 0,5 \text{ s}$
- $h_s = 0,15 \text{ m}$

$$C_s = 0,773$$

$$E_{s50} = 2445,26 \text{ V}$$

$$E_{t50} = 734,35 \text{ V}$$

La malla será rectangular, tendrá un área de 9m x 6m, la separación entre conductores paralelos será de 3m, se complementará con 8 varillas ubicadas en su perímetro. La malla será enterrada a 0,5 metro de profundidad.

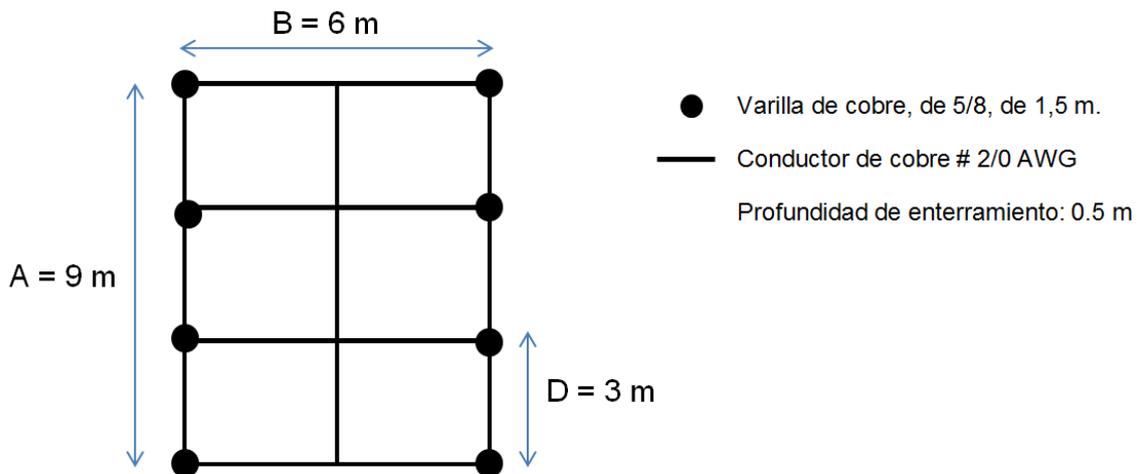


Figura 5.8. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Centro de convenciones.

Fuente: Elaborado por los autores.

Por lo tanto, la longitud de cable horizontal, de las varillas y la total es la siguiente:

$$L_C = 51 \text{ m}$$

$$L_T = L_C + 8 \text{ varillas de } 1,5 \text{ m}$$

$$L_T = 51 + (8 * 1,5) = 63 \text{ m}$$

Usando la ecuación 3.9 y partiendo de los siguientes datos se obtiene la resistencia de la malla:

$$\rho = 40,5 \Omega\text{m}$$

$$L_T = 51\text{m} + 12\text{m} = 63\text{m}$$

$$S = 54 \text{ m}^2.$$

$$h = 0,5$$

$$R_g = 1,692 \Omega$$

La corriente de la malla se calcula con la ecuación 3.16, tomando en cuenta un factor de decremento de 1,043 y un factor de división de corriente de falla de 0.6.

$$I_{cc-max-pri} = 616,16 \text{ A}$$

$$I_G = (3)616,16 \text{ A} * 0,6 * 1,043 = 1156,18 \text{ A}$$

El GPR es calculado con la fórmula 3.17:

$$GPR = 1156,18 \text{ A} * 1,6926 \Omega = 1954,77 \text{ V}$$

Debido a que GPR es mayor que el voltaje de toque $E_{t50} = 734,35 \text{ V}$ se debe continuar con la comparación de los voltajes de toque y de paso de la malla con los voltajes de toque y de paso tolerables para el cuerpo humano.

Para el cálculo del voltaje de toque y de paso de la malla se deben usar las ecuaciones 3.18 y 3.30, pero antes se deben realizar los cálculos necesarios partiendo de los siguientes datos:

- $K_{ii} = 1$ Cuando existen barras en las esquinas de la malla
- $h_0 = 1 \text{ m}$
- $D = 3 \text{ m}$
- $h = 0,5 \text{ m}$
- $S = 54 \text{ m}^2$
- $d = 4,63 \text{ mm}$
- $L_c = 51 \text{ m}$
- $L_r = 1,5 \text{ m}$
- $L_p = 63 \text{ m}$

$$K_h = 1,225$$

Ya que la malla es rectangular se tiene que $n_b = n_c = 1$ y queda por calcular n_a y n_b :

$$\begin{aligned} n_a &= 3,4 \\ n_b &= 1,01 \\ n &= 3,4 * 1,01 * 1 * 1 = 3,43 \end{aligned}$$

$$K_m = 0,897$$

$$K_i = 1,152$$

$$L_M = 71,63$$

$$E_m = 717,59 \text{ V}$$

$$K_S = 0,449$$

$$L_S = 48,45 \text{ m}$$

$$E_S = 530,61 \text{ V}$$

Voltaje de toque:

$$717,59 V < 7334,35 V$$

Voltaje de paso:

$$530,61 V < 2445,26 V$$

Debido a que los voltajes de toque y de paso de la malla son menores a sus respectivos voltajes tolerables por el ser humano, se puede asegurar que el diseño de la malla es el óptimo.

En la Tabla 5.9 se pueden ver los detalles de la malla de puesta a tierra diseñada para el Centro de convenciones.

Tabla 5.9. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el Centro de convenciones

Ítem	Descripción	Variable	Valor
1	Área de la malla	S	9m x 6m
2	Capa superficial	h_s	0,15 m
3	Resistividad de la capa superficial	ρ_s	43,5 Ω .m
4	Tratamiento de suelo	Cemento químico GEM	
5	Diámetro del conductor	d	2/0 AWG
6	Espaciamiento entre conductores paralelos	D	3m
7	Profundidad de enterramiento de la malla	h	0,5 m
8	Longitud de la malla horizontal	L_C	51 m
9	Número de barras verticales	n_r	8
10	Longitud de las barras verticales	L_r	1,5 m
11	Longitud efectiva de la malla	L_T	63 m
12	Distancia entre la malla y el tablero principal		5 m
13	Uniones	Suelda exotérmica	
14	Diagrama de la malla de puesta a tierra		Figura 5.9

Fuente: Elaborado por los autores.

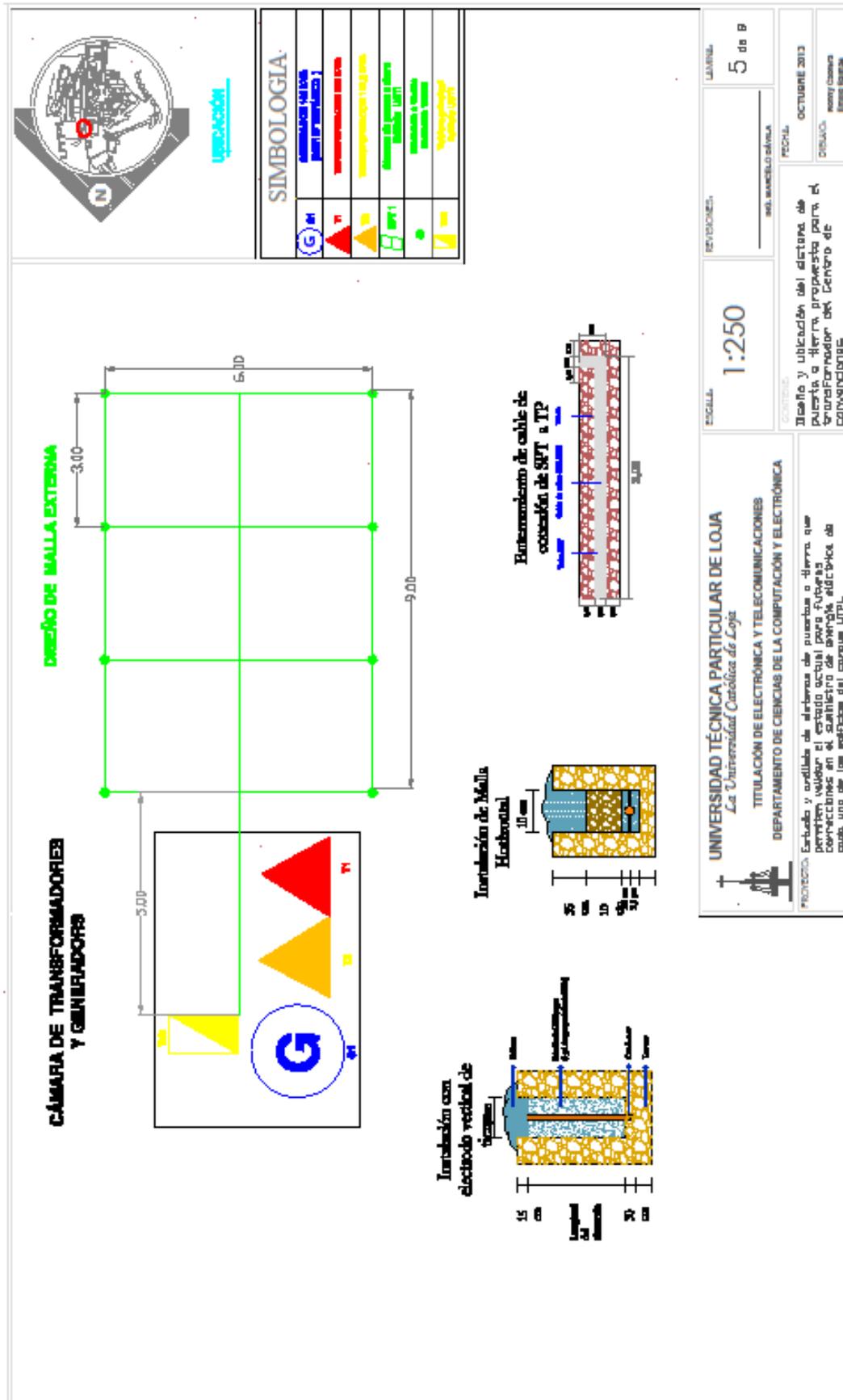


Figura 5.9. Acciones correctivas del SPT del edificio de Unidades Productivas.

Fuente: Elaborado por los autores.

5.5.2. Análisis Económico: Presupuesto.

Una vez realizadas las mediciones de la resistencia del sistema de puesta a tierra actual y realizando las acciones correctivas, basadas en normas nacionales e internacionales se procedió a realizar el diseño de un óptimo sistema de puesta a tierra para el centro de convenciones.

La información de precios fue obtenida por proveedores locales y nacionales: INDELEC (Loja) y COMELEC (Guayaquil). El análisis económico ha sido elaborado con precios vigentes a noviembre de 2013.

El valor del costo total de la malla, tomando en cuenta la mano de obra necesaria para implementación de la misma, se muestra en la Tabla 5.10 Se realizan las siguientes consideraciones:

- Para la instalación de las barras verticales se usará cemento GEM, fabricantes como Erico y Parres recomiendan que un saco de 10 Kg sea utilizado en un pozo de barra vertical, siguiendo el procedimiento de la sección 1.9.5.4. Por lo tanto se tiene que para el tratamiento de suelo de las barras verticales se usarán 8 sacos.
- Se recomienda mezclar el cemento GEM con tierra de cultivo (humus) y carbón triturado para aumentar la eficiencia del tratamiento del suelo, tanto en su resistividad como en la cantidad de cemento GEM usado. Proveedores locales recomiendan una relación de un saco de tierra de cultivo y de carbón por cada saco de cemento GEM.
- Para las uniones se usará suelda exotérmica, en este caso en los 12 puntos de la malla.
- La distancia entre la malla y el tablero principal es de 5 m, por lo que se debe considerar esta cantidad de cable # 2/0 AWG para su unión.

Tabla 5.10. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del Centro de convenciones.

			Proveedores (Loja/Guayaquil)			
			INDELEC		COMELEC	
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T	Costo U	Costo T
1	51	Conductor desnudo Nro. 2/0 AWG Cu	\$ 9,00	\$ 459,00	\$ 8,00	\$ 408,00
2	8	Varillas Copperweld de 5/8, Cu, de 1,5m.	\$ 8,00	\$ 64,00	\$ 8,84	\$ 70,72
3	12	Cápsulas de suelda exotérmica	\$ 8,00	\$ 96,00	\$ 6,10	\$ 73,20
4	8	Sacos de GEM	\$ 30,00	\$ 240,00	\$ 35,79	\$ 286,32
5	1	Operador de control	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 180,00	\$ 180,00
6	1	Transporte de materiales	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 30,00	\$ 30,00
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 959,00		\$ 1.048,24	
OTROS MATERIALES						
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T		
1	8	Sacos de tierra de cultivo	\$ 5,00	\$ 40,00		
2	8	Sacos de carbón	\$ 7,50	\$ 60,00		
3	gbl	Mano de obra civil, excavaciones		\$ 318,00		
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 418,00			
RESUMEN DE PRESUPUESTO						
Proveedor local			\$ 959,00			
Otros materiales			\$ 418,00			
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 1.377,00			

Fuente: Elaborado por los autores.

Se sugiere adquirir los materiales de la empresa INDELEC, debido al ahorro económico y al ser un proveedor local se puede dar la operable asesoría que se tendrá de parte de los técnicos de la empresa.

5.6. PLAN DE MEJORAS DE LA CAFETERÍA.

5.6.1. Análisis Técnico: Diseño.

Debido a que el sistema de puesta a tierra de la Cafetería no cumple con la resistencia establecida por las normas nacionales e internacionales y al no existir mayor información sobre el actual SPT, se sugiere diseñar una malla de puesta a tierra utilizando la metodología de la sección 3.2.

Según la Tabla 4.12 se dispone de un área de 10m x 6m.

De la sección 3.2.1, se tiene que el valor de la resistividad superficial es de 3000 Ωm . Así mismo se tiene que la altura de la capa superficial es de 15 cm.

De la Tabla 4.12 se tiene que el valor de la resistividad de la primera capa del suelo en el Centro de convenciones es 45,12 Ωm .

Con las ecuaciones 3.1 y 3.2 se pueden calcular la sección mínima del conductor, partiendo de los siguientes datos:

- $K_f = 7,06$
- $t_c = 0,5\text{s}$
- $P = 75 \text{ kVA} + 170 \text{ kVA} = 245 \text{ kVA}$
- $V_{\text{prim}} = 13200 \text{ V}$
- $V_{\text{sec}} = 220 \text{ V}$
- $Z = \frac{3.5+4}{2} = 3.75$
- $F_{\text{asim}} = 1,25$

$$I_{\text{cc-max-sec}} = 21344 \text{ A}$$

$$I_{\text{cc-asim}} = 26680 \text{ A}$$

$$A_{\text{kcmil}} = 26,68 * 7,06 * \sqrt{0,5} = 107 \text{ kcmil}$$

Según el cálculo se debería utilizar un cable 107 kcmil, pero por recomendación de las normativas nacionales e internacionales se utilizará el calibre 2/0 AWG, con sección de 133 kcmil, que tiene un radio de 4,63mm.

Con las ecuaciones 3.3, 3.5 y 3.8 se procede a calcular los voltajes de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano, pero antes se debe partir de los siguientes datos:

- Peso del cuerpo humano: 50 kg
- $\rho_s = 3000\Omega\text{m}$
- $\rho = 45,12 \Omega\text{m}$
- $t_s = 0,5 \text{ s}$
- $h_s = 0,15 \text{ m}$

$$C_s = 0,773$$

$$E_{s50} = 2445,74 \text{ V}$$

$$E_{t50} = 734,47 \text{ V}$$

La malla se enterrará a 0.5 m de profundidad, será rectangular, tendrá un área de 9m x 6m, la separación entre conductores paralelos será de 3m. La malla se complementa con 4 varillas de 1,5 m ubicadas en cada esquina

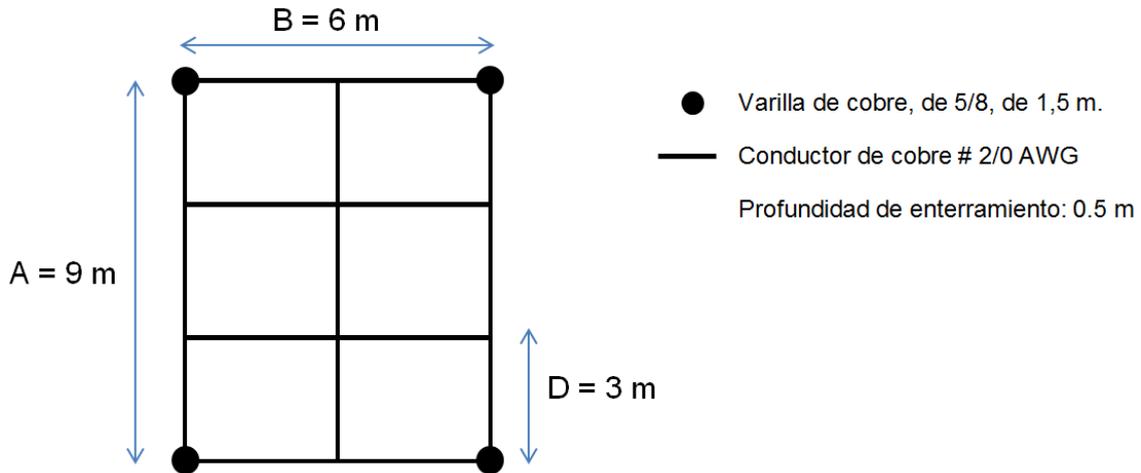


Figura 5.10. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Cafetería.

Fuente: Elaborado por los autores.

Por lo tanto, la longitud de cable horizontal, de las varillas y la total es la siguiente:

$$L_C = 51 \text{ m}$$

$$L_T = L_C + 4 \text{ varillas de } 1,5 \text{ m}$$

$$L_T = 51 + (4 * 1,5) = 57 \text{ m}$$

Usando la ecuación 3.9 y partiendo de los siguientes datos se obtiene la resistencia de la malla:

$$\rho = 5 \Omega\text{m}$$

$$L_T = 51\text{m} + 6\text{m} = 57\text{m}$$

$$S = 54 \text{ m}^2.$$

$$h = 0,5$$

$$R_g = 1,8 \Omega$$

La corriente de la malla se calcula con la ecuación 3.16, tomando en cuenta un factor de decremento de 1,043 y un factor de división de corriente de falla de 0.5.

$$I_{cc\text{-max-pri}} = 494,95 \text{ A}$$

$$I_G = (3)(494,95) \text{ A} * 0,6 * 1,043 = 929,22 \text{ A}$$

El GPR es calculado con la fórmula 3.17:

$$GPR = 929,22A * 1,8 \Omega = 1674,64 V$$

Debido a que GPR es mayor que el voltaje de toque $E_{t50} = 734,47 V$ se debe continuar con la comparación de los voltajes de toque y de paso de la malla con los voltajes de toque y de paso tolerables para el cuerpo humano.

Para el cálculo del voltaje de toque y de paso de la malla se deben usar las ecuaciones 3.18 y 3.30, pero antes se deben realizar los cálculos necesarios partiendo de los siguientes datos:

- $K_{ii} = 1$ Cuando existen barras en las esquinas de la malla
- $h_0 = 1 \text{ m}$
- $D = 3 \text{ m}$
- $h = 0,5 \text{ m}$
- $S = 54 \text{ m}^2$
- $d = 4,63 \text{ mm}$
- $L_c = 51 \text{ m}$
- $L_r = 1,5 \text{ m}$
- $L_p = 57 \text{ m}$

$$K_h = 1,225$$

Ya que la malla es rectangular se tiene que $n_b = n_c = 1$ y queda por calcular n_a y n_b :

$$\begin{aligned} n_a &= 3,4 \\ n_b &= 1,01 \\ n &= 3,4 * 1,01 * 1 * 1 = 3,43 \end{aligned}$$

$$K_m = 0,897$$

$$K_i = 1,152$$

$$L_M = 61,31$$

$$E_m = 706,59 V$$

$$K_S = 0,449$$

$$L_S = 43,35 \text{ m}$$

$$E_S = 499,86 V$$

Voltaje de toque:

$$706,59 \text{ V} < 734,57 \text{ V}$$

Voltaje de paso:

$$499,86 \text{ V} < 2445,74 \text{ V}$$

Debido a que los voltajes de toque y de paso de la malla son menores a sus respectivos voltajes tolerables por el ser humano, se puede asegurar que el diseño de la malla es el óptimo.

En la Tabla 5.11 se pueden ver los detalles de la malla de puesta a tierra diseñada para la Cafetería.

Tabla 5.11. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para la Cafetería.

Ítem	Descripción	Variable	Valor
1	Área de la malla	S	9m x 6m
2	Capa superficial	h_s	0,15 m
3	Resistividad de la capa superficial	ρ_s	3000 Ω .m
4	Tratamiento de suelo	Cemento químico GEM	
5	Diámetro del conductor	d	2/0 AWG
6	Espaciamiento entre conductores paralelos	D	3 m
7	Profundidad de enterramiento de la malla	h	0,5 m
8	Longitud de la malla horizontal	L_C	51 m
9	Número de barras verticales	n_r	4
10	Longitud de las barras verticales	L_r	1,5 m
11	Longitud efectiva de la malla	L_T	57 m
12	Distancia entre la malla y el tablero principal		10 m
13	Uniones	Suelda exotérmica	
14	Diagrama de la malla de puesta a tierra		Figura 5.11

Fuente: Elaborado por los autores.

5.6.2. Análisis Económico: Presupuesto.

Una vez realizadas las mediciones de la resistencia del sistema de puesta a tierra actual y realizando las acciones correctivas, basadas en normas nacionales e internacionales se procedió a realizar el diseño de un óptimo sistema de puesta a tierra para la Cafetería.

La información de precios fue obtenida por proveedores locales y nacionales: INDELEC (Loja) y COMELEC (Guayaquil). El análisis económico ha sido elaborado con precios vigentes a noviembre de 2013.

El valor del costo total de la malla, tomando en cuenta la mano de obra necesaria para implementación de la misma, se muestra en la Tabla 5.12. Se realizan las siguientes consideraciones:

- Para la instalación de las barras verticales se usará cemento GEM, fabricantes como Erico y Parres recomiendan que un saco de 10 Kg sea utilizado en un pozo de barra vertical, siguiendo el procedimiento de la sección 1.9.5.4. Por lo tanto se tiene que para el tratamiento de suelo de las barras verticales se usarán 6 sacos.
- Se recomienda mezclar el cemento GEM con tierra de cultivo (humus) y carbón triturado para aumentar la eficiencia del tratamiento del suelo, tanto en su resistividad como en la cantidad de cemento GEM usado. Proveedores locales recomiendan una relación de un saco de tierra de cultivo y de carbón por cada saco de cemento GEM.
- Para las uniones se usará suelda exotérmica, en este caso en los 12 puntos de la malla.
- La distancia entre la malla y el tablero principal es de 10 m, por lo que se debe considerar esta cantidad de cable # 2/0 AWG para su unión.

Tabla 5.12. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT de la Cafetería.

			Proveedores (Loja/Guayaquil)			
			INDELEC		COMELEC	
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T	Costo U	Costo T
1	51	Conductor desnudo Nro. 2/0 AWG Cu	\$ 9,00	\$ 459,00	\$ 8,00	\$ 408,00
2	6	Varillas Copperweld de 5/8, Cu, de 1,5m.	\$ 8,00	\$ 48,00	\$ 8,84	\$ 53,04
3	12	Cápsulas de suelda exotérmica	\$ 8,00	\$ 96,00	\$ 6,10	\$ 73,20
4	6	Sacos de GEM	\$ 30,00	\$ 180,00	\$ 35,79	\$ 214,74
5	1	Operador de control	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 180,00	\$ 180,00
6	1	Transporte de materiales	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 30,00	\$ 30,00
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 883,00		\$ 958,98	
OTROS MATERIALES						
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T		
1	6	Sacos de tierra de cultivo	\$ 5,00	\$ 30,00		
2	6	Sacos de carbón	\$ 7,50	\$ 45,00		
3	gbl	Mano de obra civil, excavaciones		\$ 288,00		
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 363,00			
RESUMEN DE PRESUPUESTO						
Proveedor local			\$ 883,00			
Otros materiales			\$ 363,00			
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 1.246,00			

Fuente: Elaborado por los autores.

Se sugiere adquirir los materiales de la empresa INDELEC, debido al ahorro económico y al ser un proveedor local se puede dar la operable asesoría que se tendrá de parte de los técnicos de la empresa.

5.7. PLAN DE MEJORAS DEL EDIFICIO DE LABORATORIOS.

5.7.1. Análisis Técnico: Diseño.

Debido a que el sistema de puesta a tierra del edificio de Laboratorios no cumple con la resistencia establecida por las normas nacionales e internacionales y al no existir mayor información sobre el actual SPT, se sugiere diseñar una malla de puesta a tierra utilizando la metodología de la sección 3.2.

Según la Tabla 4.12 se dispone de un área de 6m x 3m.

De la sección 3.2.1, se tiene que el valor de la resistividad superficial es de 3000 Ωm . Así mismo se tiene que la altura de la capa superficial es de 15 cm.

De la Tabla 4.12 se tiene que el valor de la resistividad de la primera capa del suelo en el edificio de Laboratorios es de 245,67 Ωm . Tomando como referencia otros cálculos de mallas de puesta a tierra, éste valor de resistividad es elevado, por lo que se debe realizar tratamiento en el suelo para bajar su resistividad. En la sección 1.9 se pueden ver las principales técnicas para mejorar la resistividad del suelo, se recomienda usar un tratamiento químico aplicando el cemento químico GEM, siguiendo los pasos que se detallan en la sección 1.9.5.4. Como ya se revisó en ésta sección, la resistividad del terreno una vez aplicado el cemento químico GEM en terrenos de 50 Ωm a 300 Ωm , es de 30 Ωm .

Con las ecuaciones 3.1 y 3.2 se pueden calcular la sección mínima del conductor, partiendo de los siguientes datos:

- $K_f = 7,06$
- $t_c = 0,5\text{s}$
- $P = 250 \text{ kVA}$
- $V_{\text{prim}} = 13200 \text{ V}$
- $V_{\text{sec}} = 220 \text{ V}$
- $Z = 4$
- $F_{\text{asim}} = 1,25$

$$I_{\text{cc-max-sec}} = 16402 \text{ A}$$

$$I_{\text{cc-asim}} = 20502,40 \text{ A}$$

$$A_{\text{kcmil}} = 3,280 * 7,06 * \sqrt{0,5} = 102,3 \text{ kcmil}$$

Según el cálculo se debería utilizar un cable 102,3 kcmil, pero por recomendación de las normativas nacionales e internacionales se utilizará el calibre 2/0 AWG, con sección de 133 kcmil, que tiene un radio de 4,63mm.

Con las ecuaciones 3.3, 3.5 y 3.8 se procede a calcular los voltajes de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano, pero antes se debe partir de los siguientes datos:

- Peso del cuerpo humano: 50 kg
- $\rho_s = 3000\Omega\text{m}$
- $\rho = 30 \Omega\text{m}$
- $t_s = 0,5 \text{ s}$

- $h_s = 0,15 \text{ m}$

$$C_s = 0,772$$

$$E_{s50} = 2442,31 \text{ V}$$

$$E_{t50} = 733,61 \text{ V}$$

La malla será rectangular, tundra un área de 6m x 3m, la separación entre conductores paralelos será de 3m. La malla se complementará con 6 varillas de 1,5m cada una, ubicadas en su perímetro. La malla será enterrada a 0,5 metros de profundidad.

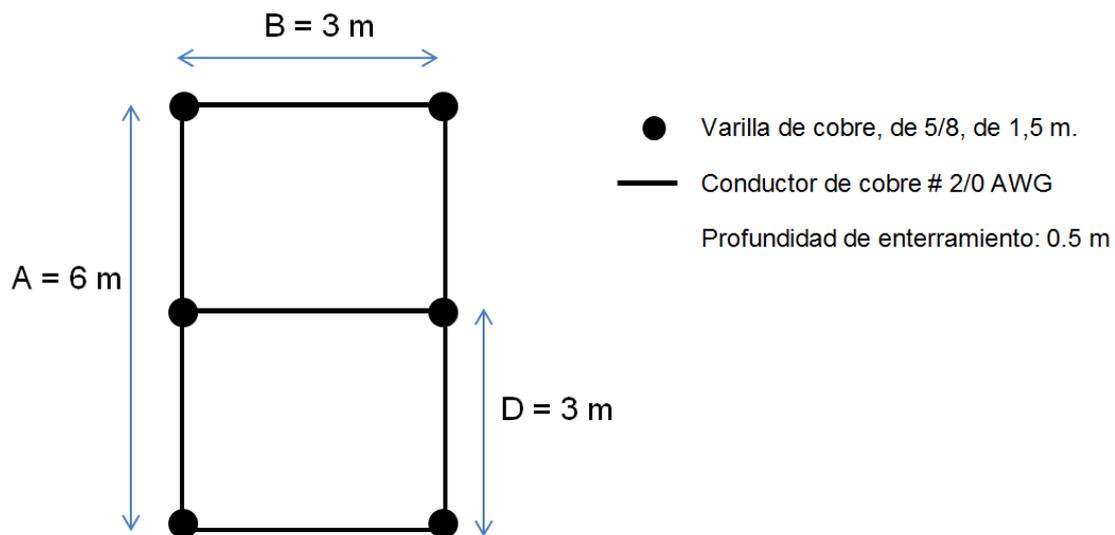


Figura 5.12. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Edificio de Laboratorios.

Fuente: Elaborado por los autores.

Por lo tanto, la longitud de cable horizontal, de las varillas y la total es la siguiente:

$$L_C = 21 \text{ m}$$

$$L_T = L_C + 6 \text{ varillas de } 1,5 \text{ m}$$

$$L_T = 21 + (6 * 1,5) = 30 \text{ m}$$

Usando la ecuación 3.9 y partiendo de los siguientes datos se obtiene la resistencia de la malla:

$$\rho = 30 \Omega\text{m}$$

$$L_T = 21\text{m} + 9\text{m} = 30\text{m}$$

$$S = 18 \text{ m}^2.$$

$$h = 0,5$$

$$R_g = 1,314 \Omega$$

La corriente de la malla se calcula con la ecuación 3.16, tomando en cuenta un factor de decremento de 1,043 y un factor de división de corriente de falla de 0.5.

$$I_{cc-max-pri} = 473,48 \text{ A}$$

$$I_G = (3)473,48 \text{ A} * 0,6 * 1,043 = 888,92 \text{ A}$$

El GPR es calculado con la fórmula 3.17:

$$\text{GPR} = 888,92 \text{ A} * 1,314 \Omega = 1168,2 \text{ V}$$

Debido a que GPR es mayor que el voltaje de toque $E_{t50} = 733,61 \text{ V}$ se debe continuar con la comparación de los voltajes de toque y de paso de la malla con los voltajes de toque y de paso tolerables para el cuerpo humano.

Para el cálculo del voltaje de toque y de paso de la malla se deben usar las ecuaciones 3.18 y 3.30, pero antes se deben realizar los cálculos necesarios partiendo de los siguientes datos:

- $K_{ii} = 1$ Cuando existen barras en las esquinas de la malla
- $h_0 = 1 \text{ m}$
- $D = 3 \text{ m}$
- $h = 0,5 \text{ m}$
- $S = 18 \text{ m}^2$
- $d = 4,63 \text{ mm}$
- $L_c = 21 \text{ m}$
- $L_r = 1,5 \text{ m}$
- $L_p = 18 \text{ m}$

$$K_h = 1,225$$

Ya que la malla es rectangular se tiene que $n_b = n_c = 1$ y queda por calcular n_a y n_b :

$$n_a = 2,33$$

$$n_b = 1,03$$

$$n = 2,33 * 1,03 * 1 * 1 = 2,4$$

$$K_m = 0,953$$

$$K_i = 1$$

$$L_M = 37,41$$

$$E_m = 679.21 \text{ V}$$

$$K_S = 0.489$$

$$L_S = 23,4 \text{ m}$$

$$E_S = 557,4 \text{ V}$$

Voltaje de toque:

$$679.21 \text{ V} < 733,61 \text{ V}$$

Voltaje de paso:

$$557,4 \text{ V} < 2442,31 \text{ V}$$

Debido a que los voltajes de toque y de paso de la malla son menores a sus respectivos voltajes tolerables por el ser humano, se puede asegurar que el diseño de la malla es el óptimo.

En la Tabla 5.13 se pueden ver los detalles de la malla de puesta a tierra diseñada para el edificio de Laboratorios.

Tabla 5.13. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio de Laboratorios.

Ítem	Descripción	Variable	Valor
1	Área de la malla	S	6m x 3m
2	Capa superficial	h_s	0,15 m
3	Resistividad de la capa superficial	ρ_s	3000 Ω .m
4	Tratamiento de suelo	Cemento químico GEM	
5	Diámetro del conductor	d	2/0 AWG
6	Espaciamiento entre conductores paralelos	D	3 m
7	Profundidad de enterramiento de la malla	h	0,5 m
8	Longitud de la malla horizontal	L_C	21 m
9	Número de barras verticales	n_r	6
10	Longitud de las barras verticales	L_r	1,5 m
11	Longitud efectiva de la malla	L_T	30 m
12	Distancia entre la malla y el tablero principal		10 m
13	Uniones	Suelda exotérmica	
14	Diagrama de la malla de puesta a tierra		Figura 5.13

Fuente: Elaborado por los autores.

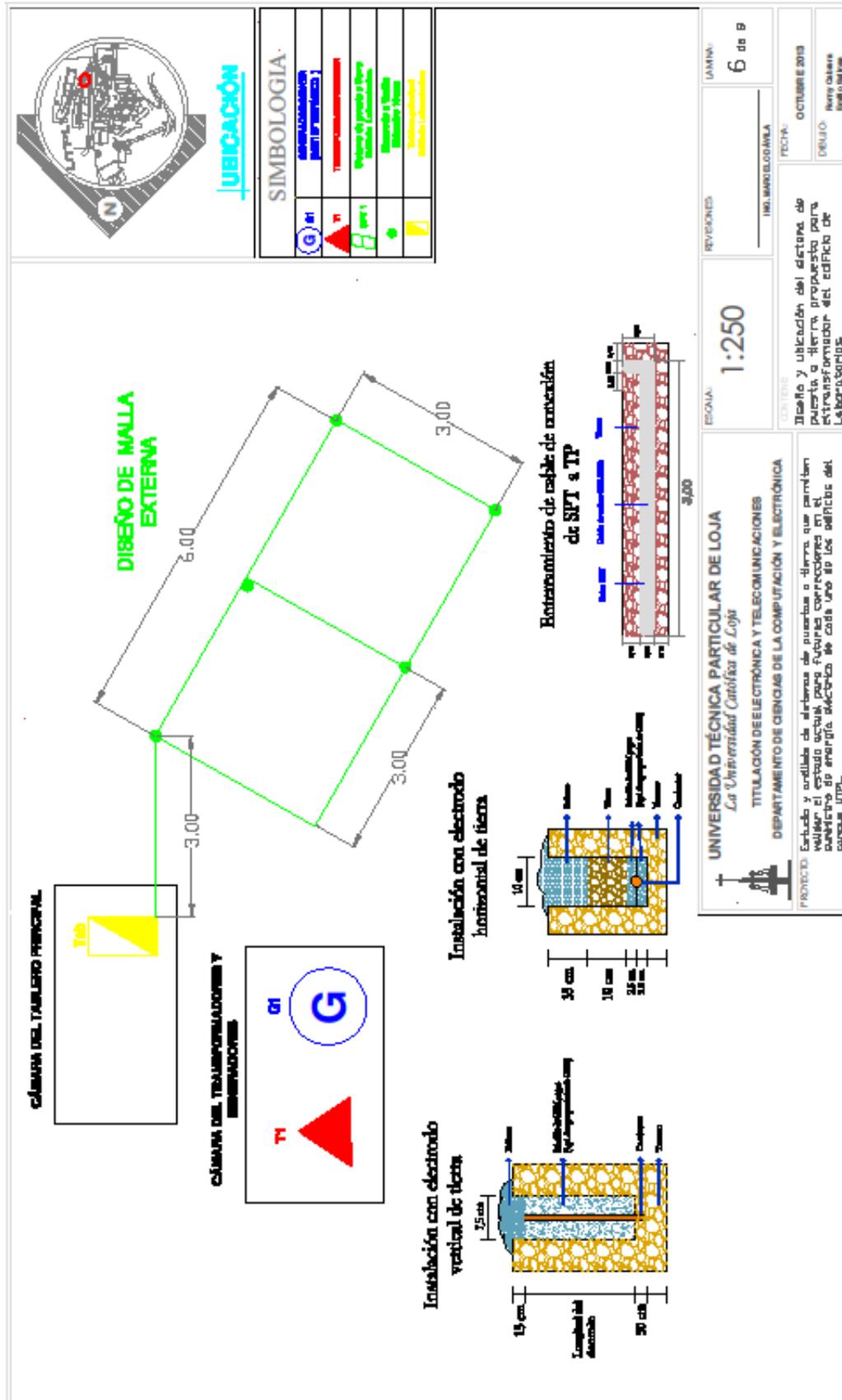


Figura 5.13. Acciones correctivas del SPT del edificio de Laboratorios.

Fuente: Elaborado por los autores.

5.7.2. Análisis Económico: Presupuesto.

Una vez realizadas las mediciones de la resistencia del sistema de puesta a tierra actual y realizando las acciones correctivas, basadas en normas nacionales e internacionales se procedió a realizar el diseño de un óptimo sistema de puesta a tierra para el edificio del Octógono.

La información de precios fue obtenida por proveedores locales y nacionales: INDELEC (Loja) y COMELEC (Guayaquil). El análisis económico ha sido elaborado con precios vigentes a noviembre de 2013.

El valor del costo total de la malla, tomando en cuenta la mano de obra necesaria para implementación de la misma, se muestra en la Tabla 5.14. Se realizan las siguientes consideraciones:

- Para el tratamiento de suelo se usará GEM. Fabricantes como Erico y Parres recomiendan que un saco de 10 Kg sea utilizado en 3 metros de cable horizontal, o en un pozo de barras verticales, siguiendo el procedimiento de la sección 1.9.5.4. Por lo tanto se tiene que para el tratamiento de suelo de la malla horizontal se ocuparán 7 sacos de GEM y para el tratamiento de suelo de las barras verticales se usarán 6 sacos.
- Se recomienda mezclar el cemento GEM con tierra de cultivo (humus) y carbón triturado para aumentar la eficiencia del tratamiento del suelo, tanto en su resistividad como en la cantidad de cemento GEM usado. Proveedores locales recomiendan una relación de un saco de tierra de cultivo y de carbón por cada saco de cemento GEM.
- Para las uniones se usará suelda exotérmica, en este caso en los 6 puntos de la malla.
- La distancia entre la malla y el tablero principal es de 10 m, por lo que se debe considerar esta cantidad de cable # 2/0 AWG para su unión.

Tabla 5.14. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio de Laboratorios.

			Proveedores (Loja/Guayaquí)			
			INDELEC		COMELEC	
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T	Costo U	Costo T
1	21	Conductor desnudo Nro. 2/0 AWG Cu	\$ 9,00	\$ 189,00	\$ 8,00	\$ 168,00
2	6	Varillas Copperweld de 5/8, Cu, de 1,5m.	\$ 8,00	\$ 48,00	\$ 8,84	\$ 53,04
3	6	Cápsulas de suelda exotérmica	\$ 8,00	\$ 48,00	\$ 6,10	\$ 36,60
4	13	Sacos de GEM	\$ 30,00	\$ 390,00	\$ 35,79	\$ 465,27
5	1	Operador de control	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 180,00	\$ 180,00
6	1	Transporte de materiales	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 30,00	\$ 30,00
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 775,00		\$ 932,91	
OTROS MATERIALES						
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T		
1	13	Sacos de tierra de cultivo	\$ 5,00	\$ 65,00		
2	13	Sacos de carbón	\$ 7,50	\$ 97,50		
3	gbl	Mano de obra civil, excavaciones		\$ 282,00		
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 444,50			
RESUMEN DE PRESUPUESTO						
Proveedor local			\$ 775,00			
Otros materiales			\$ 444,50			
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 1.219,50			

Fuente: Elaborado por los autores.

Se sugiere adquirir los materiales de la empresa INDELEC, debido al ahorro económico y al ser un proveedor local se puede dar la operable asesoría que se tendrá de parte de los técnicos de la empresa.

5.8. PLAN DE MEJORAS DE LA PLANTA ECOLAC.

5.8.1. Análisis Técnico: Diseño.

Debido a que el sistema de puesta a tierra la Planta ECOLAC no cumple con la resistencia establecida por las normas nacionales e internacionales y al no existir mayor información sobre el actual SPT, se sugiere diseñar una malla de puesta a tierra utilizando la metodología de la sección 3.2.

Según la Tabla 4.12 se dispone de un área de 8m x 6m.

De la sección 3.2.1, se tiene que el valor de la resistividad superficial es de 3000 Ωm . Así mismo se tiene que la altura de la capa superficial es de 15 cm.

De la Tabla 4.12 se tiene que el valor de la resistividad de la primera capa del suelo en la Planta ECOLAC es de 120 Ωm . Tomando como referencia otros cálculos de mallas de puesta a tierra, éste valor de resistividad es elevado, por lo que se debe realizar tratamiento en el suelo para bajar su resistividad. En la sección 1.9 se pueden ver las principales técnicas para mejorar la resistividad del suelo, se recomienda usar un tratamiento químico aplicando el cemento químico GEM, siguiendo los pasos que se detallan en la sección 1.9.5.4. Como ya se revisó en ésta sección, la resistividad del terreno una vez aplicado el cemento químico GEM en terrenos de 50 Ωm a 300 Ωm , es de 30 Ωm .

Con las ecuaciones 3.1 y 3.2 se pueden calcular la sección mínima del conductor, partiendo de los siguientes datos:

- $K_f = 7,06$
- $t_c = 0,5\text{s}$
- $P = 250 \text{ kVA}$
- $V_{\text{prim}} = 13200 \text{ V}$
- $V_{\text{sec}} = 220 \text{ V}$
- $Z = 4$
- $F_{\text{asim}} = 1,25$

$$I_{\text{cc-max-sec}} = 19682 \text{ A}$$

$$I_{\text{cc-asim}} = 246020 \text{ A}$$

$$A_{\text{kcmil}} = 24,60 * 7,06 * \sqrt{0,5} = 122,82 \text{ kcmil}$$

Según el cálculo se debería utilizar un cable 122,82 kcmil, pero por recomendación de las normativas nacionales e internacionales se utilizará el calibre 2/0 AWG, con sección de 133 kcmil, que tiene un radio de 4,63mm.

Con las ecuaciones 3.3, 3.5 y 3.8 se procede a calcular los voltajes de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano, pero antes se debe partir de los siguientes datos:

- Peso del cuerpo humano: 50 kg
- $\rho_s = 3000\Omega\text{m}$
- $\rho = 30 \Omega\text{m}$
- $t_s = 0,5 \text{ s}$

- $h_s = 0,15 \text{ m}$

$$C_s = 0,772$$

$$E_{s50} = 2442,31 \text{ V}$$

$$E_{t50} = 733,61 \text{ V}$$

La malla será rectangular, tundra un área de 6m x 6m, la separación entre conductores paralelos será de 3m. La malla se complementará con 4 varillas de 1,5m cada una, ubicadas en las esquinas. La malla será enterrada a 0,5 metro de profundidad.

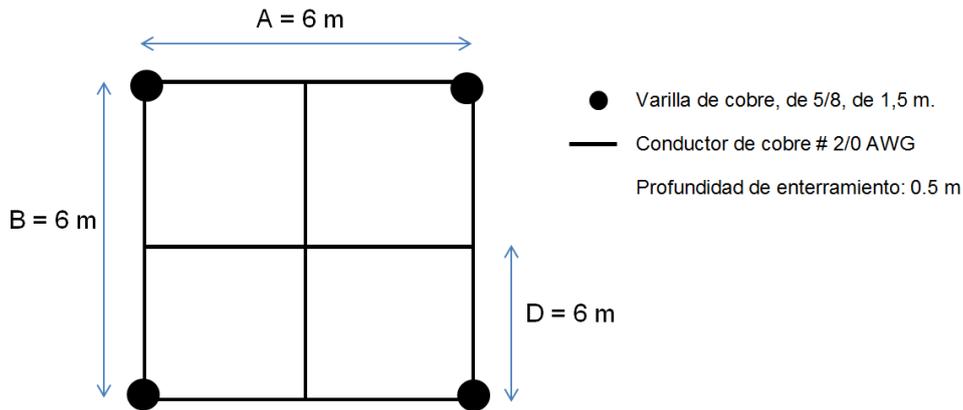


Figura 5.14. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Planta ECOLAC.

Fuente: Elaborado por los autores.

Por lo tanto, la longitud de cable horizontal, de las varillas y la total es la siguiente:

$$L_C = 36 \text{ m}$$

$$L_T = L_C + 4 \text{ varillas de } 1,5 \text{ m}$$

$$L_T = 36 + (4 * 1,5) = 42 \text{ m}$$

Usando la ecuación 3.9 y partiendo de los siguientes datos se obtiene la resistencia de la malla:

$$\rho = 30 \Omega\text{m}$$

$$L_T = 36\text{m} + 6\text{m} = 42 \text{ m}$$

$$S = 36 \text{ m}^2.$$

$$h = 0,5$$

$$R_g = 1,781 \Omega$$

La corriente de la malla se calcula con la ecuación 3.16, tomando en cuenta un factor de decremento de 1,043 y un factor de división de corriente de falla de 0.5.

$$I_{cc-max-pri} = 568,18 \text{ A}$$

$$I_G = (3)(568,18) \text{ A} * 0,6 * 1,043 = 1066,7 \text{ A}$$

El GPR es calculado con la fórmula 3.17:

$$GPR = 1066,7 \text{ A} * 1,78 \Omega = 1899,3 \text{ V}$$

Debido a que GPR es mayor que el voltaje de toque $E_{t50} = 733,61 \text{ V}$ se debe continuar con la comparación de los voltajes de toque y de paso de la malla con los voltajes de toque y de paso tolerables para el cuerpo humano.

Para el cálculo del voltaje de toque y de paso de la malla se deben usar las ecuaciones 3.18 y 3.30, pero antes se deben realizar los cálculos necesarios partiendo de los siguientes datos:

- $K_{ij} = 1$ Cuando existen barras en las esquinas de la malla
- $h_0 = 1 \text{ m}$
- $D = 2 \text{ m}$
- $h = 0,5 \text{ m}$
- $S = 48 \text{ m}^2$
- $d = 11,86 \text{ mm}$
- $L_c = 62 \text{ m}$
- $L_r = 12 \text{ m}$
- $L_p = 28 \text{ m}$

$$K_h = 1,225$$

Ya que la malla es cuadrada se tiene que $n_b = n_c = n_d = 1$ y queda por calcular n_a :

$$n_a = 3$$

$$n = 3 * 1 * 1 * 1 = 3$$

$$K_m = 0,918$$

$$K_i = 1,088$$

$$L_M = 46,59$$

$$E_m = 685,65 \text{ V}$$

$$K_S = 0,462$$

$$L_S = 32,1 \text{ m}$$

$$E_S = 501,44 \text{ V}$$

Voltaje de toque:

$$685,65 \text{ V} < 733,61 \text{ V}$$

Voltaje de paso:

$$501,44 \text{ V} < 2442,31 \text{ V}$$

Debido a que los voltajes de toque y de paso de la malla son menores a sus respectivos voltajes tolerables por el ser humano, se puede asegurar que el diseño de la malla es el óptimo.

En la Tabla 5.15 se pueden ver los detalles de la malla de puesta a tierra diseñada para la planta ECOLAC.

Tabla 5.15. Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para la Planta ECOLAC.

Ítem	Descripción	Variable	Valor
1	Área de la malla	S	6m x 6m
2	Capa superficial	h_s	0,15 m
3	Resistividad de la capa superficial	ρ_s	3000 Ω .m
4	Tratamiento de suelo	Cemento químico GEM	
5	Diámetro del conductor	d	2/0 AWG
6	Espaciamiento entre conductores paralelos	D	3 m
7	Profundidad de enterramiento de la malla	h	0,5 m
8	Longitud de la malla horizontal	L_C	36 m
9	Número de barras verticales	n_r	4
10	Longitud de las barras verticales	L_r	1,5 m
11	Longitud efectiva de la malla	L_T	42 m
12	Distancia entre la malla y el tablero principal		10 m
13	Uniones	Suelda exotérmica	
14	Diagrama de la malla de puesta a tierra		Figura 5.15

Fuente: Elaborado por los autores.

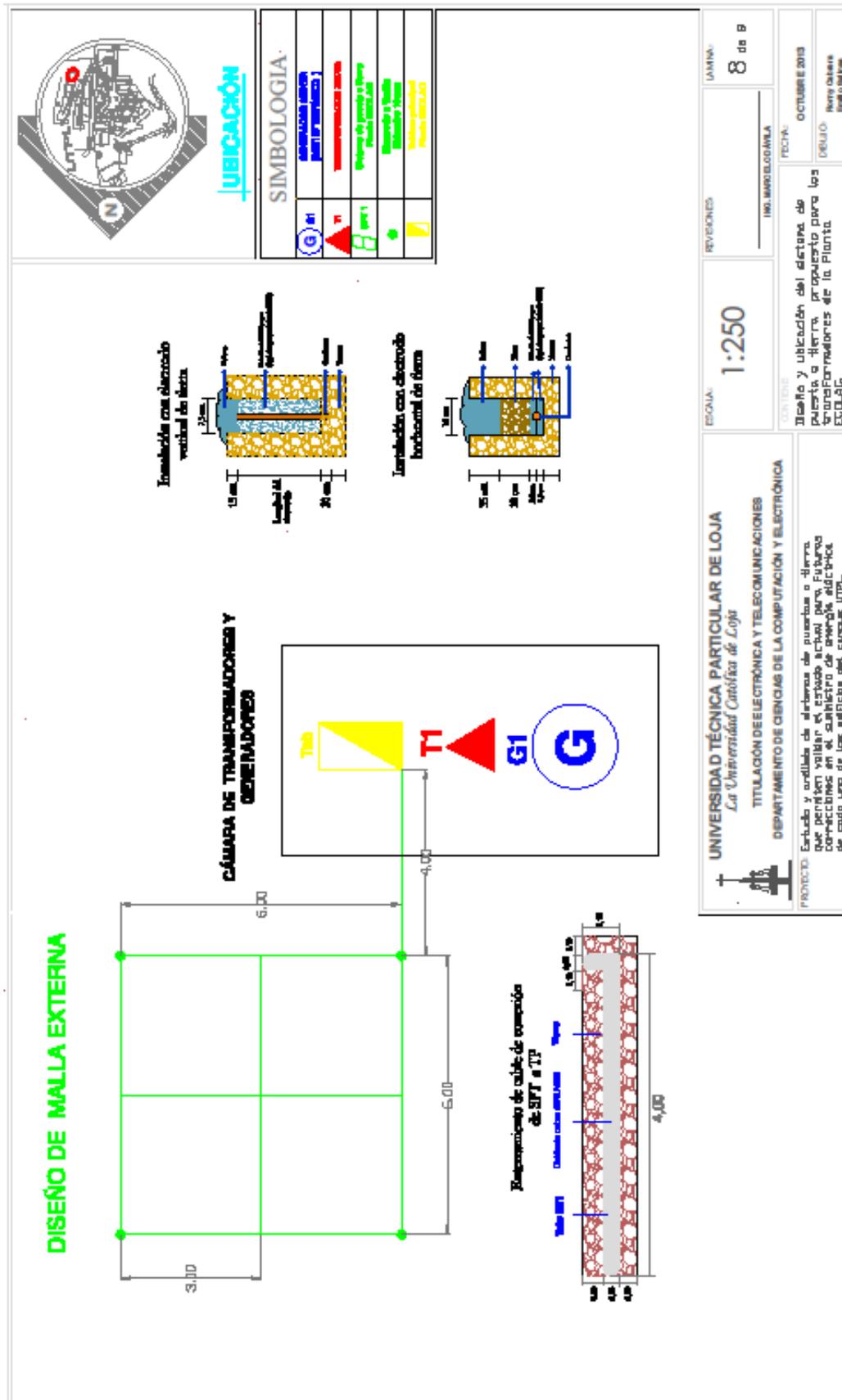


Figura 5.15. Acciones correctivas del SPT de la Planta de lácteos ECOLAC.

Fuente: Elaborado por los autores.

5.8.2. Análisis Económico: Presupuesto.

Una vez realizadas las mediciones de la resistencia del sistema de puesta a tierra actual y realizando las acciones correctivas, basadas en normas nacionales e internacionales se procedió a realizar el diseño de un óptimo sistema de puesta a tierra para la planta ECOLAC.

La información de precios fue obtenida por proveedores locales y nacionales: INDELEC (Loja) y COMELEC (Guayaquil). El análisis económico ha sido elaborado con precios vigentes a noviembre de 2013.

El valor del costo total de la malla, tomando en cuenta la mano de obra necesaria para implementación de la misma, se muestra en la Tabla 5.16. Se realizan las siguientes consideraciones:

- Para el tratamiento de suelo se usará GEM. Fabricantes como Erico y Parres recomiendan que un saco de 10 Kg sea utilizado en 3 metros de cable horizontal, o en un pozo de barras verticales, siguiendo el procedimiento de la sección 1.9.5.4. Por lo tanto se tiene que para el tratamiento de suelo de la malla horizontal se ocuparán 12 sacos de GEM y para el tratamiento de suelo de las barras verticales se usarán 4 sacos.
- Se recomienda mezclar el cemento GEM con tierra de cultivo (humus) y carbón triturado para aumentar la eficiencia del tratamiento del suelo, tanto en su resistividad como en la cantidad de cemento GEM usado. Proveedores locales recomiendan una relación de un saco de tierra de cultivo y de carbón por cada saco de cemento GEM.
- Para las uniones se usará suelda exotérmica, en este caso en los 9 puntos de la malla.
- La distancia entre la malla y el tablero principal es de 10 m, por lo que se debe considerar esta cantidad de cable # 2/0 AWG para su unión.

Tabla 5.16. Costos de implementación del plan de mejoras del SPT de la Planta ECOLAC.

			Proveedores (Loja/Guayaquí)			
			INDELEC		COMELEC	
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T	Costo U	Costo T
1	36	Conductor desnudo Nro. 2/0 AWG Cu	\$ 9,00	\$ 324,00	\$ 8,00	\$ 288,00
2	4	Varillas Copperweld de 5/8, Cu, de 1,5m.	\$ 8,00	\$ 32,00	\$ 8,84	\$ 35,36
3	9	Cápsulas de suelda exotérmica	\$ 8,00	\$ 72,00	\$ 6,10	\$ 54,90
4	16	Sacos de GEM	\$ 30,00	\$ 480,00	\$ 35,79	\$ 572,64
5	1	Operador de control	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 180,00	\$ 180,00
6	1	Transporte de materiales	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 30,00	\$ 30,00
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 1.008,00		\$ 1.160,90	
OTROS MATERIALES						
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T		
1	16	Sacos de tierra de cultivo	\$ 5,00	\$ 80,00		
2	16	Sacos de carbón	\$ 7,50	\$ 120,00		
3	gbl	Mano de obra civil, excavaciones		\$ 363,00		
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 563,00			
RESUMEN DE PRESUPUESTO						
Proveedor local			\$ 1.008,00			
Otros materiales			\$ 563,00			
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 1.571,00			

Fuente: Elaborado por los autores.

Se sugiere adquirir los materiales de la empresa INDELEC, debido al ahorro económico y al ser un proveedor local se puede dar la operable asesoría que se tendrá de parte de los técnicos de la empresa.

5.9. PLAN DE MEJORAS DE LA PLANTA CERART.

5.9.1. Análisis Técnico: Diseño.

El sistema de puesta a tierra de la Planta CERART no puede corregirse con la implementación de una nueva malla de puesta a tierra, debido a que no existe el espacio físico necesario. Es por esto que se deben recurrir a otras técnicas para lograr que el sistema de puesta a tierra cumpla con los requisitos establecidos por las normativas nacionales e internacionales.

Las técnicas para mejorar la resistividad del terreno y con ello mejorar la resistencia del SPT se mencionan en la sección 1.9. Entre las técnicas más eficientes para mejorar la resistividad del terreno está el tratamiento químico del terreno, estableciendo que la acción correctiva para el sistema de puesta a tierra de la Planta CERART será la implementación de electrodos químicos.

Se han analizado los electrodos químicos que ofrecen fabricantes como Erico, Parres y System Ohm Less, y se ha concluido que éste último ofrece electrodos químicos con mayor eficiencia en relación a su operación y costos. El sistema Ohm-Less está integrado por un electrodo formador por cable de cobre 2/0 AWG cubierto por un compuesto formado a base de grafito de alta pureza, que convierte un electrodo en un cilindro conductor que favorece la reducción de resistencia por incremento del área de contacto, y que además previene de la corrosión al conductor.

Las características del electrodo químico del sistema Ohm-Less son las siguientes:

- Longitud: 1m
- Diámetro: 0.1 m
- Peso aproximado: 20 Kg
- Porcentaje de reducción de resistividad con una dosis de THOR GEL en 1 m³ de tierra: 80%
- Composición: Grafito compactado

La reducción de resistencia se complementa con el uso del mejorador de resistividad THOR-GEL, cuya partícula absorbe humedad y la conserva aún en condiciones de sequía del suelo, favoreciendo la conductividad entre el electrodo y el terreno circundante.

El fabricante ha proporcionado un software en el que se puede calcular la resistencia del sistema de puesta a tierra con un electrodo químico del Sistem Ohm-Less, el cálculo que realiza es el siguiente:

$$R = \left| \frac{\rho}{2,73L} \text{Log}_{10} \frac{4L}{d} \right| \%TG$$

Debido a las construcciones existentes en los alrededores de la Planta CERART no permitieron realizar mediciones de la resistividad del suelo en estos terrenos, se tomará como valor de resistividad la medida en el edificio de Laboratorios, que es el terreno más cercano a la Planta CERART. Por lo tanto el valor referencial de resistividad de la Planta CERART será de 245,67 $\Omega.m$

Reemplazando los datos del electrodo químico seleccionado, se tiene la resistencia del sistema de puesta a tierra, utilizando un electrodo químico es:

$$R_1 = 14,08 \Omega$$

La norma recomienda que la resistencia de puesta a tierra sea menor a las 5 Ω , por lo que será necesario aumentar el número de electrodos para lograr este valor. El software de simulación del sistema Ohm Less establece que la resistencia de la puesta a tierra es inversamente proporcional al número de electrodos químicos usados. Por lo tanto si se implementa un sistema de puesta a tierra de tres electrodos químicos el valor de la resistencia será:

$$R_3 = \frac{1}{3} R_1 = 4,68 \Omega$$

La disposición de los electrodos será en triángulo como lo muestra la figura 5.30. La norma IEEE Std 80 sugiere que el valor de la distancia de separación entre electrodos debe ser al menos el doble de la longitud del electrodo, para evitar interferencias de campos magnéticos. Por lo tanto la separación entre electrodos será de 3m.

El procedimiento de instalación del electrodo químico se lo detalla en la sección 1.9.5.3.

5.9.2. Análisis Económico: Presupuesto.

La información de precios fue obtenida por el proveedor local INDELEC, el análisis económico ha sido elaborado con precios vigentes a noviembre de 2013.

El valor del costo total de la malla, tomando en cuenta la mano de obra necesaria para implementación de la misma, se muestra en la Tabla 5.17. Se realizan las siguientes consideraciones:

- Para la unión de las mallas y el electrodo químico se usará suelda exotérmica. En este caso se usarán 5 uniones.

- Se estima que para la conexión de los electrodos químicos se usará cable # 2/0 AWG. También se considera que se usará 10 cable # 2/0 AWG para la unión de los electrodos químicos con el tablero principal.

Tabla 5.17.

Costos de implementación del plan de mejoras del SPT de la Planta CERART.

			Proveedor (Loja)	
			INDELEC	
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T
1	19	Conductor desnudo Nro. 2/0 AWG Cu	\$ 9,00	\$ 171,00
2	3	Electrodo químico Ohm-Less System, 1m, 80%.	\$ 350,00	\$ 1050,00
3	5	Cápsulas de solda exotérmica	\$ 8,00	\$ 40,00
5	1	Operador de control	\$ 100,00	\$ 100,00
6	1	Mano de obra civil, excavaciones	\$ 408,00	\$408,00
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 1.769,00	

Fuente: Elaborado por los autores.

Se sugiere adquirir los materiales de la empresa INDELEC, debido al ahorro económico y al ser un proveedor local se puede dar la operable asesoría que se tendrá de parte de los técnicos de la empresa.

5.10. Mantenimiento del sistema de puesta a tierra

La norma IEEE Std 2007 sugiere que se debe realizar mantenimiento periódico en el sistema de puesta a tierra, de manera que se puede determinar si la resistencia permanece constante o aumenta. Si las pruebas posteriores demuestran que la resistencia está aumentando a un valor no deseado, se deben tomar medidas para reducir la resistencia, ya sea por rehacer las conexiones corroídas, mediante la adición de electrodos, aumentando el contenido de humedad, o por tratamiento químico.

Deberá existir una memoria técnica y planos actualizados y definitivos donde se describa las características de la instalación eléctrica empleada en obra, los dispositivos de protección y maniobra existentes, sistemas de tableros principales y secundarios, instalación activa y del sistema de puesta a tierra, así como todos los elementos afines a las instalaciones relacionados con la seguridad de las personas. El

mantenimiento de los sistemas de tierra normalmente forma parte del mantenimiento de todo el sistema eléctrico en su conjunto.

La frecuencia del mantenimiento y la práctica recomendada en cualquiera instalación depende del tipo y tamaño de la instalación, su función y su nivel de voltaje. Por ejemplo, se recomienda que las instalaciones domésticas se prueben cada cinco años y las instalaciones industriales cada tres. Las instalaciones o edificios con acceso de público requieren inspección más frecuente y dentro de los que requieren una inspección anual están las unidades educativas, hospitales, teatros, cines.

Todos los tipos de instalaciones deben ser objeto de dos tipos de mantenimiento [27]:

- Inspección a intervalos frecuentes de aquellas componentes que son accesibles o que pueden fácilmente hacerse accesibles.
- Examen, incluyendo una inspección más rigurosa que aquella posible por el primer tipo, incluyendo posiblemente prueba.

5.10.1. Inspección de la puesta a tierra

La inspección del sistema de tierra en una instalación normalmente ocurre asociada con la visita para otra labor de mantenimiento. Consiste de una inspección visual sólo de aquellas partes del sistema que pueden verse directamente, particularmente observando evidencia de desgaste, corrosión, vandalismo o robo.

Parte de la inspección debe ser comprobar que el valor de la resistencia de tierra sigue siendo inferior a 5 Ohm. En caso de que los valores obtenidos de resistencia a tierra fueran superiores al indicado, se suplementarán electrodos en contacto con el terreno hasta restablecer los valores de resistencia a tierra establecidos por la normativa.

Se sugiere realizar la inspección cada año en la época en que el terreno esté más seco y después de cada descarga eléctrica, se debe comprobar la continuidad eléctrica y en de ser el case realizar la reparación de los defectos encontrados.

5.10.2. Examen de la puesta a tierra

El examen de un sistema de tierra normalmente es parte del examen del sistema eléctrico en su conjunto. El examen consiste de una muy rigurosa y detallada

inspección del sistema de tierra global. Aparte de observar lo obvio y normal, el examinador revisará si el sistema satisface las normas de puesta a tierra vigentes.

La norma británica BS 7671 recomienda que este examen se realice con frecuencia no inferior a una vez cada 5 años. Como parte del examen se requieren los siguientes tipos de pruebas:

- Una prueba de funcionamiento de todos los interruptores de corriente residual.
- Comprobación de la línea principal y derivadas de tierra, mediante inspección visual de todas las conexiones y su estado frente a la corrosión, así como la continuidad de las líneas. Reparación de los defectos encontrados.
- De igual forma comprobar que el valor de la resistencia de tierra sigue siendo inferior a 5 Ohm. En caso de que los valores obtenidos de resistencia a tierra fueran superiores al indicado, se suplementarán electrodos en contacto con el terreno hasta restablecer los valores de resistencia a tierra establecidos por la normativa.
- Una prueba de conexión de todas las partes metálicas ajenas al sistema eléctrico, es decir, tableros metálicos, gabinetes de control, distribuidores automáticos, etc.
- Recorrido de los electrodos o conductores enterrados y examen de éstos en algunos sitios para asegurar que no ha sufrido corrosión.

CONCLUSIONES

- Un sistema de puesta a tierra se diseña principalmente para cumplir funciones de seguridad: ante las personas, limitando la tensión de contacto, y, antes los equipos e instalaciones dando un camino de baja impedancia en caso de una falla eléctrica. Un sistema de puesta a tierra cumple otras funciones como mejorar la calidad de la señal eléctrica minimizando el ruido electromagnético y estableciendo un potencial de referencia, equipotencializando el sistema eléctrico.
- La norma IEC 61000-5-2, sugiere que la mejor solución de sistema de puesta a tierra, para un edificio o planta, es una red mallada enterrada.
- Se ha propuesto una metodología de diseño de sistemas de puesta a tierra en baja tensión tomando como base tres criterios: seguridad, diseño y evaluación. De la norma IEEE Std. 80-2000 se toman los criterios de seguridad, diseño de la estructura del suelo y evaluación. De la norma IEEE Std. 141 se toma el criterio de diseño del dimensionamiento del conductor de la malla. Y, de la norma IEEE Std. 142 se toma el criterio de evaluación del sistema de puesta a tierra.
- Para la medición de la resistividad del terreno se aplicó el método de las cuatro puntas de Wenner, utilizando el equipo Fluke 1625.
- Para la medición de la resistencia de puesta a tierra se empleó el método de comprobación “sin estacas”, utilizando el equipo Fluke 1625. Este método elimina problemas como el de desconectar la ruta de tierra que se va a comprobar y la falta de espacio que requieren los métodos de medición, como el de 3 o 4 polos.
- La resistencia del sistema de puesta a tierra del transformador que abastece al edificio de Unidades Productivas no cumple con el valor sugerido por la normativa. La resistividad del terreno es de 30,14 Ωm , por lo que no es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.

- La resistencia del sistema de puesta a tierra del transformador que abastece al edificio de Aulas no cumple con el valor sugerido por la normativa. La resistividad del terreno es de 186,01 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.
- La resistencia del sistema de puesta a tierra del transformador que abastece al edificio de Administración central no cumple con el valor sugerido por la normativa. La resistividad del terreno es de 158,75 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece al edificio del Octógono da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. La resistividad del terreno es de 366,8 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece al centro de convenciones da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. La resistividad del terreno es de 43,58 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece a la Cafetería da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. La resistividad del terreno es de 86,03 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este lugar.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece al edificio del Laboratorios da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. La resistividad del terreno es de 245,67 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.

- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece la Planta ECOLAC da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. La resistividad del terreno es de 121,7 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este sector.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece la Planta CERART da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. No se pudo realizar la medición de la resistividad del terreno ya que no se cuenta con el espacio disponible por la infraestructura montada en el lugar.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar investigaciones sobre la importancia de los sistemas de puesta a tierra en la calidad de energía, y sus implicaciones tanto técnicas como económicas.
- Se recomienda realizar una memoria técnica y planos actualizados y definitivos donde se describa las características de la instalaciones eléctricas, los dispositivos de protección y maniobra existentes, sistemas de tableros principales y secundarios, instalación activa y del sistema de puesta a tierra.
- Se recomienda realizar inspecciones anuales a los sistemas de puesta a tierra y después de cada descarga eléctrica, comprobando su continuidad eléctrica y reparando los defectos encontrados.
- Se recomienda comprobar cada dos años que el valor de la resistencia de tierra siga siendo inferior a los 5 ohm. En caso de que los valores obtenidos de resistencia a tierra fueran superiores al indicado, se deben aplicar acciones correctivas en el sistema.
- Se recomienda realizar un examen del sistema de puesta a tierra cada cinco años comprobando el funcionamiento de los interruptores de corriente residual, la línea principal y derivadas de tierra y reparando los defectos encontrados y comprobando que el valor de resistencia de tierra siga siendo inferior a los 5 ohm.
- Se recomienda seguir las sugerencias del plan de mejoras y acciones correctivas del edificio de Unidades Productivas, conectado un electrodo activo al sistema de puesta a tierra actual, para obtener una resistencia igual o menor a la sugerida por la norma.
- Se recomienda seguir las sugerencias del plan de mejoras y acciones correctivas de los edificios de Aulas, Administración central, Octógono, Laboratorios, Centro de convenciones y la Planta ECOLAC; implementando mallas de puesta a tierra sugeridas en base a la metodología planteada y

realizando el tratamiento de suelo con cemento químico GEM, para obtener una resistencia igual o menor a la sugerida por la norma.

- Se recomienda seguir las sugerencias del plan de mejoras y acciones correctivas de la Planta CERART, implementando un sistema de puesta a tierra basado en electrodos activos, para obtener una resistencia igual o menor a la sugerida por la norma.

BIBLIOGRAFÍA

- [1.] Scribd. “Mallas de puesta a tierra” [Online]. Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/22694809/SemProf-TierraBT>> [Consulta abril de 2013].
- [2.] NFPA/ANSI. Código Eléctrico Nacional edición 1999.
- [3.] NCH Elec. 4/2003, “Norma Chilena de Electricidad”, 2003.
- [4.] Venhuizen, R. “Puesta a tierra y EMC”. [Online]. Disponible en: <<http://www.axoled.com/wp-content/uploads/2013/05/6-1-Puesta-a-Tierra.pdf>> [Consulta junio de 2013].
- [5.] Procobre, “Sistemas de puesta a tierra”, [Online]. Disponible en: <http://www.4shared.com/office/_HUI4XmD/Sistemas_de_Puesta_a_Tierra_-__.html> [Consulta abril de 2013].
- [6.] Aguilheiro, I. “Técnicas modernas para la medición de SPT en zonas urbanas”, [Online]. Disponible en: <<http://www.lu3hba.com.ar/ARTICULOS%2010/Medicion%20de%20Sistema%20de%20Puesta%20a%20Tierra.pdf>> [Consulta abril de 2013].
- [7.] Sin autor. “Puesta a tierra de las instalaciones”. [Online]. Disponible en: <<http://www.marcombo.com/Descargas/8496334147-INSTALACIONES%20EL%C3%89CTRICAS%20DE%20INTERIOR/UNIDAD%2010.pdf>> [Consulta mayo de 2013].
- [8.] Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, España, Real Decreto 842/2002, 2002.
- [9.] Cámara de la Construcción de Quito. Código eléctrico de Sistemas de puesta a tierra. 2001.
- [10.] Comisión Electrotécnica Internacional, Reporte técnico de Compatibilidad electromagnética (EMC), IEC 61000-5-2. Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/168531951/IEC-61000-5-02-Ed1-0-pdf>> [Consulta juniode 2013].
- [11.] Vásquez, C. “Sistema puesta a tierra”, [Online]. Disponible en: <<http://xa.yimg.com/kq/groups/27513372/1142298908/name/TRABAJO+SEMINARIO.doc>> [Consulta abril de 2013].
- [12.] Rojas, G. “Manual de sistemas de puesta a tierra”. [Online]. Disponible en: <<http://hugarcapella.files.wordpress.com/2010/03/manual-de-puesta-a-tierra.pdf>> [Consulta mayo de 2013].
- [13.] Ospina, G. Valencia J. Cárdenas, C. Villa, W. “Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos”. Editorial Universidad de Antioquia, Primera edición, 2007.

- [14.] Casas, F. "Tierras soporte de la seguridad eléctrica". Editorial: Seguridad eléctrica Ltda., Colombia, 2008.
- [15.] Miño, W. Freire, L. "Análisis y Simulación del sistema de puesta a tierra en transformadores de distribución en el alimentador 01cv13b1s-Oriental de la subestación 01cv El Calvario de ELEPCO S.A". [Online]. Disponible en: <<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5021/1/T-ESPEL-0868.pdf>> [Consulta mayo de 2013].
- [16.] Villamizar, J. "Manual de procedimientos en seguridad eléctrica para el laboratorio de instrumentación biomédica". [Online]. Disponible en:<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1871/2/610284V715dm_anexo.pdf> [Consulta junio de 2013].
- [17.] Wilbert, R. "Diseño y Ejecución de una Puesta a Tierra de Baja Resistencia". [Online]. Disponible en: <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/qqueshuayllo_cw/cap2.pdf> [Consulta junio de 2013].
- [18.] Erico, GEM Calculator. [Online]. Disponible en: <<http://www.erico.com/static.asp?id=27>> [Consulta octubre de 2013].
- [19.] Alverca, E. "Mejoramiento, readecuación e implementación del Sistema eléctrico y puesta a tierra en la Escuela Fiscal Mixta "Humberto Vaca Gómez". [Online]. Disponible en: <<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6429/1/CD-4950.pdf>> [Consulta agosto de 2013].
- [20.] Apliweld®, "Soldadura exotérmica". [Online]. Disponible en: <<http://www.iesacr.com/archivos/SoldaduraExotermica.pdf>> [Consulta junio 2013].
- [21.] Consejo Nacional de Electricidad. "Modelo de contrato para la prestación del suministro de servicio público de energía eléctrica a los consumidores (Regulación No. CONELEC 008/12)". [Online]. Disponible en: <http://www.conelec.gob.ec/normativa_detalle.php?cd_norm=578> [Consulta octubre de 2013].
- [22.] ANSI/IEEE Std. 80-1986, "IEEE Guide for safety in AC substation grounding", IEEE Standards board New York, 1986.
- [23.] IEEE Std 142-2007, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems". 2007.
- [24.] IEEE Std 141-1993, "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants". 1993.
- [25.] León, V. "Diseño de puesta a tierra en centrales y subestaciones aplicado a la central hidroeléctrica Pisayambo". [Online]. Disponible en: <http://www.cib.espol.edu.ec/digipath/d_tesis_pdf/d-6611.pdf> [Consulta octubre de 2013].

- [26.] Fluke Corporation, "Manual de uso Earth/Ground Tester Fluke 1625". [Online]. Disponible en: <http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-1625_user_manual.pdf> [Consulta julio de 2013].

ANEXO 1

PAPER: Metodología para el diseño de sistemas de puesta a tierra en baja tensión.

Metodología para el diseño de sistemas de puesta a tierra para baja tensión

Ronny Cabrera¹, Emilio Salinas¹, Marcelo Dávila², Jorge Luis Jaramillo²

¹Profesionales en formación, Titulación IET, UTPL

²Docente, Titulación IET, UTPL

Loja – Ecuador

^[1]ricabrera@utpl.edu.ec, ^[1]ejsalinas@utpl.edu.ec, ^[2]mfdavila@utpl.edu.ec, ^[2]jorgeluis@utpl.edu.ec

Resumen— Se describe el proceso metodológico para el diseño de sistemas de puesta a tierra en baja tensión, para ello se define un marco referencial basado en las recomendaciones IEEE Std. 80, IEEE Std. 141 e IEEE Std. 142. Se plantea un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta en el campus UTPL, para ello se realiza un diagnóstico del estado actual de los sistemas de puesta a tierra en cada edificio de la UTPL, y, se propone un plan de acciones correctivas para los edificios que presenten anomalías.

Palabras claves—diseño de sistemas de puesta a tierra, medición de resistencia de sistemas de puesta a tierra, metodología de diseño de mallas de puesta a tierra.

I. INTRODUCCIÓN

Se define a un sistema de puesta a tierra (SPT) como una conexión intencional a tierra, mediante una conexión de impedancia suficientemente baja y con capacidad de conducción de corriente suficiente para evitar la aparición de tensiones que puedan provocar riesgos a personas o a los equipos conectados.

El tener un valor alto de resistencia de puesta a tierra trae efectos significativos al sistema de energía eléctrica como son: daño en transformadores, electrocución de personas y animales por elevados gradientes de potencial y la pérdida de cantidades significativas de dinero en potencia y energía para las empresas distribuidoras. Por lo tanto, cualquier instalación de puesta a tierra deberá ser obligatoriamente comprobada y monitoreada, y en caso de no cumplir con las condiciones mínimas de seguridad, el sistema debe ser corregido.

En este marco, considerando que un óptimo sistema de puesta a tierra es imprescindible para el correcto funcionamiento de un sistema de energía eléctrica, y, que todos los sistemas de puesta a tierra del campus UTPL no han tenido un monitoreo periódico, el trabajo pretende proponer una metodología de diseño de sistemas de puesta a tierra y diagnosticar el estado actual de los sistemas de puesta a tierra para futuras correcciones en el suministro de energía eléctrica de cada uno de los edificios del campus UTPL, con el fin de salvaguardar la integridad del personal del campus UTPL y de los equipos conectados al sistema eléctrico.

II. REVISIÓN DE LA NORMATIVA VIGENTE

Para la ejecución del proyecto, se propuso cumplir con 4 pasos fundamentales: definir un modelo referencial basado en la normativa existente, establecer una metodología para el diseño de mallas de puesta a tierra para baja tensión, diagnosticar el estado actual de los sistemas de puesta a tierra del campus UTPL, y, elaborar una propuesta de plan de mejoras y acciones correctivas.

Para cumplir con el primer paso, se analizó la normativa existente respecto a los sistemas de puesta a tierra.

A. Legislación internacional

La Comisión Electrotécnica Internacional, en el Reporte técnico de Compatibilidad electromagnética (EMC), IEC 61000-5-2 [1], trata específicamente sobre la Puesta a tierra y cableado en instalaciones industriales, comerciales y residenciales

En el grupo de normativas IEEE, el estándar IEEE 80 [2] está enfocado al diseño de mallas de puesta tierra, para subestaciones o para lugares donde se requiera complejos sistemas de puesta a tierra. La norma IEEE Std 142 - 2007 [3] es una recomendación práctica para el aterramiento de sistemas de potencia industrial y comercial. Finalmente se analizó la norma IEEE Std 141. – 1993 [4] que es la Recomendación práctica para la distribución de energía eléctrica para plantas Industriales.

B. A manera de conclusión: modelo referencial para el diseño de sistemas de puesta a tierra en baja tensión

La norma IEC 61000-5-2, sugiere que la mejor solución de sistema de puesta a tierra es una red mallada enterrada debajo o alrededor del edificio o de la planta.

La norma IEEE Std. 80 -2000 es una guía para el diseño de mallas de puesta a tierra en alta tensión. De ésta guía se han tomado los criterios de seguridad, diseño y evaluación que garanticen un óptimo sistema de puesta a tierra. Los criterios de seguridad usados tienen que ver principalmente con el cálculo del máximo voltaje de toque y de paso tolerable al ser humano. De los criterios de diseño de una

mallas de puesta a tierra se toma la selección del modelo de suelo y los criterios del diseño geométrico de la malla; pero no se toma el criterio de dimensionamiento del conductor, ya que para el cálculo de la corriente de falla de un sistema eléctrico, el criterio de la norma usa parámetros de impedancia de líneas y de torres de transmisión, disponibles solamente en alta tensión. También se hace uso de los criterios de procedimientos y técnicas de evaluación del sistema de puesta a tierra, como son el cálculo de la resistencia de la malla y la comparación de los voltajes de toque y de paso de la malla con los tolerables al cuerpo humano.

El criterio de dimensionamiento del conductor de la malla se tomará de la norma IEEE Std. 141, que describe el cálculo de la corriente de falla de un sistema eléctrico en baja tensión.

Para el diagnóstico de los sistemas de puesta a tierra se tomará el criterio de la norma IEEE Std. 142, que sugiere que: resistencias de puesta a tierra en el rango de 1-5 ohmios se encuentran generalmente convenientes para edificios de planta industrial e instalaciones comerciales. La norma también recomienda que se deba monitorear periódicamente la puesta a tierra, realizando pruebas o mediciones para determinar si la resistencia se permanece constante o aumenta.

III. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA BAJA TENSIÓN.

Entre uno de los objetivos de este proyecto, se planteó la elaboración de una metodología de diseño de óptimos sistemas de puesta a tierra, que será la base para el análisis técnico (diseño) del plan de mejoras y acciones correctivas de los edificios del campus UTPL, que lo requieran.

El procedimiento de diseño descrito a continuación, tiene por objeto lograr la seguridad de las tensiones de paso y de toque dentro de un edificio. Debido a que la tensión de la malla es generalmente la peor tensión de toque posible dentro del edificio, esta tensión será utilizada como la base de la metodología.

El diagrama de bloques de la Figura 1 ilustra la secuencia de pasos para el diseño propuesto de una malla de puesta a tierra en baja tensión.

A. Determinar el área y la resistividad del suelo sobre el que se diseñará la malla de puesta a tierra.

Para determinar el área del suelo sobre el que se diseñará la malla de puesta a tierra se pueden realizar mediciones, o en su defecto se puede estimar mediante un plano de la localización general de la zona.

Una representación precisa de las condiciones reales de la resistividad del suelo se puede obtener mediante el uso de un modelo de dos capas, que consiste en una capa superior de profundidad finita y con diferente resistividad de una capa inferior de espesor infinito.

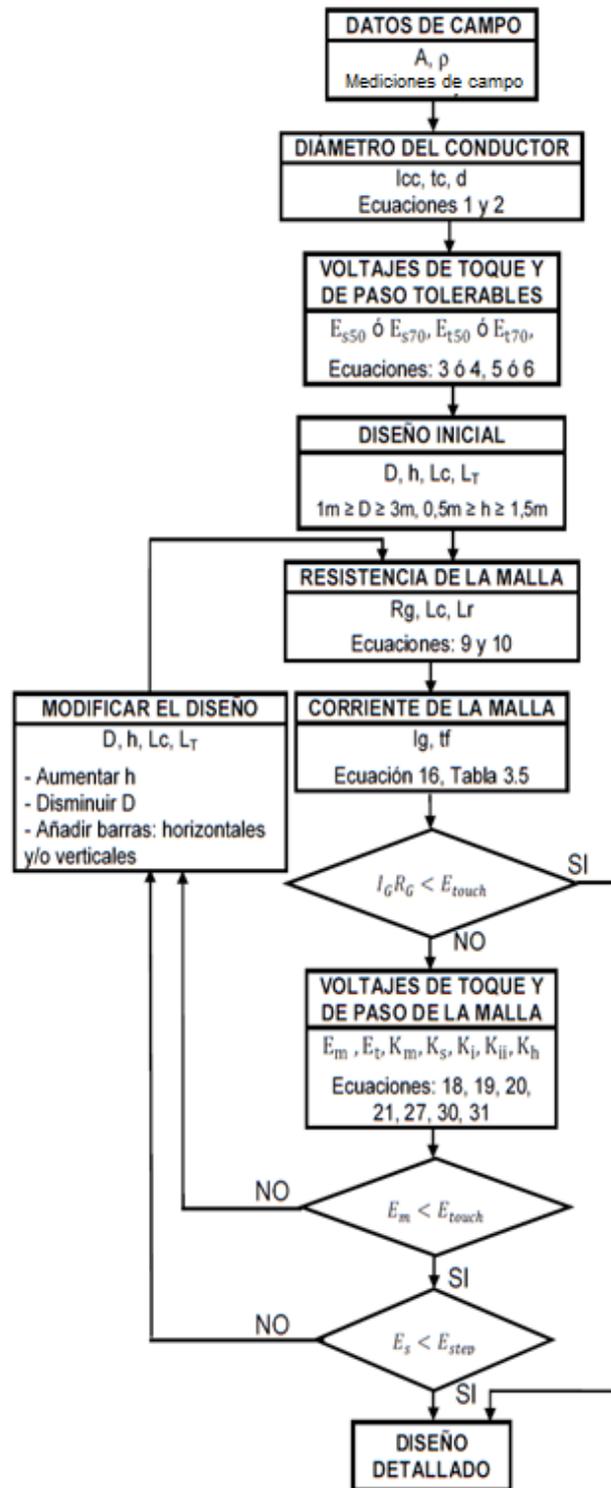


Fig. 1. Diagrama de bloques de la secuencia de pasos para el diseño de la malla de puesta a tierra.

Se considera que el terreno en donde se instalará la malla tendrá 2 capas: la primera se trata de una superficie cubierta por piedra picada con una resistividad elevada (3000 Ωm), y la segunda capa, o capa inferior, denotado por la variable ρ_1 , es el valor medido por el método de Wenner.

B. Determinar la sección del conductor.

El tamaño del conductor se determina por la siguiente ecuación:

$$A_{kcmil} = I_{cc-asim} K_f \sqrt{t_c} \quad (1)$$

En donde:

A_{kcmil} : es el área del conductor en kcmil. Recordar que 1 kcmil es 0.5067 mm^2 .

$I_{cc-asim}$: es la corriente de cortocircuito asimétrica en KA.

t_c : es el tiempo de duración de falla de corriente. La norma IEEE std-80 recomienda que sea igual al tiempo de duración del choque t_s .

K_f : es la constante para el material del conductor a diversos valores de temperatura de fusión y el uso de la temperatura ambiente de 40°C . Se escoge el material será cobre comercial estirado en frío, que corresponde a 7,06.

Para la realización del cálculo de la corriente de cortocircuito asimétrica se sigue el procedimiento de norma IEEE Std-142, que indica que es igual a la corriente de cortocircuito máxima en el secundario multiplicada por un factor de asimetría.

$$I_{cc-max-sec} = \frac{P \times 1000}{\sqrt{3} \frac{Z}{100} V_{sec}} \quad (2)$$

$$I_{cc-asim} = I_{cc-max-sec} \times F_{asim} \quad (3)$$

Siendo:

P: Potencia del transformador, en kVA. Dato del transformador.

Vsec: Tensión secundaria en voltios. Dato del transformador.

Z: Tensión porcentual de cortocircuito del transformador. El NEC recomienda que éste valor sea de 3.5 para transformadores trifásicos de 15 kVA a 150 kVA y 4 para transformadores de 150 kVA a 600 kVA.

Icc-max-sec: Intensidad de cortocircuito secundaria, en amperios.

Icc-asim: Intensidad de cortocircuito asimétrica, en amperios.

Fasim: Factor de asimetría. Normas como el IEEE Std 80 y el IEEE Std 142 sugieren que este valor sea 1,25.

La sección de conductor mínima que las normas nacionales e internacionales recomiendan para los conductores de puesta a tierra es 2/0 AWG.

C. Determinar los voltajes de toque y de paso tolerables.

El valor máximo tolerable de la tensión de paso, está dado por las expresiones 4 (para personas de 50 Kg.) y 5 (para personas de 70 Kg.):

$$E_{s50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

$$E_{s70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (5)$$

El valor máximo tolerable de la tensión de toque, está dado por las expresiones 6 (para personas de 50 Kg.) y 7 (para personas de 70 Kg.):

$$E_{s50} = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

$$E_{s70} = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

Dónde:

C_s : 1 si no se utiliza una capa superficial de protección (como gravilla, concreto, u otro material artificial), en otro caso, este factor se determina a continuación.

ρ_s : Resistividad de la capa superficial, en Ωm .

t_s : Tiempo de duración de la falla, en segundos. Según la norma IEEE std-80 el rango de tiempo que resulta de una corriente admisible para el cuerpo es: $0,06s \geq t_s \geq 0,7s$.

La expresión que determina el factor C_s , está dada por:

$$C_s = 1 - 0,09 \frac{(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} \quad (8)$$

Dónde:

ρ_s : Resistividad de la capa superficial, en Ωm .

ρ_1 : Resistividad del primer estrato, en Ωm .

h_s : Espesor de la capa superficial, en m.

D. Diseño preliminar de la malla.

Las estimaciones iniciales de la separación del conductor y ubicaciones varilla de tierra deben basarse en la máxima corriente de la malla IG actual y el área que está siendo conectado a tierra.

Se debe suponer un diseño preliminar determinando los siguientes valores:

- e) Área de la malla: para optimizar se aprovecha el área total de la superficie.
- f) El espaciamiento D de los conductores paralelos en la malla es igual, de modo que se forme una cuadrícula o una rejilla. IEEE Std-80 recomienda que el espaciamiento sea en el rango de 3m a 15m.
- g) Profundidad de entierro de la malla: IEEE Std-80 recomienda que las profundidades típicas de la malla sean desde 0,5m a 1,5m.
- h) Sumar la longitud total del conductor enterrado (L_c y L_T)

- L_c : Longitud total de conductor de la malla horizontal, en metros.
 L_T : Longitud total del conductor de puesta a tierra del sistema, incluyendo la malla horizontal y las varillas de tierra, en metros

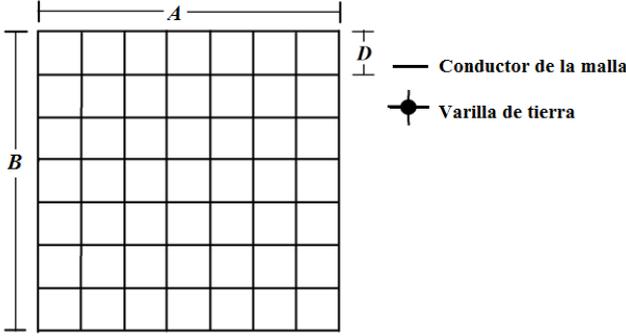


Fig.2. Diseño preliminar de malla de puesta a tierra.

E. Determinar la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra.

Para el cálculo de la resistencia de la malla, se pueden utilizar dos expresiones, dependiendo si se usa en terreno homogéneo o en un terreno de dos estratos.

Para el caso de terreno homogéneo, se utiliza la expresión de Sverak:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20S}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/S}} \right) \right] \quad (9)$$

Dónde:

- ρ : Resistividad del terreno, en Ω -m.
 L_T : Longitud total del conductor que forma la malla, en m.
 S : Área de la malla.
 h : profundidad de enterramiento de la malla, en m.

En el caso de un terreno bi-estratificado, se utiliza la expresión de Schwartz:

$$R = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (10)$$

Dónde:

- R_1 : Resistencia de los conductores que forman la malla, en ohm.
 R_2 : Resistencia de las barras conectadas a la malla, en ohm.
 R_m : Resistencia mutua entre los conductores de la malla R_1 y las barras R_2 en ohm.

La resistencia de los conductores que forman la malla, está dada por la siguiente expresión:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{S}} - K_2 \right] \quad (11)$$

Dónde:

- ρ : Resistividad del terreno, en Ω -m.
 L_c : Longitud total de conductor de la malla horizontal, en metros.
 a' : es $\sqrt{a \cdot 2h}$ para conductores enterrados a una profundidad h en metros, ó " a " para conductores en la superficie de la tierra en metros
 $2a$: Diámetro del conductor, en m.
 S : Área cubierta por la malla, en m^2 .
 K_1, K_2 : Coeficientes relacionados con la geometría de la malla.

$$K_1 = 1,43 - \frac{2,3h}{\sqrt{S}} - 0,44 \frac{A}{B} \quad (12)$$

$$K_2 = 5,5 - \frac{8h}{\sqrt{S}} + \left(0,15 - \frac{h}{\sqrt{S}} \right) \frac{A}{B} \quad (13)$$

- A : Lado mayor de la malla, en metros.
 B : Lado menor de la malla, en metros.

La resistencia de las barras conectadas a la malla, está dada por la siguiente expresión:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{S}} (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (14)$$

Dónde:

- L_r : Longitud promedio de las barras, en m.
 $2b$: Diámetro de las barras, en m.
 n_r : Número de barras ubicadas en el área cubierta por la malla.

La resistencia mutua entre los conductores de la malla y las barras, está dada por la siguiente expresión:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{4L_c}{L_f} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{S}} - K_2 + 1 \right] \quad (15)$$

F. Determinar la corriente de la malla.

La máxima corriente de la malla está determinada por:

$$I_G = 3 \cdot I_{cc-max-prim} \cdot D_f \cdot S_f \quad (16)$$

Dónde:

- $I_{cc-max-prim}$: es la corriente máxima de cortocircuito en el primario.
 D_f : es el factor de decremento para toda la duración de la falla, dado en s
 S_f : es el factor de división de la corriente de falla

$$I_{cc-max-prim} = I_{cc-max-sec} \cdot \frac{\sqrt{3}V_{sec}}{V_{prim}} \quad (17)$$

Dónde:

V_{prim} : Tensión primaria del transformador en voltios.
Dato del transformador.

V_{sec} : Tensión secundaria del transformador en voltios.
Dato del transformador.

Se considera un tiempo de falla de 0.5 s, con lo que se obtiene un factor de decremento de 1,043.

El factor de división de corriente es necesario para evitar el sobredimensionamiento del sistema de puesta a tierra, para usar sólo una fracción de la corriente de fallo total. Los valores típicos de S_f van en el rango de 0.2 a 0.6. Asumiendo el peor escenario se tomará un factor de división de corriente de 0.6.

G. Determinar la máxima potencia de tierra (GPR)

Si el GPR del diseño preliminar está por debajo del voltaje de toque tolerable, no se necesitará un análisis adicional. Solamente será necesario dejar conductores adicionales para dar acceso a las terminales de aterrizaje de los equipos.

El GPR, es el producto de la corriente y resistencia de la malla, y se lo debe comparar con la tensión de contacto tolerable:

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (18)$$

$$I_G R_G < E_{touch}$$

Si el GPR es menor que la tensión de toque tolerable, la malla propuesta cumple con las condiciones mínimas de diseño. De no ser así, se debe continuar con la comparación de los voltajes de toque y de paso de la malla con los voltajes de toque y de paso tolerables para el cuerpo humano.

H. Determinar el voltaje de toque y de paso de la malla.

Tensión de toque de la malla

El voltaje de toque de la malla se obtiene del producto del factor geométrico K_m , el factor de corrección K_i , la resistividad del suelo y la corriente por unidad de longitud de conductor IG/LM.

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (19)$$

Dónde:

- ρ : Resistividad del suelo
- K_m : Factor geométrico
- K_i : Factor de corrección
- I_G : Corriente de la malla
- L_M : Longitud del conductor de la malla

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 h d} + \frac{(D + 2 h)^2}{8 h d} - \frac{h}{4 d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n - 1)} \right) \right] \quad (20)$$

Dónde:

- D : Distancia entre conductores paralelos, en m.
- h : Profundidad de enterramiento de la malla, en m.
- d : Diámetro del conductor de la malla, en m.
- n : factor de conductores paralelos

Para mallas con barras a lo largo del perímetro o para mallas con barras en las esquinas o barras en el perímetro y en las esquinas, se tiene que:

$$K_{ii} = 1$$

Para mallas sin barras o mallas con pocas barras, pero no ubicadas en el perímetro ni en las esquinas, se tiene que:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (21)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}; h_0 = 1 \text{ m} \quad (22)$$

Para que las ecuaciones desarrolladas sean aplicables tanto a mallas rectangulares como a mallas con forma irregular, el número de conductores paralelos en una malla se compone de cuatro factores de forma, los que tienen las siguientes expresiones:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (23)$$

Donde n_a , n_b , n_c y n_d están dadas por las expresiones 25, 26, 27 y 28 respectivamente:

$$n_a = \frac{2 L_C}{L_P} \quad (24)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{S}}} \quad (25)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{S} \right]^{\frac{0,7S}{L_x L_y}} \quad (26)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (27)$$

Dónde:

- L_C : Longitud total de conductor de la malla horizontal, en m.
- L_P : Longitud perimetral de la malla, en m.
- S : Area cubierta por la malla, en m².
- L_x : Longitud máxima de la malla en la dirección x, en m.
- L_y : Longitud máxima de la malla en la dirección y, en m.
- D_m : Distancia máxima entre dos puntos de la malla, en m.

En el caso de mallas rectangulares o cuadradas, se tiene que:

- $n_b = 1$ para mallas cuadradas.
- $n_c = 1$ para mallas cuadradas y rectangulares.
- $n_d = 1$ para mallas cuadradas, rectangulares y de forma "L".

El factor de corrección K_i , se define como:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (28)$$

Para mallas sin barras, o pocas barras distribuidas a través de la malla, pero ninguna ubicada en las esquinas o perímetro, se define la longitud efectiva enterrada L_M , como:

$$L_M = L_C + L_R \quad (29)$$

Donde L_R es la longitud total de las barras conectadas, en metros.

Para mallas con barras en las esquinas y/o en el perímetro, la longitud efectiva enterrada L_M se define como:

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (30)$$

Donde L_r es la longitud de cada barra, en m.

Tensión de paso de la malla

La tensión de paso de la malla se obtiene del producto del factor geométrico K_S , el factor de corrección K_i , la resistividad del suelo y la corriente por unidad de longitud de conductor I_G/L_S :

$$E_S = \frac{\rho \cdot K_S \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad (31)$$

Dónde:

- ρ : Resistividad del suelo
- K_S : Factor geométrico
- K_i : Factor de corrección
- I_G : Corriente de la malla
- L_S : Longitud del conductor de la malla

El factor geométrico K_S , se define como:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (32)$$

Para mallas con barras o sin barras, se define la longitud efectiva enterrada L_S , como:

$$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (33)$$

I. Comparar el voltaje de toque de la malla con el voltaje de toque tolerable.

Si el voltaje de toque de la malla calculado está por debajo del voltaje de toque tolerado, continuar con el

diseño. Si el voltaje de toque de la malla calculado es mayor que el voltaje de toque tolerable, el diseño preliminar deberá ser modificado y realizar los cálculos correspondientes tomando en cuenta los cambios que se han hecho.

J. Comparar el voltaje de paso de la malla con el voltaje de paso tolerable.

Si el voltaje de paso y el voltaje de toque calculados están por debajo de los voltajes tolerables, la malla de puesta a tierra cumple con las condiciones mínimas de diseño. Si no cumple estas condiciones el diseño preliminar se debe revisar.

K. Modificar el diseño.

Si se exceden los límites del voltaje de toque ó del voltaje de paso tolerables, se requerirá de una revisión del diseño de la malla.

Si la malla no cumple con las condiciones mínimas de diseño se debe aumentar la profundidad de enterramiento de la malla, o aumentar la longitud total del conductor ya sea añadiendo conductores a la malla (aumentar las rejillas) o añadir barras verticales.

Se deben añadir barras verticales, de la siguiente manera:

- Añadir barras verticales en las esquinas de la malla (Ver Figura. 3)
- De no dar resultado, añadir barras paulatinamente en las uniones del perímetro de la malla, en forma proporcional a cada lado (Ver Figura. 4).
- De no dar resultado añadir barras en todas las uniones del perímetro de la malla (Ver Figura. 5).

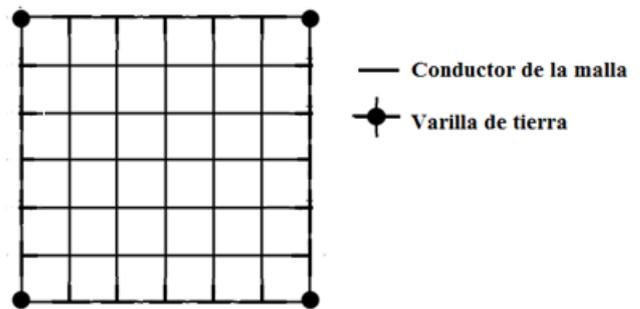


Fig. 3. Malla de sistema de puesta a tierra con barras verticales en las esquina.

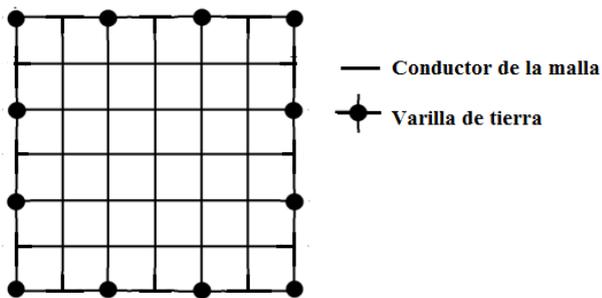


Fig. 4. Malla de sistema de puesta a tierra con barras verticales en algunas uniones del perímetro.

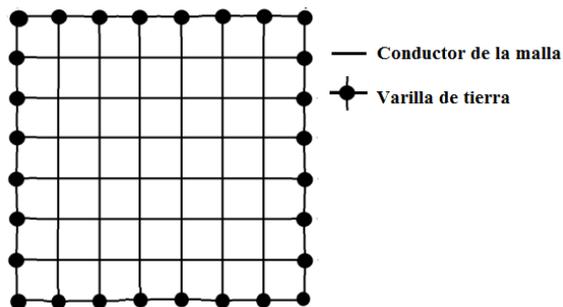


Fig. 5. Malla de sistema de puesta a tierra con barras verticales en el perímetro.

L. Proporcionar el diseño detallado.

Proporcionar los valores y parámetros del diseño de la malla:

- Área de la malla
- Diámetro del conductor
- Espaciamiento entre conductores paralelos
- Profundidad de enterramiento de la malla
- Longitud de la malla horizontal
- Longitud de las barras verticales
- Número de barras verticales
- Diagrama de la malla de puesta a tierra.

IV. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN EL CAMPUS UTPL.

A. Diagnóstico del estado actual de los sistemas de puesta a tierra de los edificios del campus UTPL.

La eficacia de los sistemas de conexión a tierra pueden comprobarse usando instrumentos de prueba de toma de tierra como el Fluke 1625, que verifica la eficacia de este tipo de conexiones [5].

Con los métodos de medición de resistencia de puesta a tierra, como el de 3 o 4 polos, se debe desconectar cada ruta de tierra que fuese a comprobarse de otras conexiones a tierra para eliminar la influencia de las rutas de masa paralelas. Se trata de un proceso, como mínimo, largo y, en

muchos casos, peligroso, no solo para quien realice las mediciones, sino también para los equipos conectados al sistema eléctrico.

Una vez desconectado, se usaba el método de comprobación estándar de 3 polos/terminales de tierra, que requiere una estaca de masa auxiliar. Además de requerir tiempo adicional, en muchos casos es difícil, a veces imposible, encontrar ubicaciones para clavar las estacas de tierra. El método de comprobación de la resistencia de tierra “sin estacas” elimina esos problemas y complementa de forma ideal a los métodos de comprobación del comprobador de tierra sin estacas.

Para la operación conectar el adaptador de acuerdo con el diagrama y las designaciones E, S y H al comprobador y a una pinza amperométrica.

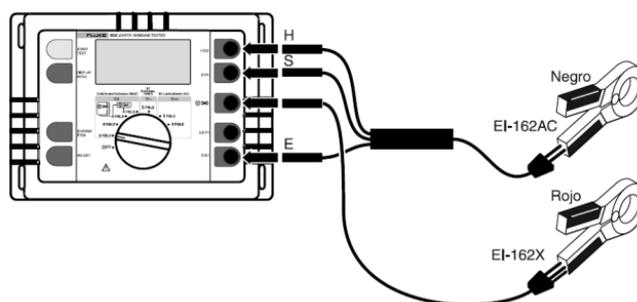


Fig. 6. Medición de resistencia de tierra sin estacas [5].

Para la medición de la resistividad del terreno se aplicará el procedimiento de medición de las cuatro puntas de Wenner, conectando el equipo Fluke 1625 como se muestra en la Figura 6.

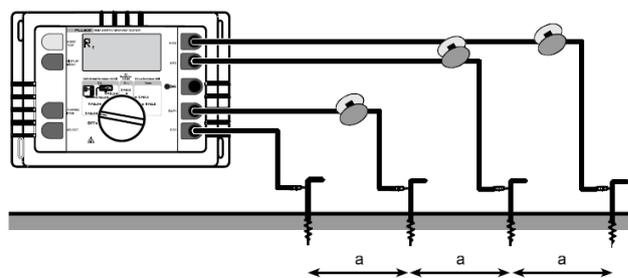


Fig. 7. Medición de la resistividad del terreno [5].

A partir del valor de resistencia R_E , se calcula la resistividad del terreno según la ecuación:

$$\rho_E = 2\pi a R_E$$

ρ_E : Valor medio de resistividad del terreno (Ωm)

R_E : resistencia medida (Ω)

a : distancia de sonda (m)

En la Tabla 1 se resumen los resultados de las mediciones realizadas en los edificios del campus UTPL, para evaluar el estado actual de los sistemas de puesta a tierra.

Tabla 1.

Resumen los resultados de las mediciones realizadas en los edificios del campus UTPL.

Edificios que abastece el transformador	Resistividad de capa superficial	Resistividad de capa inferior	Altura de la capa superficial	Resistencia del SPT	Cumple la normativa
Unidades Productivas	10,67 Ω m	30,14 Ω m	1,25 m	11.58 Ω	No
Aulas	186,01 Ω m	131,56 Ω m	1,13 m	41 Ω	No
Administración Central. Capilla	158,75 Ω m	127,35 Ω m	1,07 m	22,3 Ω	No
Octógono Polideportivo Museo Canchas deportivas	266,8 Ω m	719,7 Ω m	1,25 m	0.14 Ω	No
Centro de convenciones Editorial	43,58 Ω m	19,59 Ω m	1,64 m	0,139 Ω	No
Cafetería	86,03 Ω m	25,24 Ω m	1,14 m	0,517 Ω	No
Laboratorios	245,67 Ω m	89,3 Ω m	3,28 m	0,47 Ω	No
ECOLAC Instituto de Química Aplicada Laboratorio de Industrias	121,70 Ω m	109,90 Ω m	1,10 m	0.21 Ω	No
CERART	No se pudo realizar las mediciones por la falta del espacio e infraestructura construida en el lugar, sin embargo se pueden tomar los valores del edificio de Laboratorios por su cercanía.			0.21 Ω	No
Método de medición de resistividad:			Método de medición de resistencia:		
Método de cuatro puntas de Wenner			Método sin estacas		

B. Plan de mejoras y acciones correctivas sobre posibles implementaciones de sistemas de puesta a tierra en cada edificio del campus UTPL

En la Tabla 2 se presentan las principales anomalías encontradas en cada uno de los edificios del campus UTPL y las posibles soluciones que pueden implementarse.

C. Aplicación de la metodología del diseño de puesta a tierra en el edificio del Octógono.

Análisis Técnico: Diseño.

Debido a que el sistema de puesta a tierra del edificio del Octógono no cumple con la resistencia establecida por las normas nacionales e internacionales, y, al no existir mayor información sobre el actual SPT, se sugiere diseñar una malla de puesta a tierra utilizando la metodología propuesta en el presente trabajo.

En el edificio del Octógono se dispone de un área de 6 x 4 metros para los propósitos de este trabajo. Según las mediciones realizadas, se tiene una resistividad en la primera capa del suelo de 266,1 Ω .m. Tomando como referencia otros cálculos de mallas de puesta a tierra, éste valor de resistividad es elevado, por lo que se debe realizar tratamiento en el suelo para bajar su resistividad. Se recomienda usar un tratamiento químico aplicando el cemento químico GEM. La resistividad del terreno una vez aplicado el cemento químico GEM en terrenos de 50 Ω .m a 300 Ω .m, es de 30 Ω .m.

Con las ecuaciones 1 y 2 se pueden calcular la sección mínima del conductor, partiendo de los siguientes datos:

- $K_f = 7,06$
- $t_c = 0,5$ s
- $P = 250$ kVA
- $V_{prim} = 13200$ V
- $V_{sec} = 220$ V
- $Z = 4$
- $F_{asim} = 1,25$

$$I_{cc-max-sec} = 16402 \text{ A}$$

$$I_{cc-asim} = 20502,40 \text{ A}$$

$$A_{kcmil} = 3,280 * 7,06 * \sqrt{0,5} = 102,3 \text{ kcmil}$$

Según el cálculo se debería utilizar un cable 102 kcmil, pero por recomendación de las normativas nacionales e internacionales se utilizará el calibre 2/0 AWG, con sección de 133 kcmil, que tiene un radio de 4,63mm.

Con las ecuaciones 5 y 6 se procede a calcular los voltajes de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano, pero antes se debe partir de los siguientes datos:

- Peso del cuerpo humano: 50 kg
- $\rho_s = 3000\Omega$ m
- $\rho = 30 \Omega$ m
- $t_s = 0,5$ s
- $h_s = 0,15$ m

Tabla 2.
Acciones correctivas en los SPT de los edificios del campus UTPL.

Edificios que abastece el transformador	Resistencia del SPT	Cumple la normativa ($\leq 5\Omega$)	Anomalías detectadas	Posibles acciones correctivas
Unidades Productivas	11.58 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Mallas desconectadas	- Implementar electrodo químico - Unir mallas con equipotencializador de mallas - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
Aulas	41 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Corrosión de electrodos	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
-Administración Central. -Capilla	22,3 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla)
-Octógono -Polideportivo -Museo Canchas deportivas	0.14 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
-Centro de convenciones -Editorial	0,139 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT - Línea principal de tierra en mal estado - Uniones en mal estado	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
Cafetería	0,517 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT - Línea principal de tierra en mal estado	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
Laboratorios	0,47 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
-ECOLAC -Instituto de Química Aplicada - Laboratorio de Industrias	0.21 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT	- Tratamiento de suelo - Implementar nuevo SPT (malla) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años
CERART	0.21 Ω	No	- Resistencia de puesta a tierra no cumple la normativa - Neutro conectado a SPT	- Implementar nuevo SPT (electrodo químico) - Memoria y planos de la obra - Inspección anual - Medición de la resistencia del SPT, al menos una vez al año - Examen cada 5 años

$$C_s = 0,772$$

$$E_{s50} = 2442,31 \text{ V}$$

$$E_{t50} = 733,61 \text{ V}$$

La malla será rectangular, tendrá un área de 6m x 3m, la separación entre conductores paralelos será de 3m. La malla se complementará con 6 varillas de 1,5 metros cada una, ubicadas en las esquinas. La malla será enterrada a 0,5 metros de profundidad.

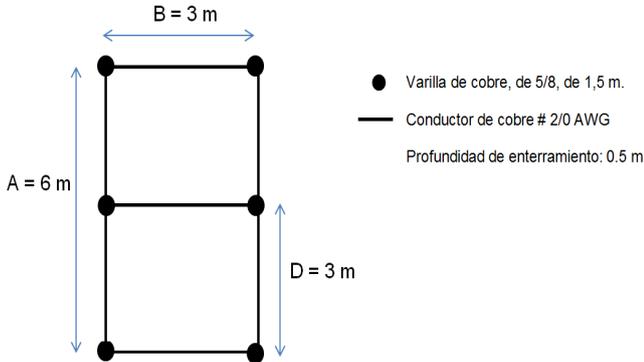


Fig. 8. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra – Edificio del Octógono.

Por lo tanto, la longitud de cable horizontal, de las varillas y la total es la siguiente:

$$L_C = 21 \text{ m}$$

$$L_T = L_C + 6 \text{ varillas de } 1,5 \text{ m}$$

$$L_T = 21 + (4 * 1,5) = 30 \text{ m}$$

Usando la ecuación 9 y partiendo de los siguientes datos se obtiene la resistencia de la malla:

$$\rho = 30 \Omega \text{ m}$$

$$L_T = 21 \text{ m} + 9 \text{ m} = 30 \text{ m}$$

$$S = 18 \text{ m}^2$$

$$h = 0,5$$

$$R_g = 1,314 \Omega$$

La corriente de la malla se calcula con la ecuación 16, tomando en cuenta un factor de decremento de 1,043 y un factor de división de corriente de falla de 0.6.

$$I_{cc-max-pri} = 473,48 \text{ A}$$

$$I_G = (3)473,48 \text{ A} * 0,6 * 1,043 = 888,92 \text{ A}$$

El GPR es calculado con la ecuación 18:

$$\text{GPR} = 888,92 \text{ A} * 1,314 \Omega = 1168,2 \text{ V}$$

Debido a que GPR es menor que el voltaje de toque $E_{t50} = 733,61 \text{ V}$, se puede dar por finalizado el diseño.

Para el cálculo del voltaje de toque y de paso de la malla se deben usar las ecuaciones 19 y 31, pero antes se deben realizar los cálculos necesarios partiendo de los siguientes datos:

- $h_0 = 1 \text{ m}$
- $D = 3 \text{ m}$
- $h = 0,5 \text{ m}$

- $d = 4,63 \text{ mm}$
- $K_i = 1$, cuando existen electrodos en las esquinas.

$$K_h = 1,225$$

Ya que la malla es rectangular se tiene que $n_c = n_d = 1$ y queda por calcular n_a y n_b :

$$n_a = 2,33$$

$$n_b = 1,03$$

$$n = 2,33 * 1,03 * 1 * 1 = 2,4$$

$$K_m = 0,953$$

$$K_i = 1$$

$$L_M = 37,41$$

$$E_m = 679,21 \text{ V}$$

$$K_s = 0,49$$

$$L_s = 23,4 \text{ m}$$

$$E_s = 557,4 \text{ V}$$

Voltaje de toque:

$$679,21 \text{ V} < 733,61 \text{ V}$$

Voltaje de paso:

$$557,4 \text{ V} < 2442,61 \text{ V}$$

Debido a que los voltajes de toque y de paso de la malla son menores a sus respectivos voltajes tolerables por el ser humano, se puede asegurar que el diseño de la malla es el óptimo.

En la Tabla 6 se pueden ver los detalles de la malla de puesta a tierra diseñada para el edificio de Administración Central.

Tabla 7.

Detalles del diseño de la malla de puesta a tierra para el edificio de Administración Central.

Item	Descripción	Variable	Valor
1	Área de la malla	S	6m x 3m
2	Capa superficial	h_s	0,15 m
3	Resistividad capa superficial	ρ_s	3000 $\Omega \cdot \text{m}$
4	Tratamiento de suelo		Cemento químico GEM
5	Diámetro del conductor	d	2/0 AWG
6	Espaciamiento entre conductores paralelos	D	3 m
7	Profundidad de enterramiento de la malla	h	0,5 m
8	Longitud de la malla horizontal	L_C	21 m
9	Número de barras verticales	n_r	6
10	Longitud de las barras verticales	L_r	1,5 m
11	Longitud efectiva de la malla	L_T	30 m
12	Distancia entre la malla y el tablero principal		3,5 m
13	Uniones		Suelda exotérmica
14	Diagrama de la malla SPT		Figura 9

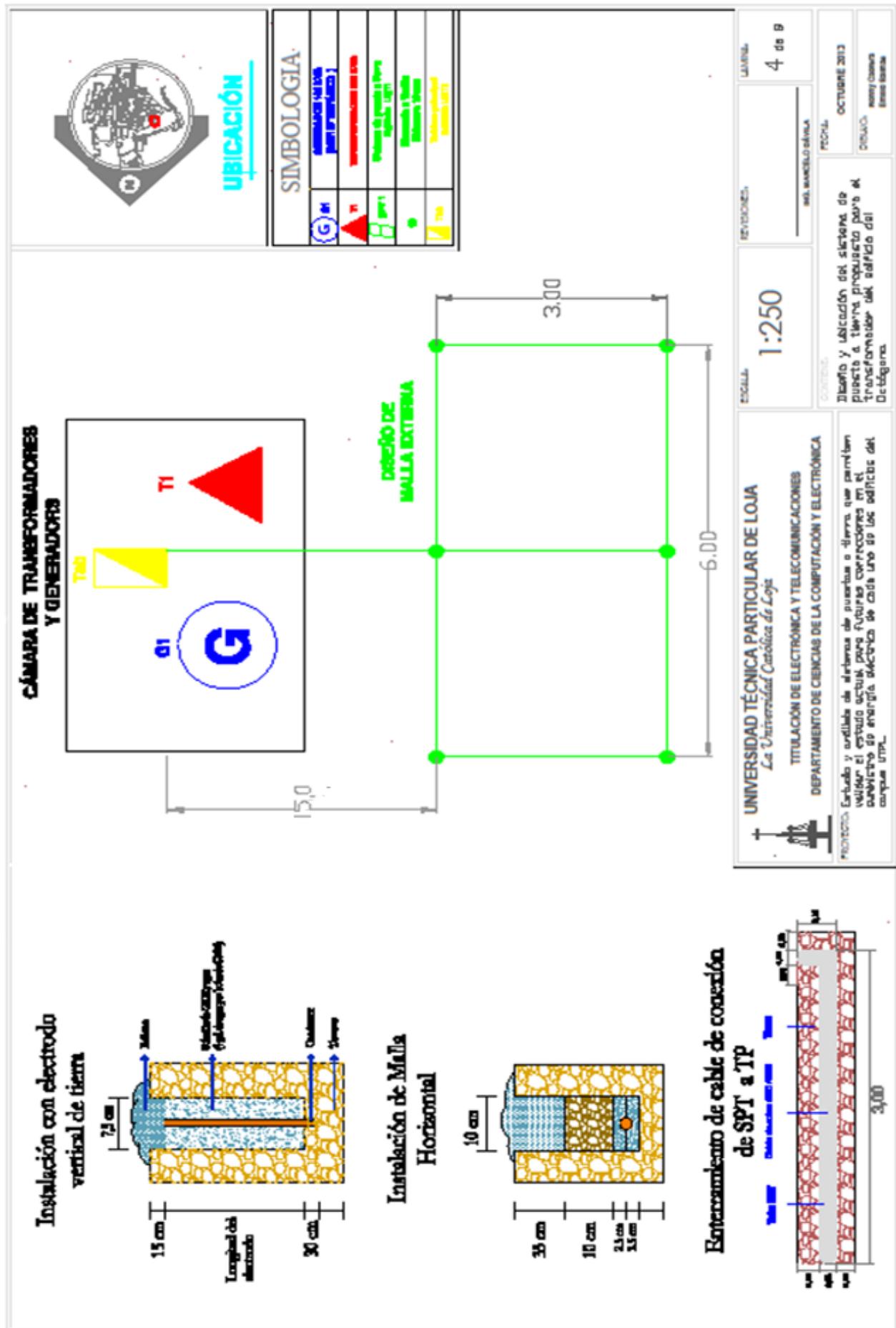


Fig. 9. Diagrama de la malla propuesta para el edificio del Octógono.

Análisis Económico: Presupuesto.

La información de precios fue obtenida por proveedores locales y nacionales: INDELEC (Loja) y COMELEC (Guayaquil). El análisis económico ha sido elaborado con precios vigentes a noviembre de 2013.

El valor del costo total de la malla, tomando en cuenta la mano de obra necesaria para implementación de la misma, se muestra en la Tabla 3, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para el tratamiento de suelo se usará GEM. Fabricantes como Erico y Parres recomiendan que un saco de 10 Kg sea utilizado en 3 metros de cable horizontal, o en un pozo de barras verticales, siguiendo el procedimiento de la sección 1.9.5.4. Al tratarse de un suelo con resistividad alta se recomienda usar dos dosis de GEM por cada 3 metros, para de esta forma llegar a los 30 Ω m. Por lo tanto se tiene que para el tratamiento de suelo de la malla horizontal se ocuparán 14 sacos de GEM y para el tratamiento de suelo de las barras verticales se usarán 6 sacos.

- Se recomienda mezclar el cemento GEM con tierra de cultivo (humus) y carbón triturado para aumentar la eficiencia del tratamiento del suelo, tanto en su resistividad como en la cantidad de cemento GEM usado. Proveedores locales recomiendan una relación de un saco de tierra de cultivo y de carbón por cada saco de cemento GEM.
- Para las uniones se usará suelda exotérmica, en este caso en los 6 puntos de la malla.
- La distancia entre la malla y el tablero principal es de 15 m, por lo que se debe considerar esta cantidad de cable # 2/0 AWG para su unión.

Se sugiere adquirir los materiales de la empresa INDELEC, debido al ahorro económico y al ser un proveedor local se puede dar la operable asesoría que se tendrá de parte de los técnicos de la empresa.

Tabla 3.
Costos de implementación del plan de mejoras del SPT del edificio de Administración Central.

			Proveedores (Loja/Guayaquil)			
			INDELEC		COMELEC	
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T	Costo U	Costo T
1	21	Conductor desnudo Nro. 2/0 AWG Cu	\$ 9,00	\$ 189,00	\$ 8,00	\$ 168,00
2	6	Varillas Copperweld de 5/8, Cu, de 1,5m.	\$ 8,00	\$ 48,00	\$ 8,84	\$ 53,04
3	6	Cápsulas de suelda exotérmica	\$ 8,00	\$ 48,00	\$ 6,10	\$ 36,60
4	20	Sacos de GEM	\$ 30,00	\$ 600,00	\$ 35,79	\$ 715,80
5	1	Operador de control	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 180,00	\$ 180,00
6	1	Transporte de materiales	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 30,00	\$ 30,00
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 985,00		\$ 1.183,44	
OTROS MATERIALES						
Ítem	Cant.	Descripción	Costo U	Costo T		
1	20	Sacos de tierra de cultivo	\$ 5,00	\$ 100,00		
2	20	Sacos de carbón	\$ 7,50	\$ 150,00		
3	gbl	Mano de obra civil, excavaciones		\$ 370,50		
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 620,50			
RESUMEN DE PRESUPUESTO						
Proveedor local			\$ 985,00			
Otros materiales			\$ 620,50			
TOTAL (Incluye IVA)			\$ 1.605,00			

V. CONCLUSIONES

- Un sistema de puesta a tierra se diseña principalmente para cumplir funciones de seguridad: ante las personas, limitando la tensión de contacto, y, antes los equipos e instalaciones dando un camino de baja impedancia en caso de una falla eléctrica. Un sistema de puesta a tierra cumple otras funciones como mejorar la calidad de la señal eléctrica minimizando el ruido electromagnético y estableciendo un potencial de referencia, equipotencializando el sistema eléctrico.
- La norma IEC 61000-5-2, sugiere que la mejor solución de sistema de puesta a tierra, para un edificio o planta, es una red mallada enterrada.
- Se ha propuesto una metodología de diseño de sistemas de puesta a tierra en baja tensión tomando como base tres criterios: seguridad, diseño y evaluación. De la norma IEEE Std. 80-2000 se toman los criterios de seguridad, diseño de la estructura del suelo y evaluación. De la norma IEEE Std. 141 se toma el criterio de diseño del dimensionamiento del conductor de la malla. Y, de la norma IEEE Std. 142 se toma el criterio de evaluación del sistema de puesta a tierra.
- Para la medición de la resistividad del terreno se aplicó el método de las cuatro puntas de Wenner, utilizando el equipo Fluke 1625.
- Para la medición de la resistencia de puesta a tierra se empleó el método de comprobación “sin estacas”, utilizando el equipo Fluke 1625. Este método elimina problemas como el de desconectar la ruta de tierra que se va a comprobar y la falta de espacio que requieren los métodos de medición, como el de 3 o 4 polos.
- La resistencia del sistema de puesta a tierra del transformador que abastece al edificio de Unidades Productivas no cumple con el valor sugerido por la normativa. La resistividad del terreno es de 30,14 Ωm , por lo que no es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.
- La resistencia del sistema de puesta a tierra del transformador que abastece al edificio de Artes no cumple con el valor sugerido por la normativa. La resistividad del terreno es de 186,01 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.
- La resistencia del sistema de puesta a tierra del transformador que abastece al edificio de Administración central no cumple con el valor sugerido por la normativa. La resistividad del terreno es de 158,75 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece al edificio del Octógono da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. La resistividad del terreno es de 366,8 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece al Centro de Convenciones da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. La resistividad del terreno es de 43,58 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece a la Cafetería da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. La resistividad del terreno es de 86,03 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este lugar.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece al edificio del Laboratorios da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. La resistividad del terreno es de 245,67 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este edificio.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece la Planta ECOLAC da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. La resistividad del terreno es de 121,7 Ωm por lo que es necesario realizar tratamiento de suelo en este sector.

- La medición de la resistencia de puesta a tierra del transformador que abastece la Planta CERART da como resultado valores inconsistentes; posiblemente por la conexión del neutro a tierra, corrosión en los conductores o desconexión en algún punto del sistema. No se pudo realizar la medición de la resistividad del terreno ya que no se cuenta con el espacio disponible por la infraestructura montada en el lugar.

VI. REFERENCIAS

- [1.] Comisión Electrotécnica Internacional, "Reporte técnico de Compatibilidad electromagnética (EMC), IEC 61000-5-2". 1997.
- [2.] IEEE Std 142-2007, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems". 2007.
- [3.] IEEE Std 141-1993, "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants". 1993.
- [4.] Fluke Corporation, "Manual de uso Earth/Ground Tester Fluke 1625". [en línea], disponible en:
<http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-1625_user_manual.pdf, [consulta 01-07-2013].