



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE VOLTAJES DE PASO Y TOQUE EN
MALLAS CIRCULARES Y RECTANGULARES MEDIANTE LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN TANQUE ELECTROLÍTICO”**

AUTORES

Víctor Hugo Castillo Pazmiño

Edgar Joel Márquez Villalba

DIRECTOR: MSc. David Humberto Cárdenas Villacrés

GUAYAQUIL

2018

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **EDGAR JOEL MÁRQUEZ VILLALBA** y **VÍCTOR HUGO CASTILLO PAZMIÑO** autorizamos a la **Universidad Politécnica Salesiana** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, Junio, 5, 2018

Edgar Joel Márquez Villalba

C.I: 0940299365

Víctor Hugo Castillo Pazmiño

C.I: 0919286542

CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Yo, **VICTOR HUGO CASTILLO PAZMIÑO**, con documento de identificación N° **0919286542**, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**ANÁLISIS COMPARATIVO DE VOLTAJES DE PASO Y TOQUE EN MALLAS CIRCULARES Y RECTANGULARES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TANQUE ELECTROLÍTICO**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Junio, 5, 2018

Víctor Hugo Castillo Pazmiño

C.I: 0919286542

CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Yo, **EDGAR JOEL MARQUEZ VILLALBA**, con documento de identificación N° **0940299365**, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**ANÁLISIS COMPARATIVO DE VOLTAJES DE PASO Y TOQUE EN MALLAS CIRCULARES Y RECTANGULARES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TANQUE ELECTROLÍTICO**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Junio, 5, 2018

Edgar Joel Márquez Villalba

C.I: 0940299365

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR**

Yo, **DAVID HUMBERTO CÁRDENAS VILLACRÉS**, director del proyecto de Titulación denominado “**ANÁLISIS COMPARATIVO DE VOLTAJES DE PASO Y TOQUE EN MALLAS CIRCULARES Y RECTANGULARES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TANQUE ELECTROLÍTICO**” realizado por los estudiantes, **VÍCTOR HUGO CASTILLO PAZMIÑO Y EDGAR JOEL MÁRQUEZ VILLALBA**, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, Junio, 5, 2018

David Humberto Cárdenas Villacrés

MSc.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo A Dios, a mi madre Grey por su incondicional apoyo a lo largo de mi carrera, a mi padre Víctor quien para ha sido un ejemplo a seguir, mis padres quienes son y serán mis mejores consejeros que la vida me ha podido brindar.

A mis hermanos que son mis mejores amigos que Dios me ha dado, a mis hijos Armando y Victorino quienes me han brindado la fuerza para levantarme y seguir adelante cuando no me salieron bien las cosas, ellos quienes me han sido mi inspiración para convertirme cada día en un mejor ser humano.

A mis amigos y compañeros de aula con los que inicie este camino, a los que lograron recorrerlo hasta el final, y a los que por diversos factores o motivos no pudieron concluirlo. A ellos, con quienes siempre existió un apoyo mutuo para lograr superar cada obstáculo que se nos presentó en nuestra vida estudiantil. A mi amigo Ecuador quien ahora me mira desde el cielo, con quien inicié este recorrido y con quien me hubiera gustado terminarlo.

Víctor Castillo

Dedico este trabajo a mi esposa por su apoyo incondicional en esta última etapa de mi carrera, a mi hijo que perseguirá mis pasos, logrando alcanzar propósitos establecidos, tal cual los he logrado; y a mis padres, por estar siempre a mi lado en la realización de mis deberes, por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracteriza, los cuales me han infundado desde niño, sobre todo por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mi abuela Nieves que me guía desde el cielo, llevándola presente en mi mente y corazón.

A mis amigos, que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional, superando los obstáculos difíciles a través del trabajo en equipo, donde quedó demostrado que los amigos de verdad, no solo se forman en la secundaria sino también en la universidad.

Edgar Márquez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por mantenerme con buena salud a mí y a mi familia para poder cumplir mis metas y propósitos en la vida. A mis padres quienes siempre han creído y confiado en mí especialmente en los momentos más difíciles que me ha tocado vivir.

A mis hijos quienes han sido mi fuente de inspiración y motivación para seguir superándome profesionalmente. A mis familiares y amigos que me han brindado su ayuda en el momento que ha sido requerida.

A todos los docentes que he conocido en mi etapa universitaria, de cada uno de ellos he logrado aprender algo para hacer alguien mejor.

Víctor Castillo

Agradezco a DIOS por permitirme vivir y haberme dado una familia maravillosa. A mis padres por haberme inculcado una carrera para mi futuro y comprendido en los momentos más difíciles de la vida.

A mis amigos y familiares por sus ánimos y apoyo incondicional, que gracias a ellos me encuentro terminando otra etapa de la vida.

A los profesores: Ing. Roy Santana, Ing. Ervin Solano e Ing. David Cárdenas, por habernos otorgado sus conocimientos e indicaciones necesarias para la elaboración del proyecto y consecución de los objetivos.

Edgar Márquez

RESUMEN

Este artículo está enfocado a una parte muy importante de los sistemas eléctricos de potencia, como son los sistemas de puesta a tierra.

El presente proyecto está orientado al análisis y las comparaciones de las distribuciones de voltaje en las diferentes configuraciones rectangulares y circulares de mallas de puesta a tierra según Norma IEEE-80. Estos valores son obtenidos mediante la implementación de un tanque electrolítico y también por las mediciones realizadas a un sistema de puesta a tierra (SPT) real.

Los valores que se consiguen de estos dos métodos serán analizados y comparados con los resultados del programa ETAP, que es utilizado para el diseño y análisis de los SPT. Los objetivos de este artículo son determinar cuál configuración de malla es la que presenta mayor seguridad en los sistemas de puesta a tierra. Y demostrar que el tanque electrolítico es un método viable para realizarlas mediciones en SPT.

Palabras claves: Tanque Electrolítico, Sistema de Puesta a Tierra, Malla de Tierra, ETAP, Voltajes de Toque y Paso.

ABSTRACT

This article is focused on a very important part of electrical power systems, such as grounding systems.

The present project is oriented to the analysis and the comparisons of the voltage distributions in the different rectangular and circular configurations of grounding meshes according to IEE-80 Standard. These values are obtained by the implementation of an electrolytic tank and also by the measurements made to a real grounding system (SPT).

The values obtained from these two methods will be analyzed and compared with the results of the ETAP program, which is used for the design and analysis of the SPT

The objectives of this article are to determine which configuration of mesh is the one that presents greater security in the systems of grounding. And demonstrate that the electrolytic tank is a viable method to perform measurements in SPT.

Keywords: Electrolytic Tank, Earthing System, Earth Mesh, ETAP, Touch and Step Voltages.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
PORTADA	i
CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TIULACIÓN	iii
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS	iv
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS	v
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR	vi
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE DE CONTENIDOS	x
INDICE DE FIGURAS	xiv
INDICE DE TABLAS	xviii
INDICE DE ECUACIONES	xix
INDICE DE ANEXOS	xxi
ABREVIATURAS	xxii
INTRODUCCION	1
CAPÍTULO 1	2
1. EL PROBLEMA	2
1.1. Descripción del Problema	2
1.2. Antecedentes	2
1.3. Importancia y Alcances	2
1.4. Delimitación	3
1.5. Objetivos	3
1.5.1. Objetivo General	3
1.5.2. Objetivo Especifico	3
1.6. Marco Metodológico	3
CAPÍTULO 2	5

2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Sistema de Puesta a Tierra.....	5
2.1.1. Elementos de un sistema de puesta a tierra.....	7
2.1.2. Factores del terreno.....	11
2.1.3. Métodos de Simulación de un SPT.....	13
2.1.4. Medidas de seguridad en un SPT.....	15
2.1.5. Mantenimiento de un SPT	15
2.2. Efecto de la corriente en el cuerpo humano.	16
2.2.1. La frecuencia y sus consecuencias en el cuerpo humano	16
2.2.2. Impedancia del cuerpo humano	17
2.2.3. Rango de corriente tolerable	18
2.2.4. Tensión aplicada al cuerpo humano.....	20
2.3. Resistividad del Terreno.....	23
2.3.1. Método de Wenner.....	23
2.3.2. Modelo de dos capas mediante el método gráfico	24
2.4. Resistencia del Sistema de Puesta a Tierra.....	26
2.4.1. Método Sverak.....	26
2.4.3. Método del 62% - 3 polos	28
2.4.4. Método del 62% - 4 polos.....	30
2.5. Parámetros de un Sistema de Puesta a Tierra.....	31
2.5.1. Elevación del potencial de la malla (GPR).....	31
2.5.2. Corriente máxima a disipar por la malla (IG).....	32
2.5.3. Corriente simétrica de falla a tierra (IF)	32
2.5.4. Factor de crecimiento (Cp):	33
2.5.5. Factor de decremento (Df o X/R)	33
2.5.6. Factor de división de corriente (Sf)	33
2.5.7. Duración de la falla (tf), duración del choque (ts) y duración de la corriente (tc).	34
2.5.8. Potencial de la malla de tierra.....	34
CAPÍTULO 3	37
3. INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTO	37
3.1. Tanque Electrolítico	37
3.1.1. Paralelepípedo:.....	37
3.1.2. Electrodo de retorno.....	38

3.1.3.	Sondas de medida	38
3.1.4.	Electrolito.....	39
3.1.5.	Fuente de alimentación	39
3.1.6.	Instrumentos de Medida.....	40
3.1.7.	Mallas de Puesta a Tierra.....	41
3.2.	Construcción del Tanque Electrolítico	41
3.2.1.	Elección y corte del acrílico.....	41
3.2.2.	Ensamblaje.....	42
3.2.3.	Instalación de electrodo de retorno.....	43
3.3.	Construcción de mallas de puesta a tierra.	43
3.4.	Aplicación del electrólito.....	44
3.5.	ETAP	46
CAPÍTULO 4		53
4.	ANÁLISIS DE RESULTADO	53
4.1.	Valores del Sistema de Puesta a Tierra del modelado de una capa sin electrolito.	53
4.1.1.	Voltaje de toque y paso en malla triangular	55
4.1.2.	Voltaje de toque y paso en malla cuadrada.....	57
4.1.3.	Voltaje de toque y paso en malla circular	58
4.1.4.	Voltaje de toque y paso en malla cuadrada-circular	59
4.1.5.	Voltaje de toque y paso en malla tipo rejilla	60
4.2.	Valores del Sistema de Puesta a Tierra del modelado de una capa con electrolito.	61
4.2.1.	Voltaje de toque y paso en malla triangular	62
4.2.2.	Voltaje de toque y paso en malla cuadrada.....	63
4.2.3.	Voltaje de toque y paso en malla circular	64
4.2.4.	Voltaje de toque y paso en malla cuadrada-circular	65
4.2.5.	Voltaje de toque y paso en malla tipo rejilla	66
4.3.	Valores del Sistema de Puesta a Tierra del modelado de dos capa sin electrolito.	67
4.3.1.	Voltaje de toque y paso en malla triangular	69
4.3.2.	Voltaje de toque y paso en malla cuadrada.....	70
4.3.3.	Voltaje de toque y paso en malla circular	71
4.3.4.	Voltaje de toque y paso en malla cuadrada-circular	72

4.3.5.	Voltaje de toque y paso en malla tipo rejilla	73
4.4.	Valores del Sistema de Puesta a Tierra del modelado de dos capa con electrolito.	74
4.4.1.	Voltaje de toque y paso en malla triangular	75
4.4.2.	Voltaje de toque y paso en malla cuadrada.....	76
4.4.3.	Voltaje de toque y paso en	77
4.4.4.	Voltaje de toque y paso en malla cuadrada-circular	78
4.4.5.	Voltaje de toque y paso en malla tipo rejilla	79
4.5.	Pruebas de Campo de un Sistema de Puesta a Tierra	80
4.5.1.	Voltaje de toque y paso en malla triangular	86
4.5.2.	Voltaje de toque y paso en malla cuadrada.....	87
4.5.3.	Voltaje de toque y paso en malla circular	88
4.5.4.	Voltaje de toque y paso en malla cuadrada – circular	89
4.5.5.	Voltaje de toque y paso en malla tipo rejilla	90
4.6.	Resumen de datos finales.	92
	CONCLUSIONES.....	94
	RECOMENDACIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA	96
	ANEXOS	98

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL	6
FIGURA 2. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN UN EDIFICIO	7
FIGURA 3. TIPOS DE UNIONES CON SOLDADURA EXOTERMICA.....	10
FIGURA 4.RESISTIVIDAD DEL TERRENO VS. HUMEDAD	12
FIGURA 5.RESISTIVIDAD DEL TERRENO VS. TEMPERATURA.....	12
FIGURA 6.RESISTIVIDAD DEL TERRENO VS. SALINIDAD.....	13
FIGURA 7. TRATAMIENTO DE UNA PUESTA A TIERRA	16
FIGURA 8. GRÁFICA TENSIÓN DE CONTACTO VS. IMPEDANCIA TOTAL DEL CUERPO	18
FIGURA 9: TENSIÓN DE CONTACTO Y ESQUEMA ELÉCTRICO.....	21
FIGURA 10: TENSIÓN DE PASO Y ESQUEMA ELÉCTRICO	22
FIGURA 11: MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO MEDIANTE EL METODO DE WENNER.....	24
FIGURA 12: MODELO DE SUELO DE DOS CAPAS.....	25
FIGURA 13: GRÁFICO DE SUNDE	26
FIGURA 14: CURVA DE LA RESISTENCIA DEL TERRENO APLICANDO EL METODO DEL 62%	29
FIGURA 15: MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA MEDIANTE EL METODO DE 3 POLO	29
FIGURA 16: MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA MEDIANTE EL METODO DE 4 POLO	30
FIGURA 17: TANQUE ELECTROLITICO Y SUS ELEMENTOS.....	37
FIGURA 18: RECIPIENTES ACRILICOS	38
FIGURA 19: COLOCACIÓN DE LAMINA DE RETORNO	38
FIGURA 20: SONDAS DE MEDIDAS.....	39
FIGURA 21: IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROLITO EN CONFIGURACION DE 1 Y 2 ESTRATOS DE TERRENO	39
FIGURA 22: FUENTE VARIABLE TRIFASICA	40
FIGURA 23: PINZA AMPERIMETRICA FLUKE 373	40
FIGURA 24: COMPROBADOR DE PUESTA A TIERRA 1625-2 GEO.....	41
FIGURA 25: DIMENSIONES DE CORTES EN PLANCHA ACRILICA	42
FIGURA 26: INSTALACIÓN DE ELECTRODO DE RETORNO	43
FIGURA 27: UNION DE MALLA CIRCULAR CON CAUTIN Y ESTAÑO	44
FIGURA 28: PRUEBAS DE PUESTA A TIERRA SIN ELECTROLITO.....	45
FIGURA 29: REACCIÓN QUIMICA DE MALLA CUADRADA Y REJILLA CON ELECTROLITO	45
FIGURA 30: PARAMETROS ESTANDAR.....	47
FIGURA 31: METODO DE CÁLCULO PARA EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	48
FIGURA 32: COORDENADAS PARA EL DISEÑO DE LA MALLA DE TIERRA .	50

FIGURA 33: PARAMETROS DEL CASO DE ESTUDIO DE LA MALLA	51
FIGURA 34: VALORES DE TOQUE Y PASO ADMISIBLES.....	52
FIGURA 35: ARREGLO DEL MODELADO DE UNA CAPA	53
FIGURA 36: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TRIANGULAR SIN ELECTROLITO.....	56
FIGURA 37: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TRIANGULAR SIN ELECTROLITO.....	56
FIGURA 38: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA SIN ELECTROLITO.....	57
FIGURA 39: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA SIN ELECTROLITO.....	57
FIGURA 40: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CIRCULAR SIN ELECTROLITO.....	58
FIGURA 41: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CIRCULAR SIN ELECTROLITO	58
FIGURA 42: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA - CIRCULAR SIN ELECTROLITO	59
FIGURA 43: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA - CIRCULAR SIN ELECTROLITO	59
FIGURA 44: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TIPO REJILLA SIN ELECTROLITO.....	60
FIGURA 45: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TIPO REJILLA SIN ELECTROLITO.....	60
FIGURA 46: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TRIANGULAR CON ELECTROLITO.....	62
FIGURA 47: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TRIANGULAR CON ELECTROLITO.....	63
FIGURA 48: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA CON ELECTROLITO.....	63
FIGURA 49: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA CON ELECTROLITO.....	64
FIGURA 50: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CIRCULAR CON ELECTROLITO.....	64
FIGURA 51: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CIRCULAR CON ELECTROLITO.....	65
FIGURA 52: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR CON ELECTROLITO	65
FIGURA 53: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR CON ELECTROLITO	66
FIGURA 54: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TIPO REJILLA CON ELECTROLITO.....	66
FIGURA 55: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TIPO REJILLA CON ELECTROLITO.....	67
FIGURA 56: ARREGLO DE DOS CAPAS	67

FIGURA 57: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TRIANGULAR SIN ELECTROLITO.....	69
FIGURA 58: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TRIANGULAR SIN ELECTROLITO.....	70
FIGURA 59: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA SIN ELECTROLITO.....	70
FIGURA 60: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA SIN ELECTROLITO.....	71
FIGURA 61: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CIRCULAR SIN ELECTROLITO.....	71
FIGURA 62: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CIRCULAR SIN ELECTROLITO	72
FIGURA 63: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR SIN ELECTROLITO	72
FIGURA 64: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR SIN ELECTROLITO	73
FIGURA 65: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TIPO REJILLA SIN ELECTROLITO.....	73
FIGURA 66. DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TIPO REJILLA SIN ELECTROLITO.....	74
FIGURA 67: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TRIANGULAR CON ELECTROLITO.....	75
FIGURA 68: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TRIANGULAR CON ELECTROLITO.....	76
FIGURA 69: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA CON ELECTROLITO.....	76
FIGURA 70: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA CON ELECTROLITO.....	77
FIGURA 71: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CIRCULAR CON ELECTROLITO.....	77
FIGURA 72: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CIRCULAR CON ELECTROLITO.....	78
FIGURA 73: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR CON ELECTROLITO	78
FIGURA 74: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR CON ELECTROLITO	79
FIGURA 75: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TIPO REJILLA CON ELECTROLITO.....	79
FIGURA 76: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TIPO REJILLA CON ELECTROLITO.....	80
FIGURA 77. DIMENSIONES Y TRAZADO DEL TERRENO PARA EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	80
FIGURA 78: CURVA DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO	82
FIGURA 79: GRAFICA DE SUNDE – TRAZADO DE VALORES	83

FIGURA 80: TRAZADO DE LA RESISTIVIDAD APARANTE Y PROFUNDIDAD DE LA SEGUNDA CAPA.....	84
FIGURA 81: COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE LAS MALLAS DEL SPT	85
FIGURA 82: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TRIANGULAR EN CAMPO.....	86
FIGURA 83: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TRIANGULAR EN CAMPO.....	87
FIGURA 84: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA EN CAMPO.....	87
FIGURA 85: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA EN CAMPO.....	88
FIGURA 86: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CIRCULAR EN CAMPO.....	88
FIGURA 87: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CIRCULAR EN CAMPO.....	89
FIGURA 88: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR EN CAMPO	89
FIGURA 89: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR EN CAMPO	90
FIGURA 90: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TIPO REJILLA EN CAMPO.....	90
FIGURA 91: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TIPO REJILLA EN CAMPO.....	91

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. VALORES ORIENTATIVOS DE LA RESISTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TERRENO.....	8
TABLA 2. CARACTERISTICAS DE MATERIALES UTILIZADOS PARA PUESTAS A TIERRA.....	9
TABLA 3. VALORES DE LA IMPEDANCIA TOTAL DEL ORGANISMO HUMANO	17
TABLA 4. MAGNITUD Y EFECTOS DE LA CORRIENTE SOBRE LAS PERSONAS	19
TABLA 5. VALORES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.....	31
TABLA 6. VALORES DE DECREMENTO.....	33
TABLA 7. VALORES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA – MODELADO DE UNA CAPA SIN MEJORAMIENTO DEL TERRENO.....	54
TABLA 8. VALORES CALCULADOS Y TOLERABLES DE UNA CAPA SIN MEJORAMIENTO DEL TERRENO	55
TABLA 9. VALORES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE UNA CAPA CON MEJORAMIENTO DEL TERRENO	61
TABLA 10. VALORES CALCULADOS Y TOLERABLES DE UNA CAPA CON MEJORAMIENTO DEL TERRENO	62
TABLA 11. VALORES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA – MODELADO DE DOS CAPAS SIN MEJORAMIENTO DEL TERRENO	68
TABLA 12. VALORES CALCULADOS Y TOLERABLES DE DOS CAPA SIN MEJORAMIENTO DEL TERRENO	68
TABLA 13. VALORES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA - MODELADO DE DOS CAPAS CON MEJORAMIENTO DEL TERRENO.....	74
TABLA 14. VALORES CALCULADOS Y TOLERABLES DE DOS CAPA CON MEJORAMIENTO DEL TERRENO	75
TABLA 15. VALORES DE RESISTENCIA DEL TERRENO EN LAS DIFERENTES RUTAS.....	81
TABLA 16. VALORES DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN LAS DIFERENTES RUTAS.....	81
TABLA 17. RESISTENCIA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	84
TABLA 18. VALORES CALCULADOS Y TOLERABLES DEL SPT EN CAMPO	86
TABLA 19. ELEVACIÓN DEL POTENCIAL DE LA MALLA Y RESISTENCIA DEL SPT DEL MODELADO DE UN ESTRATO	92
TABLA 20. ELEVACIÓN DEL POTENCIAL DE LA MALLA Y RESISTENCIA DEL SPT DEL MODELADO DE DOS ESTRATO	92

INDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. CORRIENTE MÁXIMA PARA PERSONA DE 50KG	20
ECUACIÓN 2. CORRIENTE MÁXIMA PARA PERSONA DE 70 KG	20
ECUACIÓN 3. VOLTAJE DE TOQUE PARA PERSONA DE 50KG	21
ECUACIÓN 4. VOLTAJE DE TOQUE PARA PERSONA DE 70KG	21
ECUACIÓN 5. FACTOR DE REDUCCIÓN DE CAPA SUPERFICIAL.....	21
ECUACIÓN 6. VOLTAJE DE PASO PARA PERSONA DE 50KG	22
ECUACIÓN 7. VOLTAJE DE TOQUE PARA PERSONA DE 70KG	22
ECUACIÓN 8. FACTOR DE REDUCCIÓN DE CAPA SUPERFICIAL.....	23
ECUACIÓN 9. RESISTIVIDAD DEL TERRENO PARA RELACIONES MENORES A 20	24
ECUACIÓN 10. RESISTIVIDAD DEL TERRENO PARA RELACIONES IGUALES O MAYORES A 20.....	24
ECUACIÓN 11. RESISTENCIA DEL SPT MEDIANTE METODO DE SVERAK...26	
ECUACIÓN 12. RESISTENCIA DEL SPT MEDIANTE METODO DE SCHWARZ PARA MALLAS	27
ECUACIÓN 13. COEFICIENTE PARA RELACIÓN DE LARGO Y ANCHO DE MALLA	27
ECUACIÓN 14. COEFICIENTE PARA RELACIÓN DE LARGO Y ANCHO DE MALLA	27
ECUACIÓN 15. RESISTENCIA DEL SPT MEDIANTE METODO DE SCHWARZ PARA VARILLAS.....	28
ECUACIÓN 16. RESISTENCIA DEL SPT MEDIANTE METODO DE SCHWARZ EN PARALELO	28
ECUACIÓN 17. RESISTENCIA PROMEDIO DEL SPT MENDIANTE METODO DE SCHWARZ	28
ECUACIÓN 18. ELEVACIÓN DEL POTENCIAL DE MALLA	31
ECUACIÓN 19. CORRIENTE MÁXIMA A DISIPAR POR LA MALLA	32
ECUACIÓN 20. CORRIENTE SIMÉTRICA DE FALLA LÍNEA A LÍNEA	32
ECUACIÓN 21. CORRIENTE SIMÉTRICA DE FALLA LÍNEA A TIERRA	32
ECUACIÓN 22. POTENCIAL DE TOQUE MÁXIMO	34
ECUACIÓN 23. FACTOR DE SVERAK	34
ECUACIÓN 24. COEFICIENTE PARA MALLAS CON VARILLAS	35
ECUACIÓN 25. COEFICIENTE PARA MALLAS SIN O POCAS VARILLAS	35

ECUACIÓN 26. FACTOR DE CORRECCIÓN PARA EFECTOS DE PROFUNDIDAD DE LA MALLA	35
ECUACIÓN 27. NÚMERO DE CONDUCTORES QUE CONFORMA LA MALLA.....	35
ECUACIÓN 28. CONDUCTORES PARA TODO TIPO DE MALLA.....	35
ECUACIÓN 29. CONDUCTORES PARA MALLA CUADRADA	35
ECUACIÓN 30. CONDUCTORES PARA MALLA RECTANGULAR	35
ECUACIÓN 31. CONDUCTORES PARA MALLA TIPO “L”	35
ECUACIÓN 32. FACTOR DE IRREGULARIDAD DE LA MALLA.....	36
ECUACIÓN 33. LONGITUD EFECTIVA ENTERRADA DEL CONDUCTOR PARA MALLAS CON POCAS VARILLAS.....	36
ECUACIÓN 34. LONGITUD TOTAL DE VARILLAS.....	36
ECUACIÓN 35. LONGITUD EFECTIVA ENTERRADA DEL CONDUCTOR PARA MALLAS CON MUCHAS VARILLAS	36
ECUACIÓN 36. POTENCIAL DE PASO MÁXIMO.....	36
ECUACIÓN 37. LONGITUD EFECTIVA ENTERRADA DEL CONDUCTOR PARA POTENCIAL DE PASO MÁXIMO	36
ECUACIÓN 38. FACTOR DE ENTERRAMIENTO PARA POTENCIAL DE PASO MÁXIMO	36

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. FLUKE 373 PINZA AMPERIMÉTRICA DE CA.....	98
ANEXO 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE COMPROBADOR DE PUESTA A TIERRA 1625-2 GEO DE FLUKE	99
ANEXO 3.INSTALACIÓN DE MALLA EN TERRENO	108
ANEXO 4. MEDICIÓN DE 4 POLOS MEDIANTE EL MÉTODO DE WENNER..	109
ANEXO 5. PRUEBAS DE CAIDA DE POTENCIAL DEL 62%.....	110
ANEXO 6. TIPOS DE CONFIGURACIONES DE MALLAS DE TIERRA.	112
ANEXO 7. VALORES DE TOQUE Y PASO DE UNA CAPA MEDIDOS EN EL TANQUE ELECTROLITICO.....	116

ABREVIATURAS

ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
°C	Grados Centígrados
CINa	Cloruro de Sodio
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro Cubico
Cp	Factor de crecimiento
Df o X/R	Factor de decremento
FEM	Método de elementos finitos
Fig	Figura
FM	Frecuencia Modulada
GPR	Elevación del potencial de la malla
Hz	Frecuencia
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
IG	Corriente máxima a disparar por la malla
IF	Corriente simétrica de la falla a tierra
J	Joule
kV	Kilovoltio
m	Metro
MEF	Métodos de elementos finitos
N°	Número
PT	Puesta a tierra
Rg	Resistencia del sistema de puesta a tierra
Sf	Factor de división de corriente
SPT	Sistema de Puesta a Tierra
Tc	Duración de corriente
Tf	Duración de falla
Ts	Duración de choque
TV	Televisión
Temp.	Temperatura
UNE EN	Una Norma Española – Norma Europea
uΩ	Micro-Ohmios

Vp

Tensión de paso

Vpa

tensión de paso aplicada

INTRODUCCION

La necesidad de encontrar métodos alternativos y prácticos que nos permitan efectuar mediciones de los parámetros principales de sistemas de puesta a tierra, dicha causa con lleva a desarrollar un método que no genere mucho costo y sea lo suficientemente sencillo y eficaz, retomando los conocimientos básicos para la obtención de datos y su interpretación de los resultados.

Debido que la mayoría de los proyectos, solo se enfocan en desarrollar sistemas de puesta a tierra que ofrezcan la menor resistencia del terreno, sin detenerse a inspeccionar cómo se comporta ante una falla, la distribución de los voltajes de contacto y de paso y los recursos necesarios que permitan abaratar costos.

Por lo tanto a través de este proyecto, se podrá visualizar y comparar que configuración de malla a tierra es la idónea a utilizar, de acuerdo al tipo de terreno que poseen, decidir que recursos utilizar mediante esta simulación, y ponerla en práctica físicamente.

CAPÍTULO 1

1. EL PROBLEMA

1.1. Descripción del Problema.

La necesidad de encontrar métodos alternativos y prácticos para sistemas de puesta a tierra que permitan desarrollar y poner en práctica los conocimientos adquiridos, debido a su alto costo de inversión para su obtención y la gran demanda de estudiantes de ingeniería eléctrica, surge la necesidad de un método de medición para estos sistemas; lo cual con lleva a desarrollar un método que no genere mucho costo y sea lo suficientemente sencillo y eficaz, retomando los conocimientos básicos para su interpretación y obtención de datos.

1.2. Antecedentes.

El ámbito de la construcción ha aumentado considerablemente en estas décadas, los proyectos sociales o privados que se llevan a cabo, son de gran impacto social, lo cual involucra a personas, equipos de avanzada tecnología. Esto demanda un riguroso sistema de protección a tierra frente a alguna anomalía que se suscite en el sistema.

Debido que la mayoría de los proyectos, solo se enfocan en desarrollar sistemas de puesta a tierra que ofrezcan la menor resistencia del terreno, sin detenerse a inspeccionar cómo se comporta ante una falla o los recursos necesarios que permitan abaratar costos.

A través de este proyecto, los estudiantes podrán visualizar y comparar que configuración de malla a tierra es la idónea a utilizar, de acuerdo al tipo de terreno que poseen, decidir que recursos utilizar mediante esta simulación, y ponerla en práctica físicamente.

1.3. Importancia y Alcances

El proyecto tiene como principales beneficiados a los estudiantes de la Universidad Salesiana sede Guayaquil que cursan los últimos semestres de la carrera de ingeniería eléctrica.

Esto ofrece a los estudiantes una interacción teórico - práctico con los sistemas de puesta a tierra, lo cual caracteriza a la Universidad de las demás.

1.4. Delimitación

El proyecto será desarrollado en el Bloque B, Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, ubicada en Chambers y General Francisco Robles 107 de la ciudad de Guayaquil.

Está destinado para los profesionales inmersos en el diseño y construcción de sistemas de puestas a tierra, y estudiantes del séptimo a décimo semestre, para las materias de Alta Tensión I y II, Protecciones y Diseño.

El propósito del proyecto es aumentar el aprendizaje individual y cooperativo de los estudiantes, dado que les permite apreciar los conocimientos impartidos en clase por el docente.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento de la distribución de los voltajes de paso y toque en sistema de puesta a tierra de mallas circulares y rectangulares, con la utilización de un tanque electrolítico.

1.5.2. Objetivo Especifico

- Diseñar e implementar un tanque electrolítico para medición de puestas a tierra.
- Construir escalas físicas de mallas de tierra circulares y cuadradas en el laboratorio de alta tensión
- Medir y analizar los voltajes de paso, toque y GPR (Ground Potential Rise).
- Elaborar documentos técnicos de mediciones y análisis de datos comparativos

1.6. Marco Metodológico

La investigación poseerá un enfoque cuantitativo y experimental, ya que se pretende comprender los factores que intervienen en un sistema de puesta a tierra y los resultados que presenta, es decir estudiar el comportamiento de distribución de voltajes, así como la resistividad del terreno y resistencia de la malla.

El presente proyecto de investigación se establecerá dentro de los siguientes tipos de investigación:

De laboratorio

Debido a que la mayor parte de la investigación la realizaremos dentro del laboratorio de alta tensión de la universidad. Una de las razones principales de utilizar este método es porque nos valemos de la compilación de datos de las pruebas realizadas y manejo adecuado de la información de libros, revistas, resultados de otras investigaciones, etc.

De campo

Dado a que el proyecto, está relacionado con empleo de este método, pues la obtención de estos datos se desarrolló en el cantón Durán – Primavera 2, en un lote baldío, las pruebas y mediciones a presentarse de las diversas configuraciones de mallas de puesta a tierra fueron realizadas en un pozo con un área de 4m² a una profundidad de 0,10m de terreno natural, y las dimensiones de las mallas son de acuerdo al sitio.

Al utilizar este método de investigación nos ayudaremos de la observación directa, la grabación, la filmación, la fotografía, etc. Y podremos realizar las comparaciones necesarias de la obtención de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Sistema de Puesta a Tierra

La puesta a tierra es la unión eléctrica de una parte del circuito eléctrico o de un tramo no perteneciente al mismo, mediante un conductor de cobre desnudo compuesto por uno o varios electrodos soterrados en el suelo, sin equipos de protección.

El objetivo de un sistema de puesta a tierra o SPT es:

- a) Facilitar un camino a la corriente de tierra con la mínima resistencia.
- b) Eliminar las tensiones peligrosas entre los componentes metálicos en la zona de flujo de corriente y también entre dichos elementos y tierra.
- c) Garantizar la seguridad del ser humano, en las instalaciones y en su proximidad. [1]

Los sistemas de puestas a tierra pueden ser de dos tipos:

- **Puesta a tierra de servicio o de referencia:** es la que conecta a tierra, ya sea de manera temporal o permanente, el neutro de los grupos electrógenos o de los transformadores, etc.
- **Puesta a tierra de protección:** es la conexión directa a tierra de los tramos conductores pertenecientes a una instalación eléctrica, que no deben estar sometidos a una diferencia de potencial, pero que podrían ser puestas eventualmente en tensión, ya sea por avería o por contactos accidentales.

Se conectarán al SPT:

- a) Las instalaciones de pararrayos.
- b) Los montajes de antenas, tales como: TV y Frecuencia Modulada.
- c) Los circuitos de fuerzas, además de las estructuras y partes metálicas pertenecientes a la vivienda u industria.
- d) Las instalaciones realizadas con tubería metálica (agua, calderos, depósitos, instalaciones de ascensores y montacargas) y todo componente metálico que esté sujeto a la exposición con un conductor de baja tensión. [2]

Anteriormente, en el campo se realizaba, una puesta de tierra para los sistemas electrónicos, para la protección contra rayos y de protección. Sin embargo, es poco aconsejable e incluso puede resultar peligrosa; debido que en caso de alguna falla o acción de un rayo, pueden producirse diferencias de potencial elevados que pueden poner en peligro la integridad de las personas y los equipos.

Por lo tanto, las normas UNE EN 62305-3 y -4 (IEC 62305-3 y -4) recomiendan entrelazar los distintos sistemas de puesta a tierra, reduciendo la resistencia total de tierra y distribuir estos voltajes elevados por todo el terreno. Las diferencias de potencial entre edificios, en caso de una descarga de rayo, son tanto más pequeñas cuanto más estrechas sean las retículas de la red mallada de puesta a tierra. Ver Fig. 1.

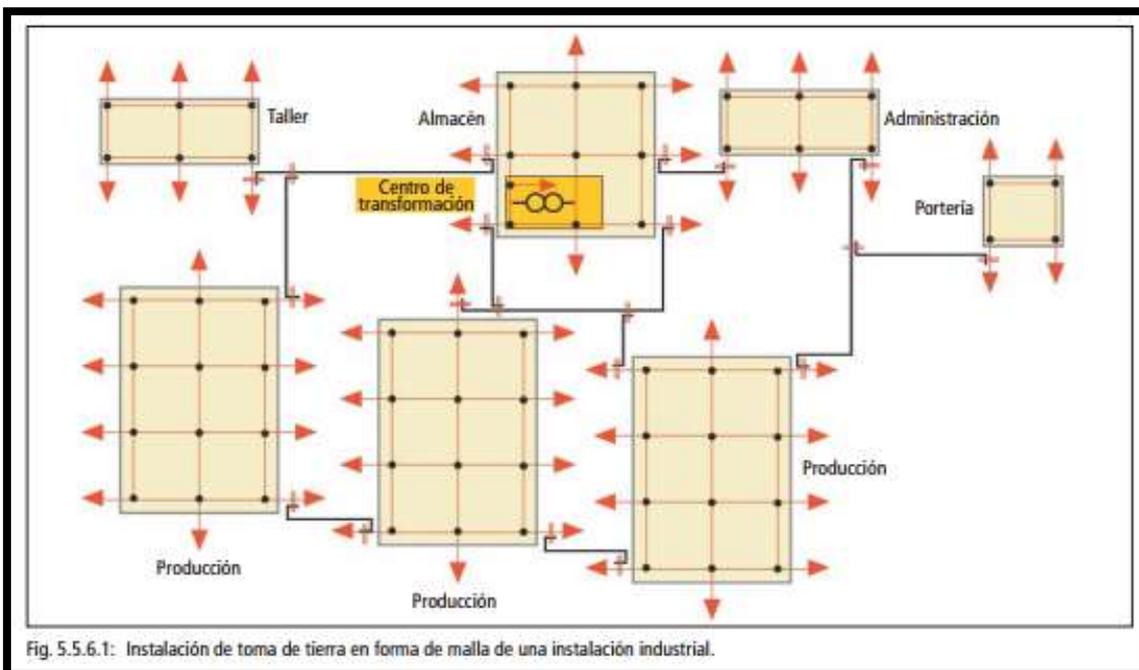


FIGURA 1. INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL [3]

2.1.1. Elementos de un sistema de puesta a tierra

Un SPT, está conformado por un conjunto de elementos, dispuestos de tal manera que se encargan de la protección de las personas y equipos, ante una falla eléctrica. Ver Fig. 2.

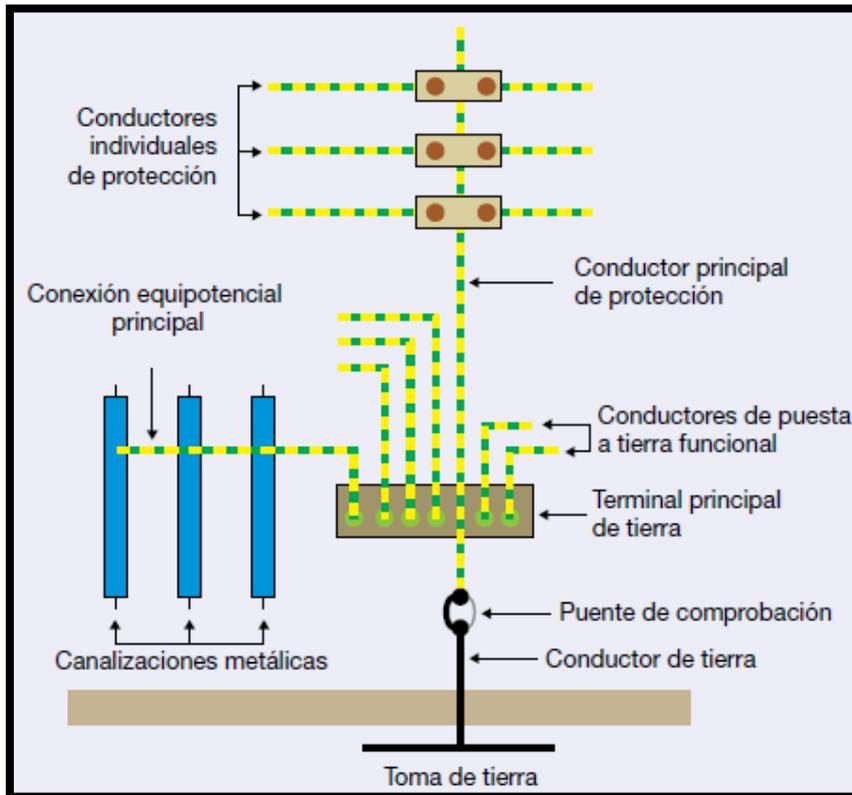


FIGURA 2. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN UN EDIFICIO [4]

- **Terreno.-** Es el que se ocupa de disipar la intensidad de corriente que se encuentre presente en la toma de tierra, ya sean estas corrientes por fallas en el sistema u origen atmosférico.

El terreno posee distintos valores de resistividad de acuerdo a su naturaleza.

TABLA 1. VALORES ORIENTATIVOS DE LA RESISTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TERRENO [5]

Naturaleza del Terreno	Resistividad en Ohm*m
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silícea	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Basalto o grava	3000 a 5000

- **Malla de Tierra.**- Es el conjunto de conductores generalmente de cobre, dispuestos de forma horizontal y vertical unidos en sus intersecciones, enterrados a una profundidad mínima de 0,50m; a su vez se pueden complementar con electrodos de tierras (varillas con alma de acero revestidas con un delgada lámina de cobre) que tienen una longitud de hasta 1,8m. Su función es captar la corriente de falla producida en el sistema y disiparla a través del terreno. En casos especiales las mallas de tierra pueden ser reemplazadas por placas de cobre, debido a condiciones de diseño.

TABLA 2. CARACTERISTICAS DE MATERIALES UTILIZADOS PARA PUESTAS A TIERRA [6]

Descripción	Conductividad del material , %	Factor α_R a 20°C	K (1/ α_R) a °C	Temp. De Fusión °C	ρ_r a 20 °C (uΩ/cm)	Capacidad térmica (J/cm ³ /°C)
Cobre suave recocido	100.0	0.00393	234	1300	1.7241	3.422
Cobre duro	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Cobre con alma de acero	40.0	0.00378	245	1084/1300	4.397	3.846
Aluminio EC	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aluminio aleación 5505	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Aluminio aleación 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
Aluminio con alma de acero	20.3	0.00360	258	660/1300	8.4805	2.670
Acero revestido con zinc	8.5	0.00320	293	419/1300	20.1	3.931
Acero inoxidable N° 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

➤ **Conexiones de Puesta a Tierra.-** La uniones o conexiones de la malla de tierra pueden ser:

- Soldadura Exotérmica.- Es una reacción química que desprende calor dentro de un molde de grafito, en el que se colocará el conductor de cobre, un disco de aluminio que contendrá la pólvora (óxido de cobre y aluminio), que por medio de un encendedor (chispero) se realiza el empalme del conductor a través de la fundición a alta temperatura. [7]

La característica de los moldes de grafito depende del calibre del conductor y el tipo de empalme que se requiere. Ver Fig. 3.



FIGURA 3. TIPOS DE UNIONES CON SOLDADURA EXOTERMICA. [7]

- Grilletes.- Son elementos en que se disponen los conductores, de tal manera que faciliten al operador el ajuste manual de los tornillos o tuercas, hasta cerciorarse que los conductores se encuentren en contacto.

Este método no es recomendable debido que si no se utiliza las herramientas adecuadas, el ajuste es inestable; además que las vibraciones que se producen en el terreno o malla con el pasar del tiempo se debilita el ajuste.

- Compresión.- Se usan terminales de compresión, que posean disposición para alojar a los conductores, los cuales son prensados con una remachadora hidráulica.

Este método es más recomendable que el grillete debido que no se ve afectado por vibraciones.

- **Borne de Puesta a Tierra.**- Es la barra principal de tierra. en el que se une la malla de tierra y los conductores que se reparten a los tableros de distribución o masas,

Este borne debe ser de fácil y rápida ubicación para la realización de pruebas de mantenimiento, en donde se deba aislar la malla de tierra con respecto a la edificación, con el propósito de evitar incongruencias en las lecturas de medición.

- **Conductores de Tierra.**- Tenemos el conductor principal que realiza la conexión entre el borne de puesta a tierra y la malla de tierra; además un conductor secundario, que se deriva del borne de puesta a tierra hacia los tableros de distribución.

- **Conductores de Protección.**- Es el conductor que se conecta desde los tableros de distribución hacia los equipos eléctricos, evitando el contacto indirecto.

- **Conductores Equipotenciales.**- Es el conductor que se conecta desde los tableros de distribución o borne de puesta a tierra, hacia todas las partes metálicas (estructuras, tuberías, anclajes, etc.) que no está sometidas en ningún momento a tensión.
- **Masas.**- Es aquella parte conductora (metálica) que poseen los equipos eléctricos, tuberías, estructuras, etc., que pueden entrar en contacto directo con la corriente al producirse una falla de aislamiento, quedando susceptible a que la persona sufra un choque eléctrico. [8]

2.1.2. Factores del terreno

La impedancia de un SPT depende en gran parte de la resistividad del suelo circundante, extensión y configuración del electrodo enterrado.

El terreno en un lugar determinado puede estar compuesto de varias combinaciones de suelo: seco, arcilla, grava, pizarra, arenisca u otros materiales naturales de resistividad ampliamente variable.

El suelo puede ser relativamente homogéneo en un área grande, o puede ser estratificado en granito, arena u otros materiales de alta resistividad y, por lo tanto, estar prácticamente aislado de los alrededores. [9]

El terreno al igual que la malla de tierra tiene la capacidad de absorber y conducir la corriente de falla o fuga, pero su conductividad depende de algunos factores:

- **Humedad.**- El agua es agente directo que influye en la variación de los valores de la resistividad de los terrenos, en función de la mineralización que contenga. Así, por ejemplo, las aguas fluviales débilmente mineralizadas presenta una alta resistividad; las aguas de lluvia, a causa de su débil mineralización, tienen aún mayor resistividad y las aguas marinas debido a sus sales minerales presentan menor resistividad. Ver Fig. 4.

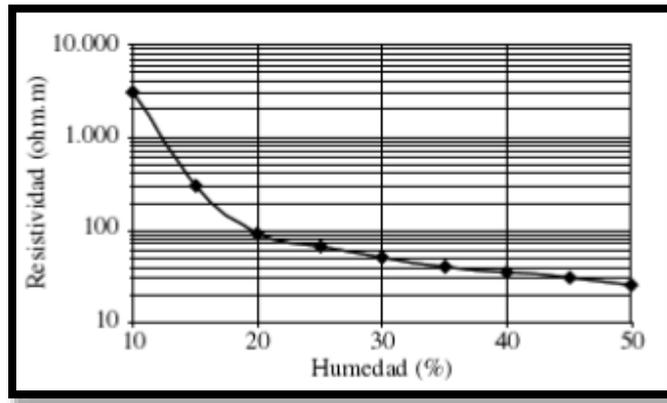


FIGURA 4.RESISTIVIDAD DEL TERRENO VS. HUMEDAD [10]

- **Temperatura.-** La resistividad aumenta lentamente a medida que la temperatura se acerca a 0°C, siendo este aumento más rápido cuando el terreno alcanza temperaturas inferiores a 0°C, afectando estas variaciones, principalmente, a las capas próximas a la superficie del terreno. Ver Fig. 5.

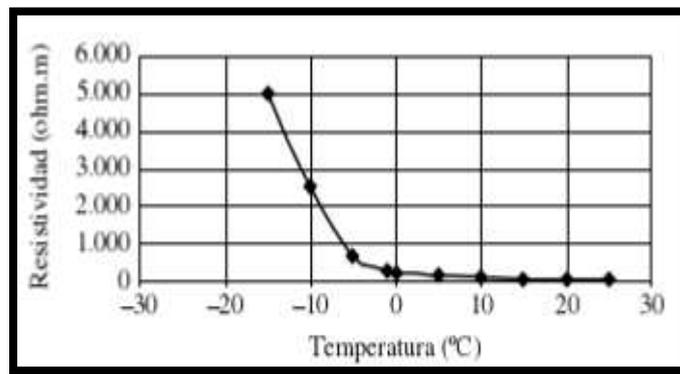


FIGURA 5.RESISTIVIDAD DEL TERRENO VS. TEMPERATURA [10]

- **Salinidad.-** La resistividad disminuye con el contenido de sales del terreno, entre las que juega un papel importante el ClNa, encontrándose estas sales normalmente en forma de soluciones acuosas. Ver Fig. 6.

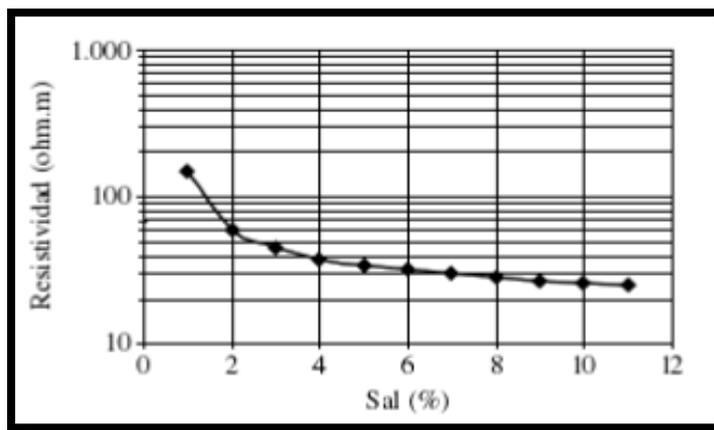


FIGURA 6.RESISTIVIDAD DEL TERRENO VS. SALINIDAD [10]

2.1.3. Métodos de Simulación de un SPT

La simulación de un SPT se realiza mediante los siguientes métodos:

➤ Método Práctico

Actualmente, mediante el avance tecnológico que se ha alcanzado, podemos implementar un SPT a través de software, con la finalidad de verificar que los datos obtenidos de manera analítica, sean los correctos ante diversos tipos de fallas a tierra. Existen una amplia gama de software eléctrico destinado al cálculo y diseño de mallas de tierra, para nuestro caso de estudio el programa empleado es ETAP.

El ETAP es la herramienta más completa para el análisis y control del diseño, simulación y operación de sistemas eléctricos de potencia.

Su diseño modular permite que sea configurado acorde a las necesidades requeridas, desde sistemas de potencia pequeños hasta los más complejos, es decir, podemos diseñar un sistema eléctrico de potencia, situarlo en una malla de tierra y analizar el efecto que tendría las corrientes de fallas en la malla, o también diseñar únicamente la malla de tierra e ingresar valores de acuerdo a los obtenidos en campo; generalmente esta última característica poseen el resto de programas de un SPT; por tal motivo destacamos que ETAP es un programa completo debido a su interacción con las diferentes ramas eléctricas.

Trabaja con normativas IEC y ANSI/IEEE 80.

Permite analizar los siguientes parámetros de un SPT:

- Configuraciones irregulares
- Configuración de suelo de dos capas más material de superficie
- Tabla de potenciales en la superficie de la tierra
- Extensiones de límites externos
- Opciones variables de peso y temperatura
- Corrientes permitidas contra corrientes de falla
- Potenciales a límites tolerables: paso, toque y potenciales absolutos.
- Reportes en Word, Excel o PDF
- Vistas 2D y 3D de la malla de puesta a tierra.

➤ **Método Experimental**

El análisis experimental de una malla de tierra, se realiza por medio de un tanque electrolítico el cual proporciona una configuración experimental útil para diferentes configuraciones de conexión a tierra. La conductividad del agua representa la resistividad del suelo. La conductividad puede ser alterada aumentando la concentración de sal.

Se conecta un terminal de la red de suministro en la parte superior del tanque tocando la malla de tierra en contacto con el agua salada y otro terminal de suministro está conectado a tierra. Los electrodos de sonda se sumergen en el agua, y los voltajes entre la malla y un punto del terreno se obtienen a diferentes distancias. La tensión de voltaje viene dada por la fuente de poder y se calculan los gradientes de potencial de superficie actuales correspondientes y luego se traza el gráfico de equipotenciales en el plano XY.

El tanque de electrolito puede ser utilizado para resolver una gama muy amplia de problemas y los presentados son típicos de sus aplicaciones. Aparte de los gráficos de campo, es posible determinar valores numéricos tales como resistencia, capacitancia y reluctancia de aparatos eléctricos en la etapa de diseño donde el cálculo de tales cantidades es difícil.

El uso del instrumento conduce a una comprensión más clara de las analogías que existen entre los diferentes tipos de campos de vectores armónicos.

El tanque electrolítico es muy útil tanto para fines educativos como de diseño. Muchas mejoras en el método han sido hechas recientemente por varios trabajadores. [11]

2.1.4. Medidas de seguridad en un SPT

Cuando los valores de la resistividad del terreno, corriente de puesta a tierra, tiempo de despeje de la falla, no logren ser los adecuados técnicamente o los valores de los voltajes aplicados de paso y contacto sean desproporcionadas de mantener, se deberá recurrir al empleo de medidas adicionales de seguridad con la finalidad de minimizar los riesgos de las personas y bienes:

- Delimitar el acceso a zonas peligrosas.
- Aislar todas las manijas o mandos que pueden ser manipuladas.
- Instaurar conexiones equipotenciales entre el sector donde se realice el servicio y todos los componentes conductores accesibles del mismo.
- Aislar los conductores de puesta a tierra al ingreso del terreno. [12]

2.1.5. Mantenimiento de un SPT

Una vez al año y en la época en la que el terreno esté más seco, se hará una comprobación del estado del sistema de tierra por un personal competente, midiendo además la resistencia eléctrica del sistema de tierra y efectuando las reparaciones con carácter de urgencia, todos los defectos que pudieran encontrarse.

Si el terreno es agresivo con los electrodos, éstos y los cables de conexión con ellos, habrán de descubrirse cada 5 años, para su revisión o sustitución en el caso de que se encuentren deteriorados.

La variación de la resistencia óhmica de la puesta a tierra, se puede producir por diferentes causas:

- Destrucción corrosiva de los electrodos.
- Aumento de la resistividad del terreno.
- Aflojamiento, corrosión, polvo etc., en las uniones de los conductores de puesta de tierra.
- Rotura de conductor a tierra.

El inconveniente de obtener una baja resistencia en una roca, así como en otros terrenos con una resistividad elevada, está asociado con el material que se encuentra en exposición con el electrodo de cobre y la compactación del pozo a rellenarse. El relleno idóneo, debe compactarse fácilmente, no ser corrosivo, ser buen conductor eléctrico, y no debe perjudicar al ambiente, ni poner en riesgo la vida o la fauna. [13]

Una puesta a tierra se mejora mediante el uso de sales (bentonita, sulfato de magnesio, sulfato de cobre) o geles (THOR GEL, GEM, etc.) que ayuden a incrementar la conductividad del terreno, al ser regado por la lluvia o de manera manual; pero se debe tener en consideración que el empleo de estos agentes otorgue una baja resistividad eléctrica, no sea tóxicos o causen daño a la naturaleza, sobretodo no ser corrosivo debido que al estar en contacto con los conductores o electrodos de la malla, aceleran su deterioro. Ver Fig. 7.

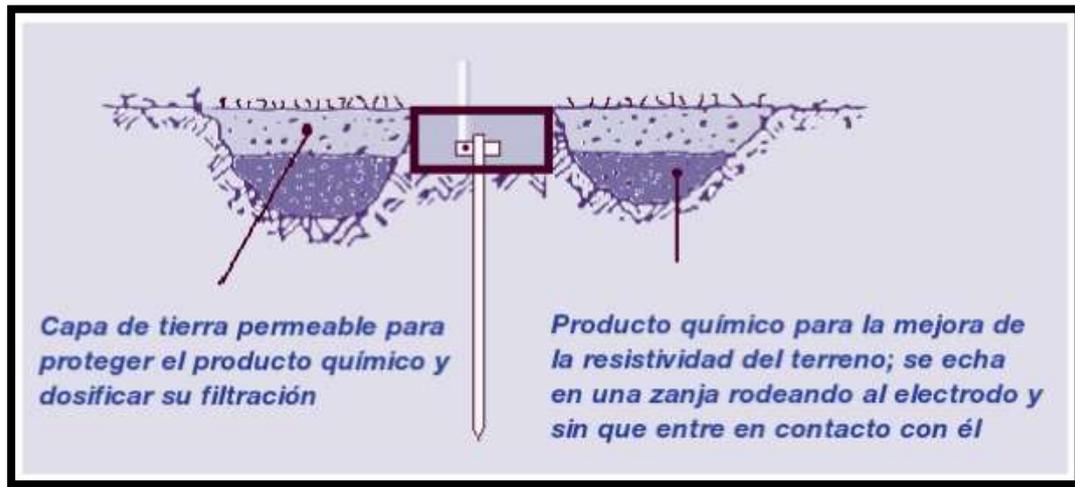


FIGURA 7. TRATAMIENTO DE UNA PUESTA A TIERRA [13]

La manera más convencional para la aplicación de los aditivos, es excavar una zanja circular alrededor de la varilla o perímetro de la malla, en caso que no posea varilla y llenarla con unos 20 o 40 Kg., evitando el contacto directo del químico con el conductor, el proceso no será visible al instante, pero se puede acelerar diluyendo agua en el terreno.

La primera carga perdura unos dos o tres años y, las subsiguientes aún más, por lo que el mantenimiento a realizarse se reduce con el tiempo. [13]

2.2. Efecto de la corriente en el cuerpo humano

2.2.1. La frecuencia y sus consecuencias en el cuerpo humano

En corriente alterna un choque eléctrico o electrocución a frecuencias por encima de los 100.000 Hz, su efecto es menor sobre el cuerpo humano, dado que la corriente alterna de alta frecuencia tiende a circular por la piel sin dañar las masas musculares y los órganos internos.

Por este motivo, se utiliza corriente alterna de alta frecuencia (aproximadamente de 450.000 Hz) en aparatos electro-quirúrgicos con el fin de aprovechar la corriente

eléctrica como fuente calorífica y sin originar peligros de electrocución en los pacientes.

La corriente continua es menos peligrosa que la corriente alterna para iguales valores de intensidad, pero si el contacto por el cuerpo ocurre durante un periodo de tiempo grande puede provocar embolia gaseosa. Además no existe en la actualidad la posibilidad de instalar una protección de tipo diferencial en corriente continua [14].

2.2.2. Impedancia del cuerpo humano

La resistencia de cada cuerpo es inherente a sus condiciones particulares en ese momento y depende de muchos factores: la cantidad de agua del cuerpo humano, el nivel de sales minerales, la ropa, el calzado que llevemos puesto en ese momento, el tipo de piel, de si estamos mojados o no, y sobre todo la resistencia que el cuerpo humano ofrece al paso de la corriente eléctrica depende del recorrido de ésta a través del cuerpo, por ejemplo, en una trayectoria mano izquierda - mano derecha, la resistencia será menor que en una trayectoria mano izquierda - pie derecho, también depende de la superficie de contacto [15].

TABLA 3. VALORES DE LA IMPEDANCIA TOTAL DEL ORGANISMO HUMANO [16]

Tensión de contacto [V]	Trayectoria mano – pie, piel seca, frecuencia 50-60Hz, superficie de contacto 50 cm ² – 100 cm ²					
	Impedancia y Resistencia total [Ω] que no son sobrepasados por el cuerpo humano					
	5% de las personas		50% de las personas		95% de las personas	
	C.A.	C.C.	C.A.	C.C.	C.A.	C.C.
25	1750	2200	3250	3875	6100	8800
50	1450	1750	2625	2990	4375	5300
75	1250	1510	2200	2470	3500	4000
100	1200	1340	1875	2070	3200	3400
125	1125	1230	1625	1750	2875	3000
220	1000	1000	1350	1350	2125	2125
700	750	750	1100	1100	1550	1550
1000	700	700	1050	1050	1500	1500
Valor asintótico	650	650	750	750	850	850

El valor promedio de la impedancia inicial del cuerpo humano al contacto de 220V se considera del orden de 1000 ohm para una trayectoria de la corriente eléctrica de mano a mano o de mano a pie. Ver Fig. 8.

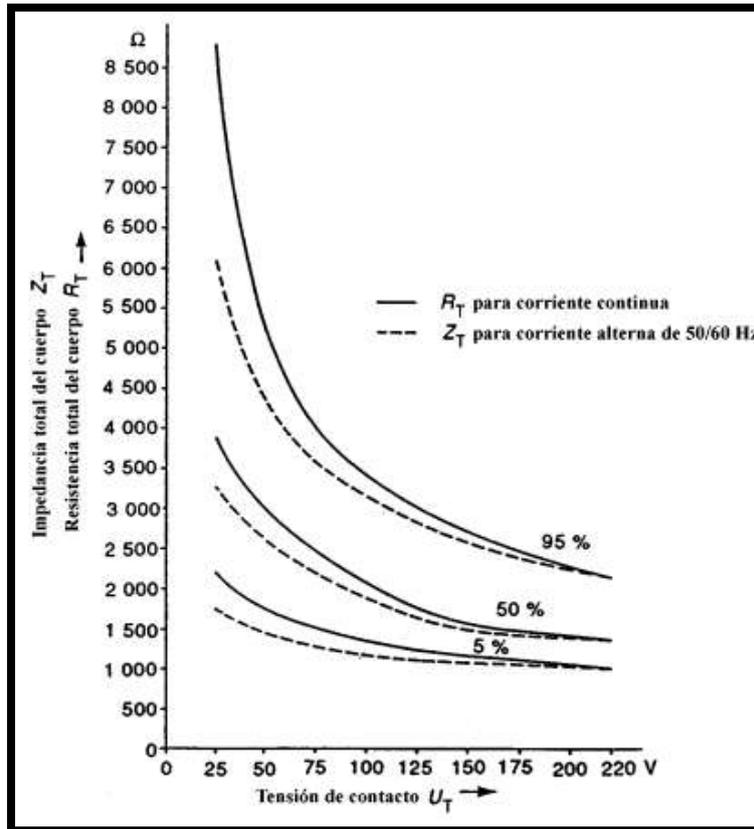


FIGURA 8. GRÁFICA TENSIÓN DE CONTACTO VS. IMPEDANCIA TOTAL DEL CUERPO [14]

2.2.3. Rango de corriente tolerable

Para que exista una circulación de corriente por el organismo es necesario que:

- Exista una diferencia de potencial entre dos puntos del cuerpo humano
- Se produzca un circuito cerrado por donde pueda circular la corriente.
- El elemento que entre en contacto con la tensión con cada uno de los dos puntos del cuerpo humano sea un conductor.

Los efectos de la corriente eléctrica que pasa por las zonas vitales del cuerpo humano dependen: de la duración, magnitud y frecuencia de esta corriente. [14]

TABLA 4. MAGNITUD Y EFECTOS DE LA CORRIENTE SOBRE LAS PERSONAS [14]

Magnitud de Corriente	Efecto
1 mA	Umbral de la percepción.- La persona detecta una leve sensación de hormigueo en sus manos
1 mA – 6 mA	Corrientes sueltas.- La capacidad de una persona para controlar sus músculos y liberarlo, al sostener un objeto energizado no se ve perjudicada.
6 mA – 50 mA	Los músculos se contraen y se dificulta la capacidad para soltar el objeto, para corrientes mayores, la respiración se dificulta; ésta vuelve a su normalidad al momento de interrumpir el paso de corriente.
50 mA – 5000 mA	Se produce la fibrilación ventricular, se da la electrocución (choque fuerte), aparecen marcas visibles sobre la piel y problemas de respiración que pueden causar la muerte.
Superior 5000mA (5A)	Paro cardíaco irreversible, quemaduras, pérdida de la conciencia, marcas visibles sobre la piel.

Estos valores y sus efectos, pueden variar, dependiendo del tiempo que estén expuestos al paso de la corriente eléctrica. Los valores máximos son los siguientes:

- Para tiempos menores de 150 milisegundos: no hay riesgo, siempre que la intensidad corriente no supere los 300 mA.
- Para tiempos mayores de 150 milisegundos: no hay riesgo, siempre que la intensidad de corriente no supere los 30 mA [14].

La corriente eléctrica sigue el camino que le ofrece “la menor resistencia”, por eso las consecuencias de la corriente eléctrica el organismo depende de los órganos que atraviese.

Se debe aclarar que la fibrilación ventricular se produce cuando la trayectoria de la corriente afecta a la zona cardiaca, caso contrario se necesita de valores de corriente mayores para que se origine la fibrilación ventricular [14].

El corazón humano se vuelve más susceptible a la fibrilación ventricular a medida que el tiempo de contacto de la intensidad de corriente se acerca al ritmo del latido del corazón, pero el riesgo disminuye, cuando el tiempo de contacto es de 0,06 a 0,3seg. [14].

Un modelo empleado es la fórmula de Dalziel [IEEE Std. 80-2000] que explica el vínculo entre la fibrilación y la duración de la corriente. Si se refiere a una persona media de unos 50 kg de peso. Ver Ecuación 1.

$$I_{max} \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

Donde I_{max} es el umbral de corriente en amperios, que provoca fibrilación ventricular y t es el tiempo en segundos. La fórmula aplica con tiempos de fallas comprendidos entre aproximadamente 0,03 y 3seg. Si se consideran personas de 70 kg de peso. Ver Ecuación 2.

$$I_{max} \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

Si conocemos la duración t que se está expuesto, es posible obtener la corriente máxima admisible I_{max} que puede circular por el cuerpo. A partir de la resistencia de éste y utilizando la ley de Ohm es viable determinar la tensión máxima de contacto admisible. [17]

2.2.4. Tensión aplicada al cuerpo humano

Tensión estimada de contacto

Se produce cuando la circulación de la corriente I_{Ic} por el electrodo produce una diferencia de potencial V_c (tensión de contacto), entre la estructura conectada a tierra, que está siendo tocada por una persona (con una resistencia de 1000Ω) y el terreno donde se encuentran los pies (1 metro de separación), la corriente I_c atraviesa el cuerpo de la persona en contacto produciendo una potencial V_{ca} hasta llegar a los pies de la persona; cada pie tiene una resistencia de $3ps$, en este caso los pies se encuentran en paralelo por lo cual la resistencia de los pies es $1,5ps$ (siendo ps la resistividad del terreno debajo de los pies). Ver Fig. 9.

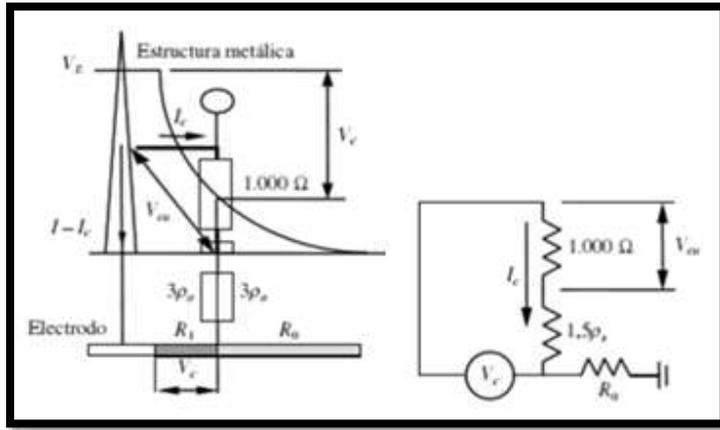


FIGURA 9: TENSIÓN DE CONTACTO Y ESQUEMA ELÉCTRICO [10]

Para calcular la tensión de contacto se utilizaran las siguientes ecuaciones. Ver Ecuación 3 y 4.

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s X \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s X \rho_s) \frac{0.1576}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

E_{touch} : es el voltaje de toque en Voltios

ρ_s : es la resistividad del material "superficial" en " Ω -m

t_s : es la duración de la corriente de choque en segundos

C_s : es el factor de reducción de la capa superficial

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (5)$$

h_s : es el grosor del material de la superficie en m

ρ_s : es la resistividad del material de la superficie en Ω -m

ρ : es la resistividad de la tierra debajo del material de la superficie en Ω -m

C_s : se puede considerar como un factor correctivo para calcular la resistencia efectiva del pie en presencia de un espesor finito de material de superficie. Si no se usa una capa de superficie protectora, entonces $C_s = 1$ y $\rho_s = \rho$

Tensión estimada de paso

El trayecto de una corriente de falla por el electrodo produce una diferencia de potencial en el terreno (tensión de paso V_p), entre los puntos donde se encuentran los pies de una persona a 1m de separación, produciéndose una diferencia de potencial (tensión de contacto aplicada V_{pa}) sin tener contacto con ningún objeto conectado a tierra., como para la tensión de paso ambos pies se encuentran en serie, la resistencia total de contacto con el suelo es $6\rho_s$ (si el suelo tiene la misma resistividad bajo ambos pies, en caso contrario $R_s = 3\rho_s1 + 3\rho_s2$) La corriente que circula por el cuerpo humano se considera 10 veces superior a la que corresponde a la corriente que se produce por la tensión de contacto. Ver Fig 10. Ver Ecuación 6 y 7.

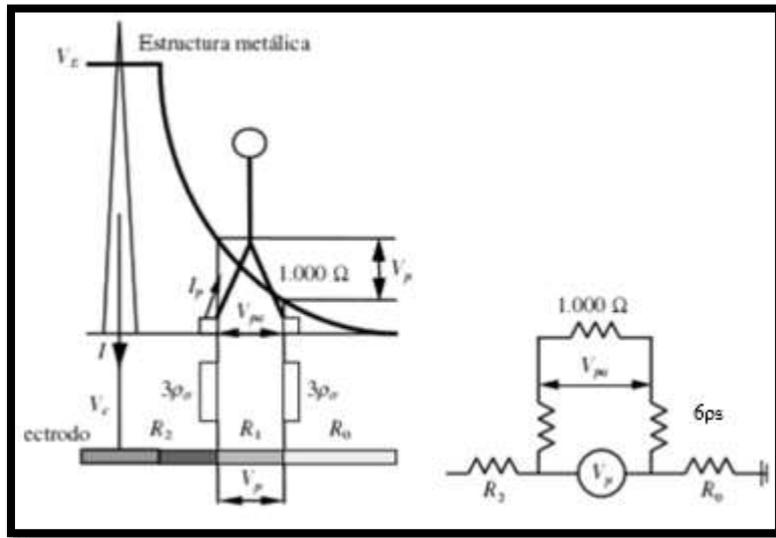


FIGURA 10: TENSIÓN DE PASO Y ESQUEMA ELÉCTRICO [10]

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s X \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s X \rho_s) \frac{0.1576}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

E_{step} : es el voltaje de paso en Voltios

ρ_s : es la resistividad del material "superficial" en " Ω -m

t_s : es la duración de la corriente de choque en segundos

C_s : es el factor de reducción de la capa superficial

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (8)$$

h_s : es el grosor del material de la superficie en m

ρ_s : es la resistividad del material de la superficie en Ω -m

ρ : es la resistividad de la tierra debajo del material de la superficie en Ω -m

C_s : se puede considerar como un factor correctivo para calcular la resistencia efectiva del pie en presencia de un espesor finito de material de superficie. Si no, se usa una capa de superficie protectora, entonces $C_s = 1$ y $\rho_s = \rho$. La capa superficial también es útil para retardar la evaporación de la humedad, y así limitar el secado de las capas superiores durante los períodos de verano. [9]

2.3. Resistividad del Terreno

2.3.1. Método de Wenner

El método de Wenner o de cuatro electrodos, obtiene los datos de resistividad del suelo para capas más profundas sin conducir los pines de prueba a esas capas. No se necesita equipo pesado para realizar la prueba de cuatro pines. Los resultados no se ven muy afectados por la resistencia de los pasadores de prueba o los orificios creados al pasar los pasadores de prueba al suelo.

Las mediciones que se obtienen, nos da como resultado la resistencia del terreno por medio de la Ley de Ohm, mediante la implementación de cuatro electrodos en la tierra en línea recta separados a una distancia “a” y una profundidad “b” donde es igual a 1/20 de la longitud de “a”. [18]

Entre los electrodos de los extremos se aplica una corriente, provocando una diferencia de potencial que es medida por los electrodos del centro. Ver Fig. 11.

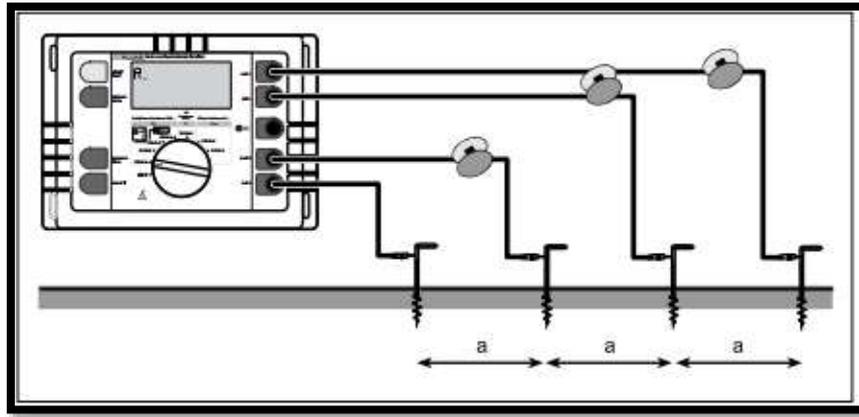


FIGURA 11: MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO MEDIANTE EL METODO DE WENNER [19]

El valor de la resistencia R leída por medio del telurómetro permite calcular la resistividad.

Si la relación A/B es menor a 20 entonces se utilizara la siguiente formula. Ver Ecuación 9.

$$\rho = \frac{4\pi AR}{\frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad (9)$$

ρ = Resistividad aparente del suelo en Ω -m

A = Separación entre electrodos adyacentes en m o cm

B = Profundidad de los electrodos en m o cm

R = Resistencia medida en Ω

Si la longitud B es mucho menor que la longitud A, es decir cuando la relación A/B es igual o mayor a 20, la fórmula es la siguiente:

$$\rho = 2\pi AR \quad (10)$$

2.3.2. Modelo de dos capas mediante el método gráfico

El método gráfico de Sunde, obtenido de la IEEE 80 está basado en el método de las cuatro puntas de Wenner, se utiliza para aproximar un modelo de suelo de dos capas, y propone tomar dos datos medidos de la resistividad del terreno. Ver Fig. 12.

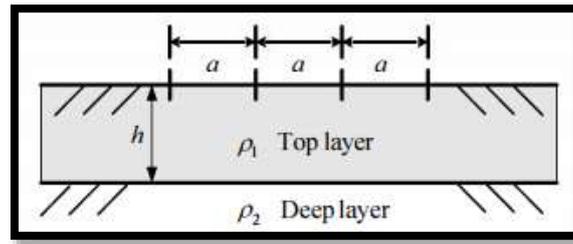


FIGURA 12: MODELO DE SUELO DE DOS CAPAS [20]

- Trazar un gráfico de la resistividad aparente ρ_a en el eje “Y” versus el espaciado de los pines “a” en el eje “X”.
- Estimar ρ_1 y ρ_2 en el gráfico ρ_a vs. a/h . Extendiendo el gráfico de resistividad aparente en ambos extremos para obtener estos valores extremos de resistividad si los datos de campo son insuficientes.
- Determine ρ_2 / ρ_1 y seleccione una curva en el gráfico, que coincide estrechamente, o interpole y dibuje una nueva curva en el gráfico.
- Seleccionar el valor de ρ_a/ρ_1 sobre el eje “Y” dentro de la región pendiente de la curva ρ_2/ρ_1 apropiada.
- Leer el valor correspondiente a/h sobre el eje X.
- Calcular ρ_a multiplicando por el valor de ρ_a/ρ_1 por ρ_1 .
- Leer el espaciamiento de prueba correspondiente de la gráfica de ρ_a vs. a , obtenida mediante el método de Wenner.
- Calcular la profundidad del nivel superior “h” usando la separación de prueba apropiada “a”, siendo: $h = \frac{a}{a/h}$ Ver Fig. 13.

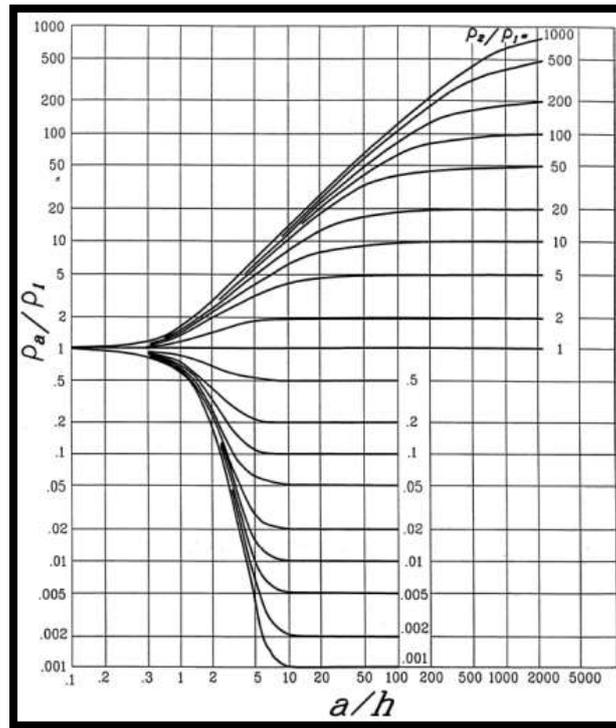


FIGURA 13: GRÁFICO DE SUNDE [20]

2.4. Resistencia del Sistema de Puesta a Tierra

2.4.1. Método Sverak

La resistencia depende principalmente del área que ocupará el sistema de conexión a tierra, que generalmente se conoce en la etapa de diseño inicial.

En el caso de una combinación tipo rejilla en un suelo uniforme, una longitud combinada de conductores horizontales arrojará una diferencia en la resistencia del terreno en relación a una varilla; con el aumento de la longitud de los conductores enterrados la resistencia se acercará a 0 para conductores infinito, pero a partir de determinada cantidad de cobre enterrado, ésta no incidirá en cambios significativos el valor de la resistencia de PT. Por otro lado, un aumento en el área de aterramiento si puede producir un descenso importante de la resistencia de PT. [21]. Ver Ecuación 11.

$$R_s = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (11)$$

L_T = Longitud total de conductores enterrados en m.

ρ = Resistividad del terreno Ω -m.

A = Área ocupada por la malla de tierra m^2 .

h = Profundidad de la malla en m.

La resistencia de cualquier sistema puesta a tierra real, que consta de varios conductores es mayor que la de una placa metálica sólida. [21]

2.4.2. Método Schwarz

Schwarz desarrolló un conjunto de ecuaciones para determinar la resistencia de un SPT en un suelo homogéneo, conformado por una malla horizontal con electrodos verticales (varillas). Para lo cual, divide la resistencia del terreno en tres partes (conductores, varillas y paralelo), con la finalidad de obtener una resistencia promedio. Ver Ecuación 12, 13 y 14.

La resistencia de la malla de tierra con solo conductores está dada por:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) - \frac{k_1 \times L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (12)$$

$$k_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2 \quad (13)$$

$$k_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68 \quad (14)$$

ρ = Resistividad del terreno Ω -m.

a' = es $\sqrt{a \times 2h}$ para conductores enterrados a una profundidad “h” en m

a' = es a para el conductor en la superficie de la tierra.

$2a$ = es el diámetro del conductor en m

L_c = Longitud total de todos los conductores de la malla en m.

A = Área cubierta por los conductores de la malla de tierra m^2

L_x, L_y = Largo, ancho de la malla en m.

La resistencia de las varillas está dada por:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 * L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (15)$$

Donde:

n_R = Número de varillas de tierra.

L_r = Longitud de cada varilla en m.

$2b$ = Diámetro de la varilla en m.

La resistencia paralela o mutua entre la malla y las varillas está dada por:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 * L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (16)$$

Una vez obtenida todas las resistencias (malla, varilla y mutua) encontramos la resistencia de puesta a tierra a través de la siguiente ecuación:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (17)$$

Donde:

R_1 = Resistencia de tierra de los conductores de la malla en Ω .

R_2 = Resistencia de tierra de todas las varillas de tierra en Ω .

R_m = Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla R_1 y el grupo de varillas de tierra R_2 , en Ω . [21]

2.4.3. Método del 62% - 3 polos

Este método requiere el empleo de dos electrodos auxiliares de prueba (tensión y corriente).

Para realizar una correcta medición, la distancia entre electrodo de corriente (H) y el punto de la malla de tierra (E), debe ser mínimo 3 veces la diagonal mayor de la malla. Ver Fig. 14.

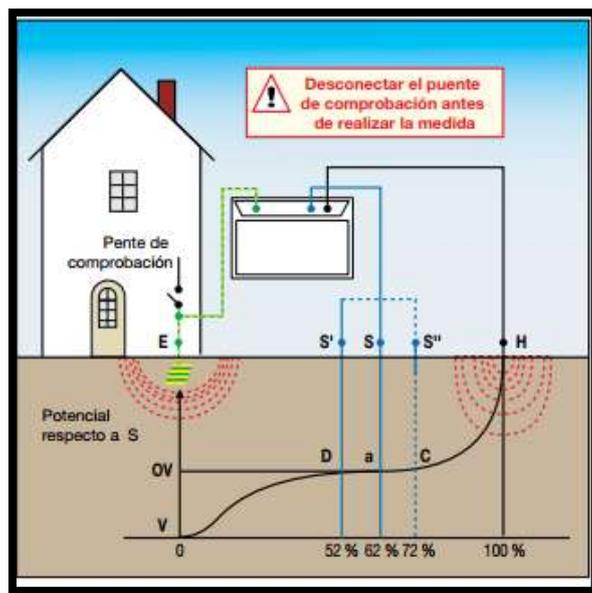


FIGURA 14: CURVA DE LA RESISTENCIA DEL TERRENO APLICANDO EL METODO DEL 62% [4]

Para medir la resistencia de SPT, el equipo se debe operar de la siguiente manera:

- Colocar el borne C1 en el punto (E) del SPT
- Corroborar que los bornes C2 y P2 se encuentren bien conectados.
- Colocar el electrodo auxiliar de corriente H, a una distancia 3 veces la diagonal mayor de la malla de tierra, con relación a la toma de tierra E.
- Colocar el electrodo de potencial S al 62% de la distancia entre E y H con referencia a E de manera alineada.
- Colocar el selector del teluometro en metodo de medición indicado (4 Polos)
- Pulsar el boton “STAR TEST”. Ver Fig. 15.

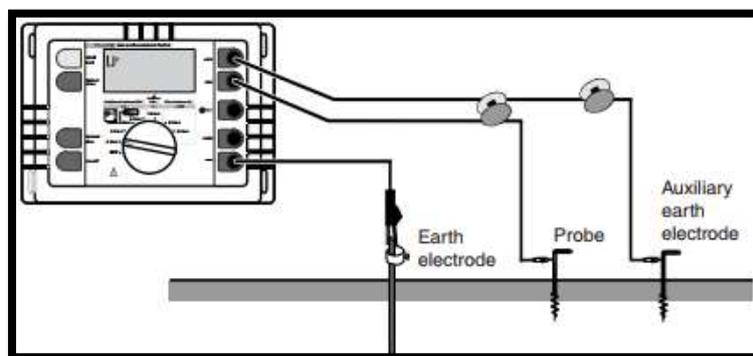


FIGURA 15: MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA MEDIANTE EL METODO DE 3 POLO [19]

En la práctica, la distancia entre E y H es difícil de obtener, ya sea por las limitaciones del terreno, topología u objetos conductores que se hallen cerca del terreno; por tales razones la distancia puede disminuir o aumentar de acuerdo al criterio de la persona, con la finalidad de que el electrodo de potencial no presente interferencia. [4]

2.4.4. Método del 62% - 4 polos

El método de 4 polos maneja el mismo principio que el de 3 polos, añadiendo una conexión extra entre la tierra a medir E y el instrumento de medida, permitiendo una toma de datos hasta 10 veces más eficiente, librándose de la resistencia de los cables de medida y estructuras metálicas que puedan afectar la medición. Es idóneo para medidas de resistencia de tierra muy débiles. [4]

Para medir la resistencia de SPT, el equipo se debe operar de la siguiente manera:

- Cortocircuitar los bornes C1 y P1, u/o colocarnos en el mismo punto (E) a medir la SPT
- Corroborar que los bornes C2 y P2 no estén en cortocircuito y se encuentren bien conectados.
- Colocar el electrodo auxiliar de corriente H, a una distancia 3 veces la diagonal mayor de la malla de tierra, con relación a la toma de tierra E.
- Colocar el electrodo de potencial S al 62% de la distancia entre E y H con referencia a E de manera alineada.
- Colocar el selector del teluometro en metodo de medición indicado (4 Polos)
- Pulsar el boton “STAR TEST”. Ver Fig. 16.

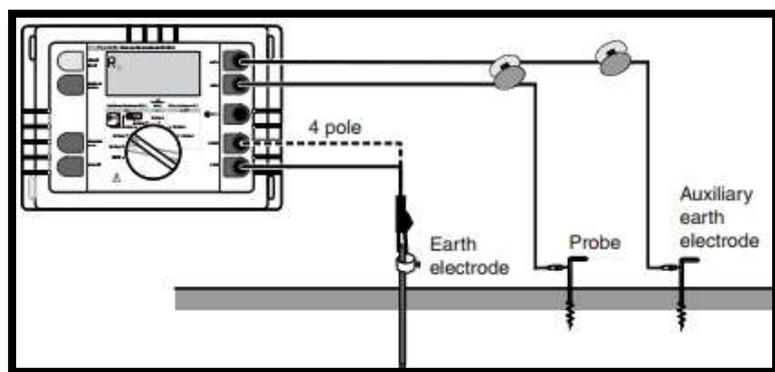


FIGURA 16: MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA MEDIANTE EL METODO DE 4 POLO [19]

La ventaja de los métodos de 3 y 4 polos, radica en que se llevan a cabo en una instalación sin tensión y permite así obtener una medida de tierra; pero si el sistema se encuentra conectado al servicio, éste debe desconectarse, dado que al efectuar la medición de resistencia, esta pueda ser elevada (aislante) o baja (conductor).

Para ambos casos, si el valor de la prueba es mucho más alto de lo esperado, los cables de prueba pueden haberse conectado a un conductor que no estaba conectado adecuadamente a la red de tierra. Si se sospecha una mala conexión, las mediciones se pueden repetir en otros puntos de la cuadrícula de tierra. Si los valores originales y repetidos varían drásticamente, entonces la rejilla de tierra puede dañarse y una prueba de integridad de tierra de la rejilla de tierra puede ser apropiada. Alternativamente, se pueden realizar pruebas de continuidad antes de realizar la prueba de caída de potencial. [22]

TABLA 5. VALORES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [23]

Aplicación	Valor máximo de puesta a tierra [Ω]
Estructura de líneas de transmisión	20
Subestaciones de alta y extra alta tensión >115KV	1
Subestaciones de potencia en media tensión	4
Subestaciones de media tensión uso exterior	10
Subestaciones de media tensión uso interior	10
Protección contra rayos	4
Neutro acometida en baja tensión	25
Descargas electrostáticas	25
Equipos electrónicos sensibles	5

2.5. Parámetros de un Sistema de Puesta a Tierra

2.5.1. Elevación del potencial de la malla (GPR)

Cuando una corriente circula en la malla de tierra, ocurre una elevación de potencial de la malla con respecto a un punto remoto. Esta diferencia se evalúa como el producto de la corriente que fluye por la malla y la resistencia de puesta a tierra de la misma, así como se representa en la ecuación 18.

$$V (GPR) = IG \cdot Rg \quad (18)$$

Donde

IG = Máxima corriente inyectada a la malla [A]

Rg = Resistencia de puesta a tierra de la malla [Ω]

La elevación de potencial de la malla o GPR no debe exceder a los valores de tensión de toque y paso. [21]

2.5.2. Corriente máxima a disipar por la malla (IG)

El valor máximo considerado en diseño para una corriente de falla a tierra, que fluye por medio de la malla de la subestación, hasta la tierra circundante está dado por:

$$IG = IF * Df * Sf * Cp \quad (19)$$

Dónde:

IF= $3I_0$ Corriente simétrica de falla a tierra en (A)

Df= Factor de decremento.

Sf = Factor de división de corriente.

Cp= Factor de crecimiento futuro de la subestación, considera el incremento futuro de la corriente de malla. [21]

2.5.3. Corriente simétrica de falla a tierra (IF)

Para la realización práctica se recomienda hallar los siguientes tipos de fallas.

- Falla línea-línea, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación.

$$(IF)_{L-L-T} = 3I_0 = \frac{3 * E * Z_2}{Z_1(Z_0 + Z_2) + Z_2 * Z_0} \quad (20)$$

- Falla línea-tierra, despreciando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación.

$$(IF)_{L-T} = 3I_0 = \frac{3 * E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (21)$$

I_0 = Valor RMS de secuencia cero de la corriente simétrica de falla en (A)

E= Tensión fase-neutro RMS en (V)

Z_1 = Impedancia equivalente de secuencia (+) del sistema en el punto de falla

Z_2 = Impedancia equivalente de secuencia (-) del sistema en el punto de falla

Z_0 = Impedancia equivalente de secuencia (0) del sistema en el punto de falla. [21]

2.5.4. Factor de crecimiento (Cp):

Es un valor representativo en caso que el sistema pueda acontecer cambios a futuro o como en el caso que se mantenga igual a su diseño original.

Si la malla de puesta a tierra se realiza tomando en consideración la capacidad total de la subestación, sin consideran aumentos futuros de carga, ni de alimentadores, entonces $C_p = 1$, caso contrario $C_p = 1.5$ en el caso que se incremente un 50%. [21]

2.5.5. Factor de decremento (Df o X/R)

Depende de la duración de la falla y el cociente entre el valor de la reactancia (X) y resistencia (R) en el punto de falla. Las componentes X y R pertenecen a la impedancia de falla del sistema subtransiente.

TABLA 6. VALORES DE DECREMENTO [17]

Duración de la falla, t_f		Factor de Decremento, D_f			
Segundos	Ciclo a 60 Hz	X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R = 40
0,00833	0,5	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,1	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0,2	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0,3	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0,4	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0,5	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1	60	1,013	1,026	1,039	1,052

Generalmente un factor de decremento 1 puede ser usado para duraciones de fallas de 0,5 seg o más, como también cuando la relación X/R sea menor a 5. [17]

2.5.6. Factor de división de corriente (Sf)

Es un valor porcentual que precisa cuánto de la corriente total de falla circula entre la malla y la tierra, y cuánto a través de los cables neutros o tierra, es decir, el porcentaje de corriente que disipara la malla y el residuo retornará al sistema hasta que se despeje. [18]

2.5.7. Duración de la falla (tf), duración del choque (ts) y duración de la corriente (tc)

La duración de la falla, del choque y corriente generalmente se asumen iguales, a menos que la duración de la falla sea la suma de choques sucesivos, como los producidos por los recierres automáticos de los reclosers, mientras que la duración de la corriente es el tiempo que la corriente se encuentra circundando en el sistema hasta disiparse completamente en el terreno.

La selección de tf refleja los tiempos de despeje rápidos para subestaciones de transmisión y tiempos de despejes lentos para subestaciones de distribución e industriales.

La selección de tf, ts y tc sus valores típicos están en el rango de 0.25 s a 1 s.

tc: tiempo que fluye la corriente (s).

tf: tiempo de la duración de la falla (s).

ts: tiempo de duración del choque eléctrico (s). [21]

2.5.8. Potencial de la malla de tierra

➤ Potencial de toque máximo

El valor de la tensión de toque se obtiene de la siguiente forma:

$$E_m = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times I_G}{L_M} \quad (22)$$

K_m es el factor de Sverak y se lo obtiene mediante la siguiente forma:

$$K_m = \frac{1}{2 \times \pi} \times \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \times h \times d} + \frac{(D+2 \times h)^2}{8 \times D \times d} - \frac{h}{4 \times d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \times \ln \left[\frac{8}{\pi (2 \times n - 1)} \right] \right] \quad (23)$$

Donde:

D: es la separación entre los conductores que conforman la malla.

h: profundidad que se encuentra enterrada la malla.

d: diámetro del conductor de la malla.

En caso que la malla de puesta a tierra posea varillas dispuestas en todo el perímetro o esquinas, el valor del parámetro K_{ii} es:

$$K_{ii} = 1 \quad (24)$$

De lo contrario:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times n)^{2/n}} \quad (25)$$

K_h es un factor de corrección que tiene en cuenta los efectos de la profundidad de la malla:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad ; \quad h_o = 1m \quad (26)$$

“n” es el número de conductores que conforman la malla:

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (27)$$

$$n_a = \frac{2 \times L_c}{L_p} \quad (28)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \times \sqrt{A}}} \quad (29)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{0,7 \times A / (L_x + L_y)} \quad (30)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (31)$$

Para mallas cuadradas: $n = n_a$ y $n_b = n_c = n_d = 1$

Para mallas rectangulares: $n = n_a \times n_b$ y $n_c = n_d = 1$

Para mallas en forma de L: $n = n_a \times n_b \times n_c$ y $n_d = 1$

L_c : Longitud total de los conductores de la malla horizontal en m.

L_p : Longitud del perímetro de la malla en m.

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 cualesquiera de la malla, en m.

K_i es un factor de irregularidad que pueda presentar la malla:

$$K_i = 0.664 + 0.148 \times n \quad (32)$$

Para mallas sin varillas o que posean pocas, distribuidas de manera arbitraria dentro de la malla, la longitud efectiva enterrada L_M es:

$$L_M = L_C + L_R \quad (33)$$

L_R : Longitud total de todas las varillas.

$$L_R = n_r \times L_r \quad (34)$$

n_r : Número de varillas.

L_r : Longitud de cada varilla.

Para mallas con muchas varillas de tierra en las esquinas, así como a lo largo del perímetro, la longitud efectiva enterrada L_M es:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (35)$$

➤ Potencial de paso máximo

El valor de la tensión de paso de la malla se obtiene de la siguiente forma:

$$E_s = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_G}{L_S} \quad (36)$$

Para mallas con o sin varillas de tierra, la longitud efectiva del conductor enterrado L_S es:

$$L_S = 0.75 \times L_C + 0.85 \times L_R \quad (37)$$

El valor de K_S se calcula de la siguiente forma:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times h} + \frac{1}{D \times h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (38)$$

Esta ecuación es válida para profundidades de enterramiento de $0.25\text{m} < h < 2.5\text{m}$. [21]

CAPÍTULO 3

3. INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTO

3.1. Tanque Electrolytíco

El tanque electrolytíco es la configuración de diversos elementos, que interactúan en un proceso electroquímico denominado electrolysis; en donde se sitúa un electrodo positivo que funciona como ánodo, recibiendo electrones; y un electrodo negativo como cátodo, liberando electrones; mientras una corriente fluye a través del electrolyto. Ver Fig. 17.

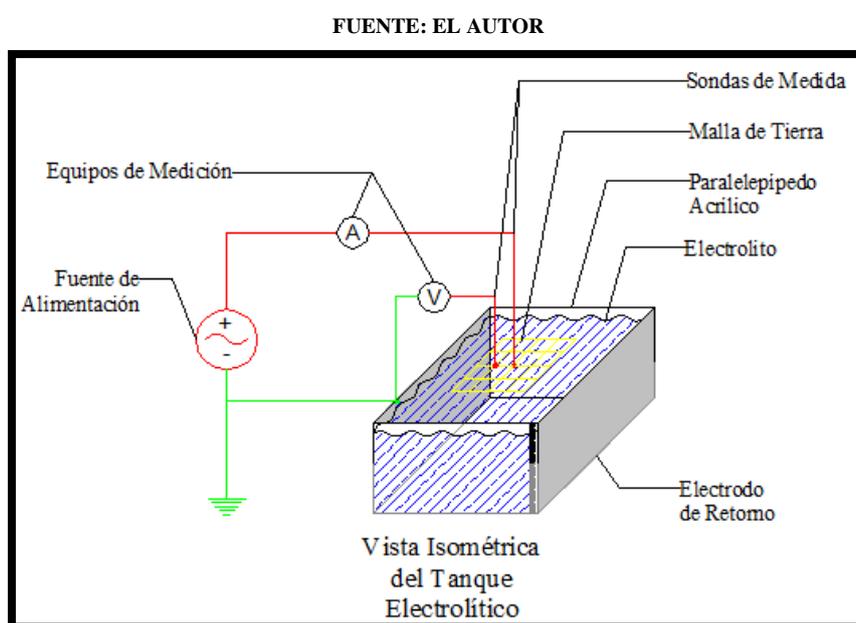


FIGURA 17: TANQUE ELECTROLITICO Y SUS ELEMENTOS

A continuación describiremos los elementos que componen el tanque electrolytíco y su función.

3.1.1. Paralelepípedo: Es una figura geométrica, construida por rectángulos unidos de forma perpendicular, está fabricado con plancha de acrílico de 3mm de espesor.

En la parte frontal del lado derecho de manera vertical posee una cinta métrica, para regular el nivel de agua que deseamos propagar en el recipiente.

Se fabricaron dos cubas de fibra, con la consigna de efectuar un terreno de uno y dos estratos. Ver Fig. 18

FUENTE: EL AUTOR

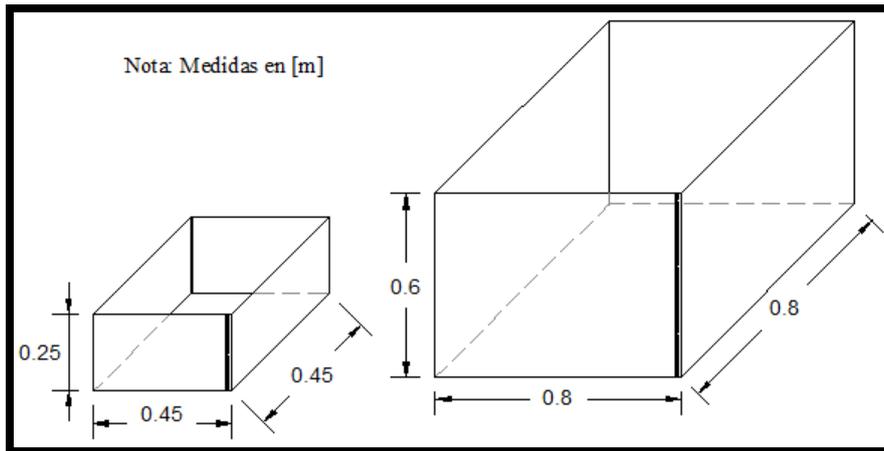


FIGURA 18: RECIPIENTES ACRILICOS

3.1.2. Electrodo de retorno: Está constituido por una lámina de aluminio, adherida a los lados internos y base del tanque, conectado al neutro o negativo de la fuente de alimentación, que desprenderá electrones al estar en contacto con el electrolito, produciéndose una reducción, observándose la presencia de hidrogeno y pérdida de las propiedades del material. Ver Fig. 19.

FUENTE: EL AUTOR

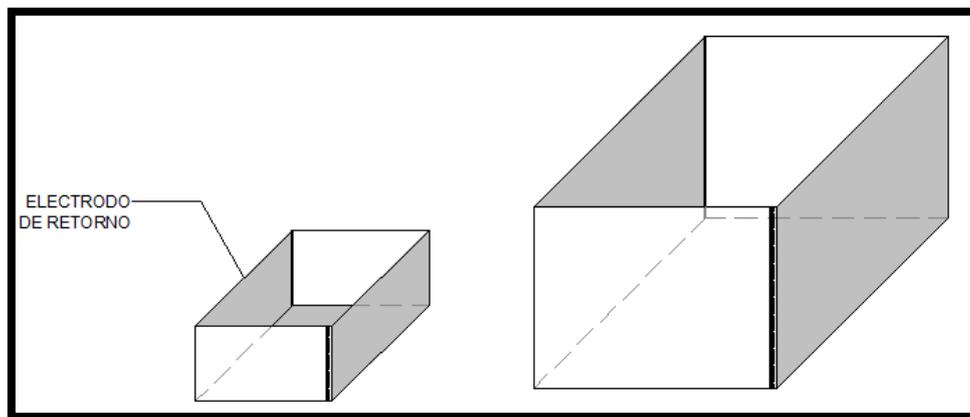


FIGURA 19: COLOCACIÓN DE LAMINA DE RETORNO

3.1.3. Sondas de medida: Está formada por dos electrodos proveniente del multímetro, una roja (positivo) y negra (negativa). Son cables equipados, en un extremo, con un conector que encaja en el multímetro y, en el otro extremo, la punta electrodo, con un agarre protector que resguarda al operador del riesgo de electrocución. Ver Fig. 20.

FUENTE: EL AUTOR



FIGURA 20: SONDAS DE MEDIDAS

3.1.4. Electrolito: El electrolito es una sustancia que al diluirse en el agua, crea una solución conductora que permite el flujo de la corriente eléctrica.

El cloruro de sodio es el electrolito más conocido debido que posee en grandes cantidades de soluciones acuosas, que contiene una alta conductividad eléctrica. [24] Debido que el elemento conductor a utilizarse es agua natural (dulce), posee menor cantidades de sales minerales, es por eso que mediante la aplicación de cloruro de sodio (sal común) se logra alcanzar una alta conductividad, disminuyendo su resistividad. Ver Fig. 21.

FUENTE: EL AUTOR

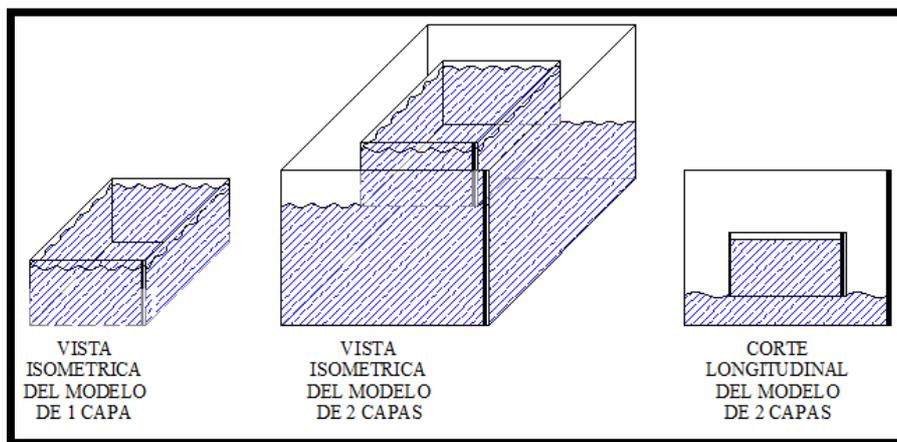


FIGURA 21: IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROLITO EN CONFIGURACION DE 1 Y 2 ESTRATOS DE TERRENO

3.1.5. Fuente de alimentación: El suministro de energía para el tanque de electrolítico, se realizó por medio de una fuente variable trifásica de 40Amp – 220/127V – 50/60Hz. Ver Fig. 22.

FUENTE: EL AUTOR



FIGURA 22: FUENTE VARIABLE TRIFASICA

3.1.6. Instrumentos de Medida: La recolección de datos tales como: intensidad de corriente, voltaje en diferentes puntos de la malla, se dieron por medio de una pinza amperimétrica FLUKE 373. Ver Fig. 23.

Las características completas del equipo se pueden observar en el Anexo 1.

FUENTE: EL AUTOR



FIGURA 23: PINZA AMPERIMETRICA FLUKE 373

Mientras que para las pruebas de resistencia de SPT de la malla, en campo, se utilizó un comprobador de puesta a tierra 1625-2 GEO de Fluke. Ver Fig. 24. (Ver Anexo 2) Las características completas del equipo se pueden observar en el Anexo 2.

FUENTE: EL AUTOR



FIGURA 24: COMPROBADOR DE PUESTA A TIERRA 1625-2 GEO

3.1.7. Mallas de Puesta a Tierra

Los tipos de mallas a tierra analizados en el proyecto se muestran a continuación:

- Triangular
- Cuadrada
- Circular
- Cuadrada – circular
- Rejilla

3.2. Construcción del Tanque Electrolítico

3.2.1. Elección y corte del acrílico

Las planchas de acrílico, generalmente son de 2,40m x 1,20m y 1,20m x 0,60m, en espesores desde 2mm hasta 5mm, la tonalidad de la plancha puede ser transparente o color.

Basados en estas generalidades, las especificaciones del acrílico son: tonalidad transparente, 3mm de espesor y de 2,40m x 1,20m. Ver Fig. 25.

FUENTE: EL AUTOR

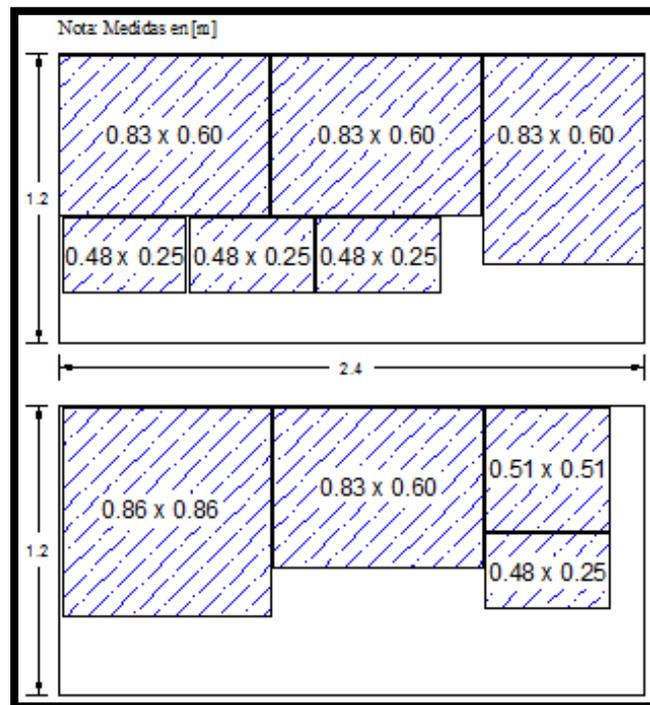


FIGURA 25: DIMENSIONES DE CORTES EN PLANCHA ACRILICA

La medida de la plancha acrílica, fue escogida de acuerdo a las dimensiones de las paredes y base del tanque.

3.2.2. Ensamblaje

Luego de realizar los respectivos cortes, acorde a las medidas estipuladas, se procede al armado de los tanques, los cuales serán pegados con pegamento para acrílico en los vértices, para lograr que el pegamento se asimile correctamente con el acrílico, se coloca cinta adhesiva en todas las juntas externas del tanque.

Una vez que se haya secado las uniones en los vértices internos, se procede a reforzarlos con un filamento acrílico de 2mm x 2mm, con el propósito de evitar que ocurra algún derrame al momento de llenar el tanque.

Las medidas internas de los tanques son de 0.45m x 0.45m x 0.25m y 0.80m x 0.80m x 0.60m.

3.2.3. Instalación de electrodo de retorno

El electrodo de retorno es una lámina de aluminio, instalada en la base y paredes del tanque, se conecta con al neutro de la fuente para cerrar el circuito que se produce en el tanque.

Las láminas de aluminio son colocadas con cinta adhesiva, es necesario que esté correctamente adherida a las paredes, sobre todo en los vértices, debido que suele quedar espacios de aire entre la pared y el aluminio, y al verter agua se producen bolsas de aire, que pueden entrar en contacto al momento que se instale la malla de tierra. Ver Fig. 26.

FUENTE: EL AUTOR



FIGURA 26: INSTALACIÓN DE ELECTRODO DE RETORNO

3.3. Construcción de mallas de puesta a tierra

Las mallas de tierra para el tanque electrolítico, son de conductor de cobre desnudo calibre #10, las medidas de las configuraciones triangular, cuadrada, cuadrada-circular y rejilla son de 0.20m x 0.20m y la circular 0.10m de radio.

Las uniones son realizadas con cautín y estaño. Ver Fig. 27.

FUENTE: EL AUTOR

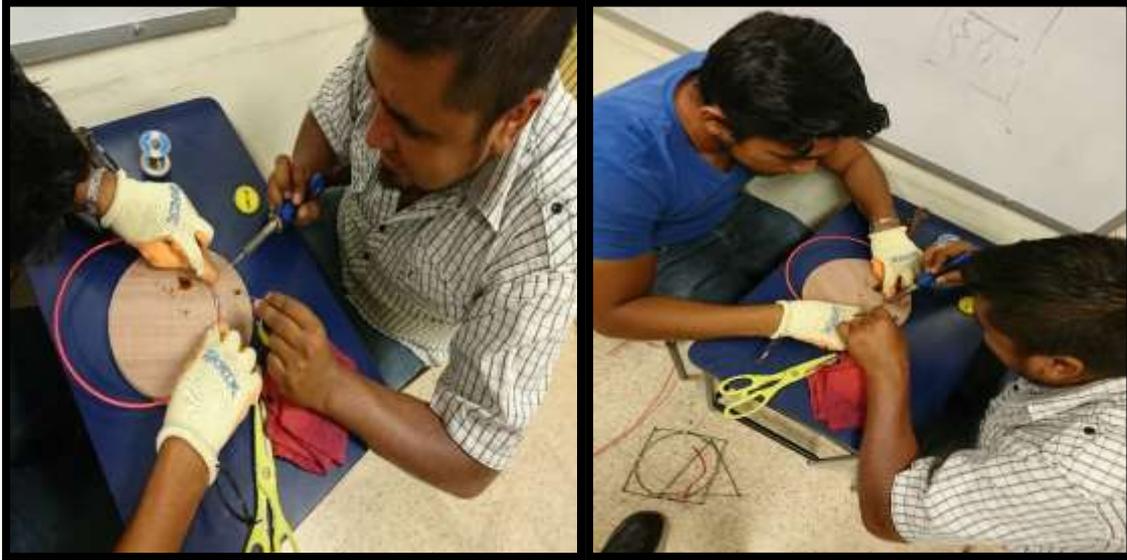


FIGURA 27: UNION DE MALLA CIRCULAR CON CAUTIN Y ESTAÑO

Las mallas usadas en el campo, son de conductor de cobre desnudo #2/0, las medidas de diseño son de 2m x 2m, es decir, 10 veces más las medidas usadas en el tanque.

El tipo de unión para estos conductores es con grilletes, por la facilidad que nos ofrece para ajustar y desajustar las intersecciones de los conductores, modificando la malla de acuerdo a lo planteado, además que nos permite reutilizar el material abaratando costos en el proyecto.

3.4. Aplicación del electrólito

El electrolito empleado para las pruebas de sistema de puesta a tierra, es agua dulce, que posee bajo contenido de sales minerales. En este proceso al suministrar energía, el proceso de electrolisis ante el ojo humano no es muy perceptible, pero se puede apreciar por medio de un multímetro al medir la intensidad de corriente; de acuerdo a la configuración de malla instalada la medición varía, debido que a mayor cantidad de conductor la resistencia del agua disminuye. Ver Fig. 28.

FUENTE: EL AUTOR



FIGURA 28: PRUEBAS DE PUESTA A TIERRA SIN ELECTROLITO

La aplicación adicional del electrolito (cloruro de sodio) nos permite visualizar como actúa la malla de tierra y el terreno ante la presencia de sales minerales.

Mientras más aditivo sea agregado al tanque y de acuerdo a la configuración que se predisponga a analizar, la reacción electroquímica será visible en el caso de un modelo de 1 capa, debido que ha menor resistencia y ante la presencia de un voltaje suministrado, la corriente que circula en el sistema aumenta (ley de ohm). Ver Fig. 29.

FUENTE: EL AUTOR



FIGURA 29: REACCIÓN QUÍMICA DE MALLA CUADRADA Y REJILLA CON ELECTROLITO

En un modelo de 2 capas, el aditivo no es de gran aporte, ya que la resistencia aumenta por la configuración del terreno, es decir, tenemos dos resistencias en serie, y ésta última resistencia (tanque mayor) posee un mayor área que no puede ser tratada. Por lo tanto en estos casos, lo recomendado es aumentar la profundidad de la malla.

La finalidad de dar mantenimiento a un SPT, aparte de revisar las conexiones, es suministrar aditivo de mejoramiento del terreno, dada las presencias elevadas de resistencia, por condiciones que han afectado al terreno con el transcurso del tiempo.

3.5. ETAP

El diseño de la malla de tierra y el análisis de la forma de onda de los voltajes de toque y paso que se producen en ella ante una falla de aislamiento, se realizará mediante el programa ETAP, con la finalidad de comparar los datos recolectados a través el método práctico realizado en el tanque electrolítico.

Comenzamos creando un nuevo documento, luego escogemos el lugar donde deseamos guardar la carpeta que contendrá el archivo y procedemos a asignarle un nombre a la carpeta y paso siguiente nombre al archivo que tendrá la extensión .OTI.

El programa nos permite escoger la Norma IEC o ANSI/IEEE, la frecuencia del sistema y las unidades del sistema (métrico o inglés); la configuración de estos parámetros se encuentran: Barra de herramientas > Project > Standars.

Para nuestro análisis emplearemos:

- Norma ANSI/IEEE.- Nos permite simplificar el cálculo, además que es la adecuada para trabajar con impedancias.
- Frecuencia 60Hz.- En Ecuador la frecuencia que se maneja es de 60Hz, es decir sesenta ciclos de ondas en un 1 segundo; si este parámetro no es configurado las gráficas tendrían una diferente forma.
- Sistema métrico.- Las longitudes de la malla y terreno están dadas en metro, con la flexibilidad de escalar los valores. Ver Fig. 30.

FUENTE: ETAP

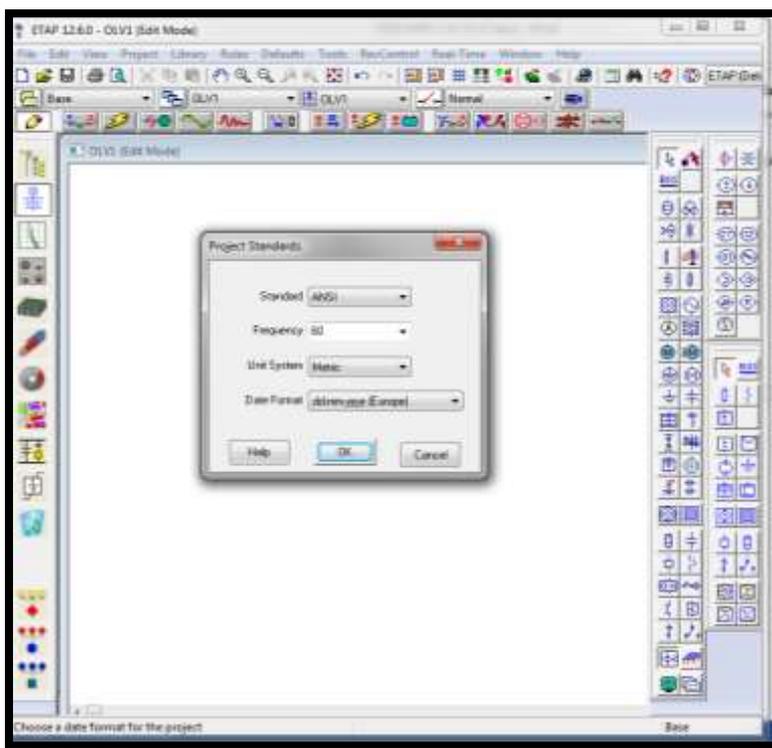


FIGURA 30: PARAMETROS ESTANDAR

En la paleta de herramientas del lado derecha encontramos el icono de una malla de tierra, seleccionamos y arrastramos a la ventana de trabajo, procedemos a dar doble click sobre la malla, apareciendo el método de estudio que deseamos realizar:

Método IEEE–80 (ETAP):

- Permite estimar el costo de la instalación.
- Realiza estudios de cortocircuitos y flujo de carga, a la vez modificaciones, autenticidad y confirmar el diseño de la instalación
- Visualiza gráficas 3D de tensión de toque, tensión de paso y GPR, y validar el cumplimiento de los límites.
- Las configuraciones irregulares de mallas de tierra están restringidas, solo se puede acceder a las establecidas por la IEEE-80.
- Los resultados de Rg y GPR son inestables debido a los pocos electrodos que presentan sus configuraciones.

Método de Elementos Finitos MEF (ETAP):

- Permite estimar el costo de la instalación.
- Realiza estudios de cortocircuitos y flujo de carga, a la vez modificaciones, autenticidad y confirmar el diseño de la instalación
- Visualiza gráficas 3D de tensión de toque, tensión de paso y GPR, y validar el cumplimiento de los límites.
- Permite la realización y estudio de configuraciones irregulares de un sistema de puesta a tierra.

Debido que vamos a crear diferentes mallas de tierras, seleccionamos Finite Element Method (FEM); no podemos escoger el método IEEE dado que las mallas de tierra vienen por defecto, sin opción a realizar cambios en su diseño. Ver Fig. 31.

FUENTE: ETAP

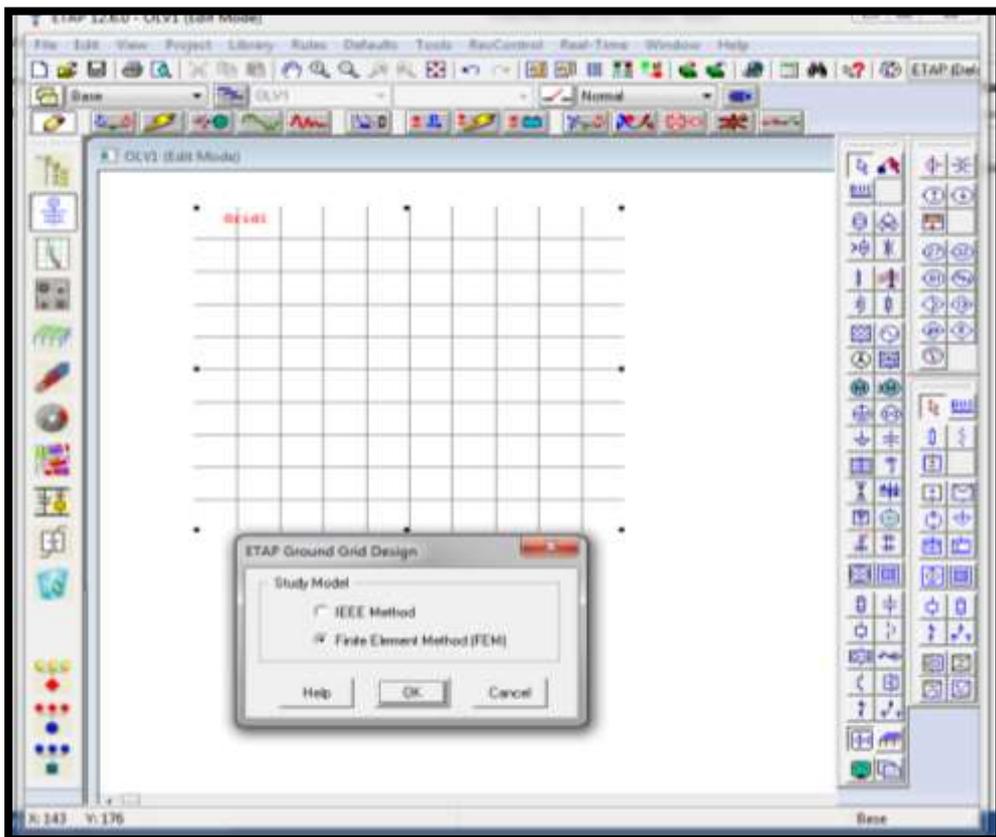


FIGURA 31: METODO DE CÁLCULO PARA EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Aparecerá una nueva ventana, en la parte superior izquierda se mostrará la profundidad de la malla, mientras que del lado derecho visualizamos un recuadro que representa el terreno de la malla de tierra, podemos obtener un terreno homogéneo o de dos estratos,

de acuerdo a los valores de resistividad que ingresemos. Estos colores representan lo siguiente:

- Gris.- Es la superficie de terreno, una capa delgada que va encima del terreno terminado y tiene un espesor de 0,08 – 0,20m, es implementada con la finalidad de aislar el terreno en caso que se produzca una falla ofreciendo seguridad a las personas ante un contacto indirecto, es decir, aumentar la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación. Esta delgada capa puede ser de: granito triturado, granito limpio, piedra caliza limpia, grava y roca triturada.
- Turquesa.- Es la primera capa del terreno, generalmente la malla de tierra se instala a una profundidad de 0,80m, dependiendo de los datos obtenidos la profundidad puede aumentar con la finalidad de reducir la resistencia del terreno. Esta capa puede ser: suelo orgánico húmedo, suelo húmedo, suelo seco y base (piedra 3/4).
- Beige.- Es la segunda capa del terreno, suele presentarse ocasionalmente, ya sea porque existen proyectos que necesitan ser mejorados (0,5 – 3m) debido que son muy fangosos o rocosos, o porque el terreno posee estas características de acuerdo a su localización. Esta capa puede ser: suelo orgánico húmedo, suelo húmedo, suelo seco y base (piedra 3/4).

-

En la parte inferior diseñaremos nuestra malla de tierra; escogemos la opción conductor que se encuentra debajo del puntero, colocándolo en el área de trabajo, damos doble click sobre el conductor, la nueva ventana nos posibilita crear más conductores a través del ingreso de coordenadas con el propósito de que el arreglo de la malla sea exacta, también escogemos el tipo de conductor (comercial, recocido, alambra de acero revestido con cobre), el calibre, con o sin aislamiento. Ver Fig. 32.

FUENTE: ETAP

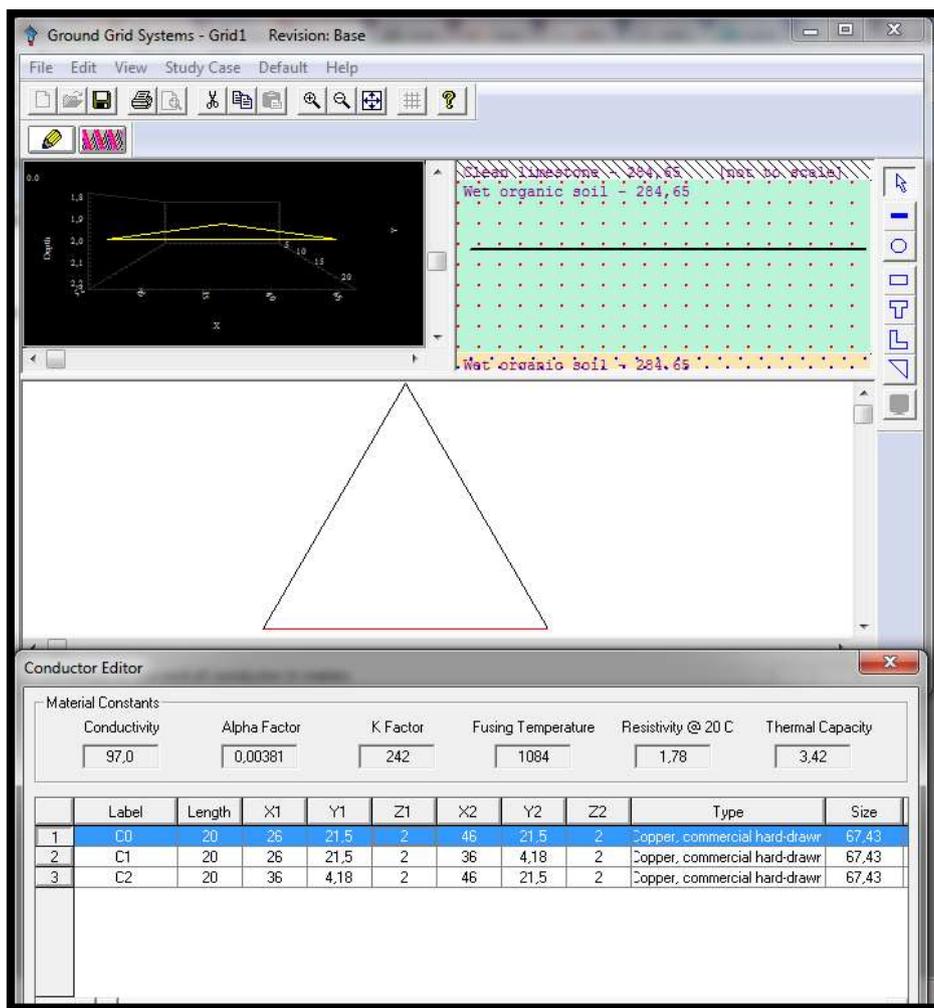


FIGURA 32: COORDENADAS PARA EL DISEÑO DE LA MALLA DE TIERRA

Después de terminar el diseño de la malla de tierra, procedemos a dar click en el icono  que se encuentra junto al lápiz, visualizaremos una nueva barra junto a los iconos mencionados, encontrando el icono Study, que nos permite ingresar los parámetros esenciales para la obtención de los resultados. Ver Fig. 33.

FIGURA 33: PARAMETROS DEL CASO DE ESTUDIO DE LA MALLA

- tc: tiempo que fluye la corriente (s).
- tf: tiempo de la duración de la falla (s).
- ts: tiempo de duración del choque eléctrico (s).
- Ifg: es la magnitud de la corriente de falla en Amperios.
- X/R: relación de la reactancia y resistencia que se produce en punto de falla.
- Sf: porcentaje de corriente que disipara la malla.
- Cp: factor de crecimiento de la malla.
- °C: es la temperatura del ambiente a la cual se encuentra sometida la malla, siendo 40°C la temperatura estándar.

Una vez ingresados los parámetros, aceptamos los cambios, dirigimos a la ventana principal; del lado derecho se encuentra una paleta de herramientas, donde damos click al primer icono Ground Grid Calc nos dará los resultados: voltaje de paso, toque, resistencia del terreno y elevación de potencial de tierra (GPR). Ver Fig. 34.

FUENTE: ETAP

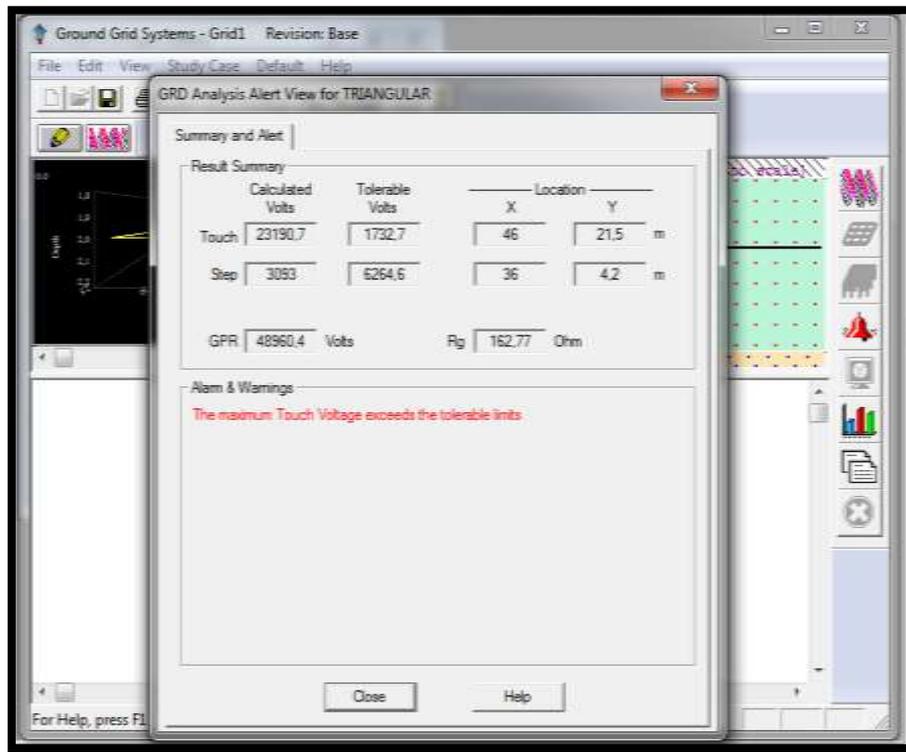


FIGURA 34: VALORES DE TOQUE Y PASO ADMISIBLES.

En la sección de alarmas y advertencia, aparecerán los avisos en caso que la malla de tierra no cumpla las condiciones de seguridad, establecidas por la IEEE-80.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADO

En este capítulo se desarrollará y comparará los datos de los modelos de uno y dos estratos del terreno, con y sin electrolito, realizadas en el tanque electrolítico, ETAP y pruebas de campo.

4.1. Valores del Sistema de Puesta a Tierra del modelado de una capa sin electrolito

El tanque electrolítico nos permite desarrollar pruebas, entre mallas de tierra y el terreno circundante con la finalidad de analizar su comportamiento ante las diferentes configuraciones que presente el diseñador.

El terreno es simulado con agua, dicho terreno presenta una resistividad y por ende una resistencia, que presentará cambios frente al tipo de malla y profundidad que se instale.

El tanque posee una altura de 25cm, se vierte agua hasta 22cm, colocando la malla a 1cm por debajo del nivel de agua. Ver Fig. 35

FUENTE: EL AUTOR

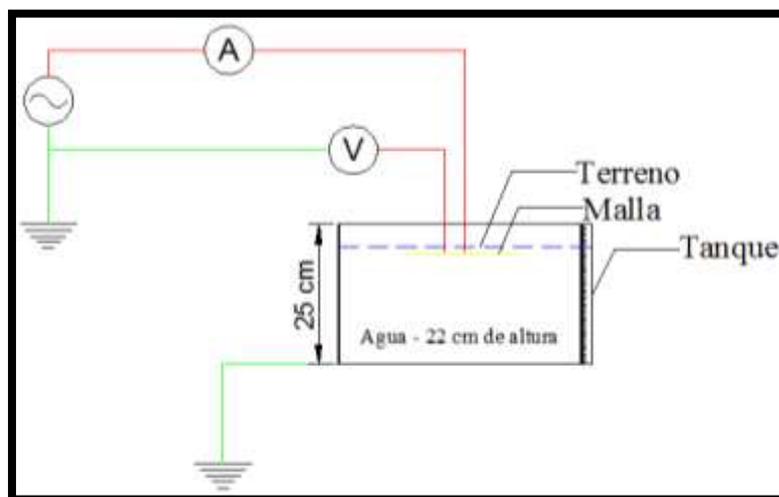


FIGURA 35: ARREGLO DEL MODELADO DE UNA CAPA

TABLA 7. VALORES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA – MODELADO DE UNA CAPA SIN MEJORAMIENTO DEL TERRENO

Configuración de Malla	Voltaje (kV)	Corriente de falla (kA)	Resistencia (Ω)	Resistividad (Ω -m)
				IEEE 80-2013
Triangular	12,45	0,065	191,54	4375,74
Cuadrada	12,41	0,08	155,13	4939,38
Circular	12,35	0,09	145,29	4172,57
Cuadrada – Circular	12,33	0,11	117,43	4532,7
Rejilla	12,41	0,12	107,87	4512,28

Los valores mostrados en la tabla 7, fueron medidos en el tanque electrolítico, nos permite apreciar el comportamiento de la resistencia del SPT al aplicar un voltaje a la malla, que producirá una corriente a través del terreno, denominándola corriente de falla.

Notamos que la malla triangular ofrece una mayor resistencia en el SPT que las demás mallas, debido que utiliza menor longitud de conductor y además menor área, sin tomar en cuenta que el voltaje aplicado se excede en centésimas al resto.

Apreciamos que una malla cuadrada-circular nos ofrece una resistencia muy cercana a la rejilla, lo que nos da a entender que si variamos la profundidad podemos obtener una mejor resistencia.

TABLA 8. VALORES CALCULADOS Y TOLERABLES DE UNA CAPA SIN MEJORAMIENTO DEL TERRENO

Configuración de Malla	Rg (Ω)	Voltaje de Toque Tolerable (V)	Voltaje de Paso Tolerable (V)	Voltaje de Toque Calculado (V)	Voltaje de Paso Calculado (V)	GPR (V)
Triangular	158,762	1679,4	6051,3	4961	646,4	10346,8
Cuadrada	144,468	1867,1	6802,2	6110	617,6	11588,1
Circular	135,272	1611,7	5780,7	6277,5	515,6	12206,7
Cuadrada-Circular	105,529	1731,6	6260,4	4418,3	720,2	11639
Rejilla	97,806	1724,8	6233,2	4128	699,4	11767,9

En la tabla 8, visualizamos los voltajes de toque y paso tolerables para el cuerpo humano que no afecta la integridad de la persona, así como, los voltajes calculados que se producen en la malla ante la falla a tierra en el sistema; además de la resistencia del SPT. Estos valores son obtenidos a través del programa ETAP, teniendo como datos de entrada la corriente de falla y resistividad del terreno obtenido en el tanque electrolítico, observamos que la resistencia del sistema en ambos casos es similar.

Las gráficas de distribución de voltaje de toque y paso que se presentan a continuación, son importadas desde el programa ETAP.

4.1.1. Voltaje de toque y paso en malla triangular

En la malla triangular podemos apreciar que los voltajes de toque son menores en las partes laterales, a medida que nos aproximamos al centro y extremos el voltaje va en aumento. Ver Fig. 36

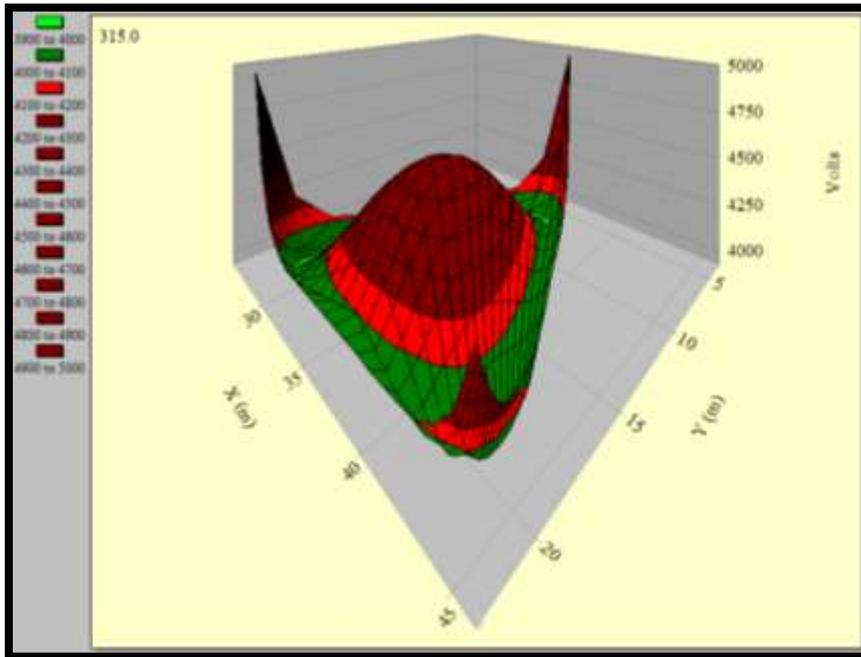


FIGURA 36: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TRIANGULAR SIN ELECTROLITO

La forma del voltaje de paso es inversamente proporcional al de toque, las tensiones más elevadas se encuentran parcialmente en las partes laterales, sin desaparecer en las puntas; pero a medida que nos aproximamos al centro los voltajes disminuyen. Ver Fig. 37

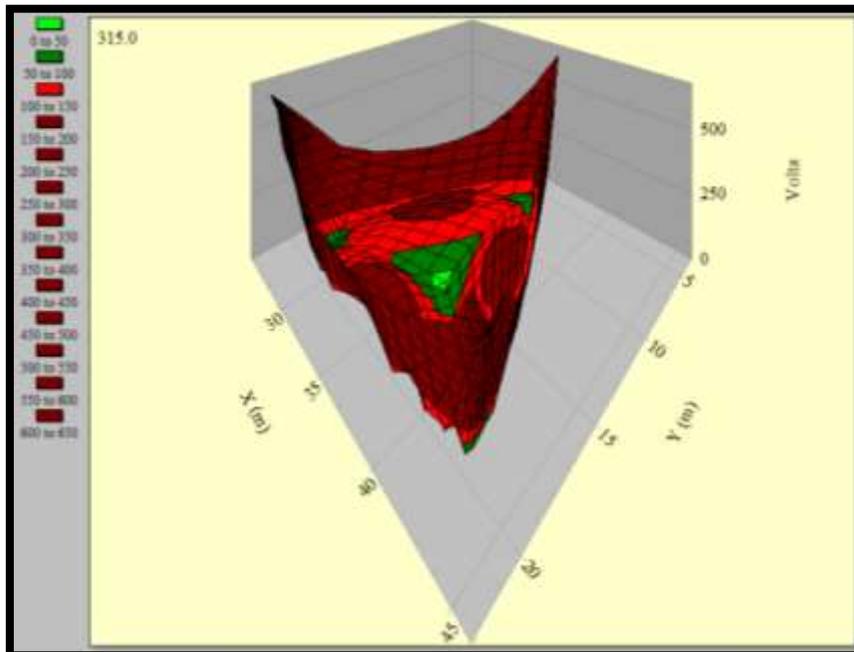


FIGURA 37: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TRIANGULAR SIN ELECTROLITO

4.1.2. Voltaje de toque y paso en malla cuadrada

En la malla cuadrada, mantenemos un voltaje de toque elevado en el centro al igual que la triangular pero de mayor magnitud, con la diferencia que debido al aumento de puntas, el voltaje en éstas disminuyó. Ver Fig. 38

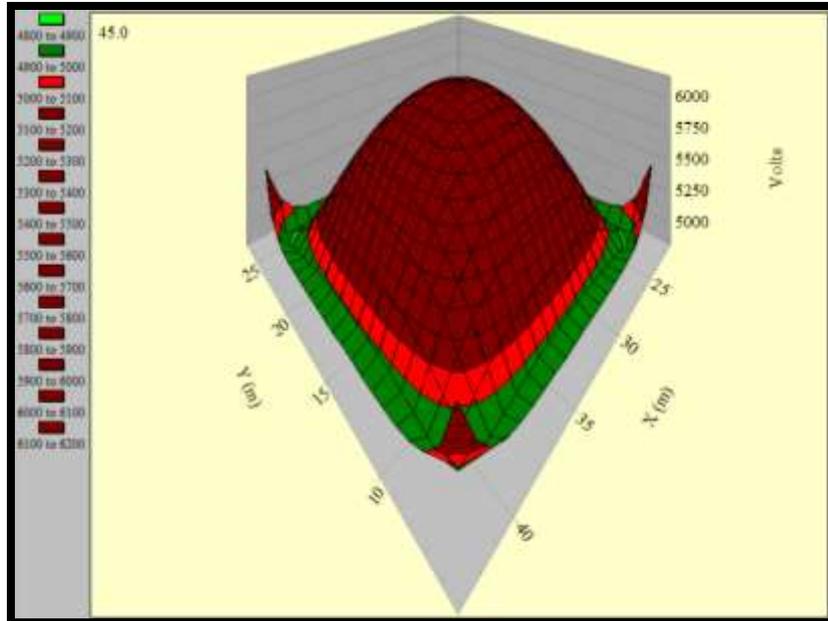


FIGURA 38: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA SIN ELECTROLITO

El voltaje de paso es totalmente menor en el centro de la malla, pero a medida que nos alejamos, presenciamos que los voltajes aumentan de manera considerable antes de llegar a los bordes, a diferencia de la triangular. Ver Fig. 39

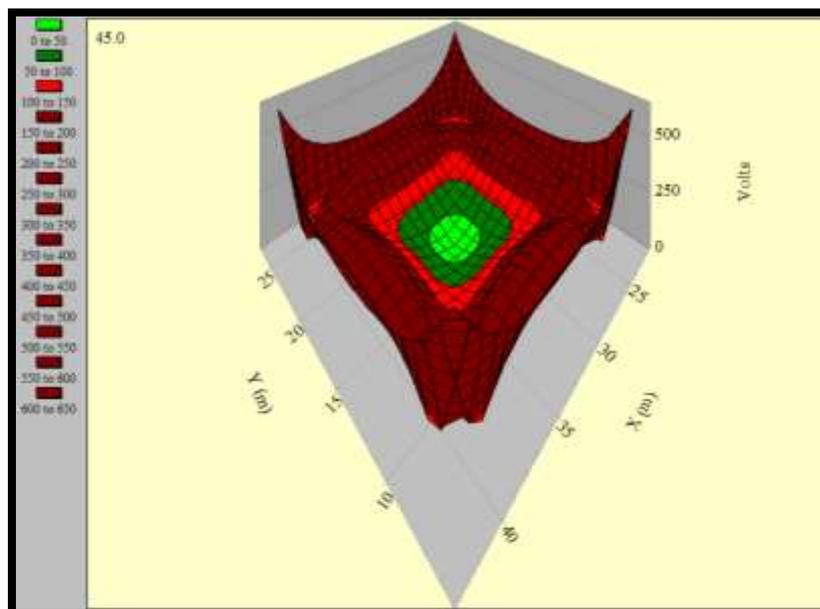


FIGURA 39: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA SIN ELECTROLITO

4.1.3. Voltaje de toque y paso en malla circular

Los voltajes de toque en las puntas se eliminan por medio de la malla circular, manteniendo voltajes bajos en la circunferencia, mientras más nos aproximemos al centro encontraremos voltajes más elevados. Ver Fig. 40

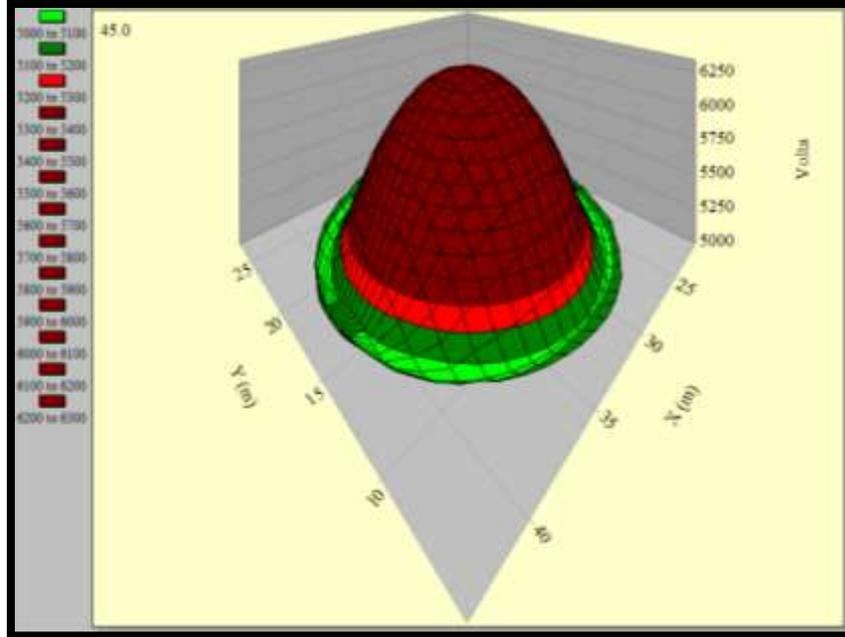


FIGURA 40: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CIRCULAR SIN ELECTROLITO

En la malla circular se denota un mínimo voltaje en el centro, acorde nos alejemos, el voltaje incrementaran siendo los máximos en todo el perímetro. Ver Fig. 41

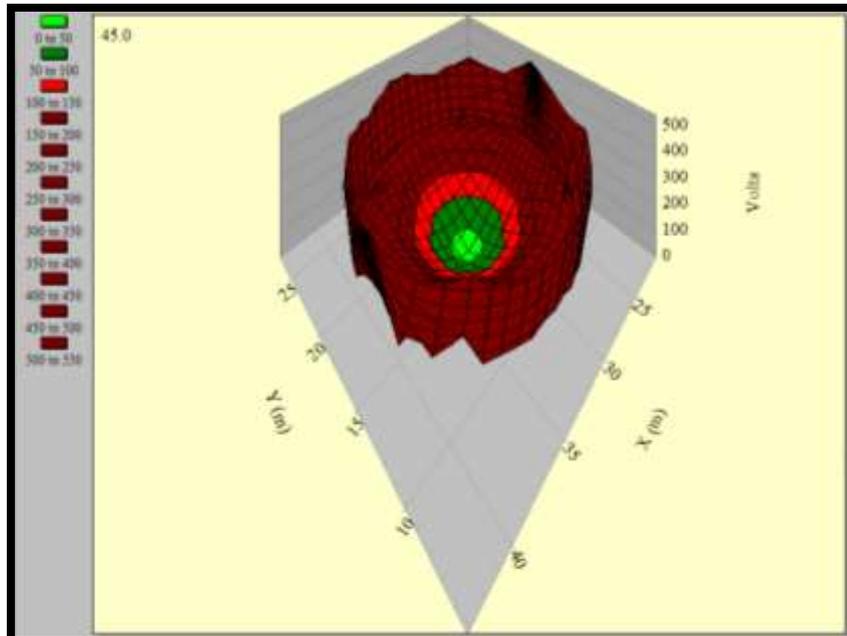


FIGURA 41: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CIRCULAR SIN ELECTROLITO

4.1.4. Voltaje de toque y paso en malla cuadrada-circular

La presencia de menor voltaje se visualiza únicamente entre los espacios de la malla cuadrada y circular, se mantienen el mismo patrón de onda obtenido en la cuadra y circular de manera combinada. Ver Fig. 42

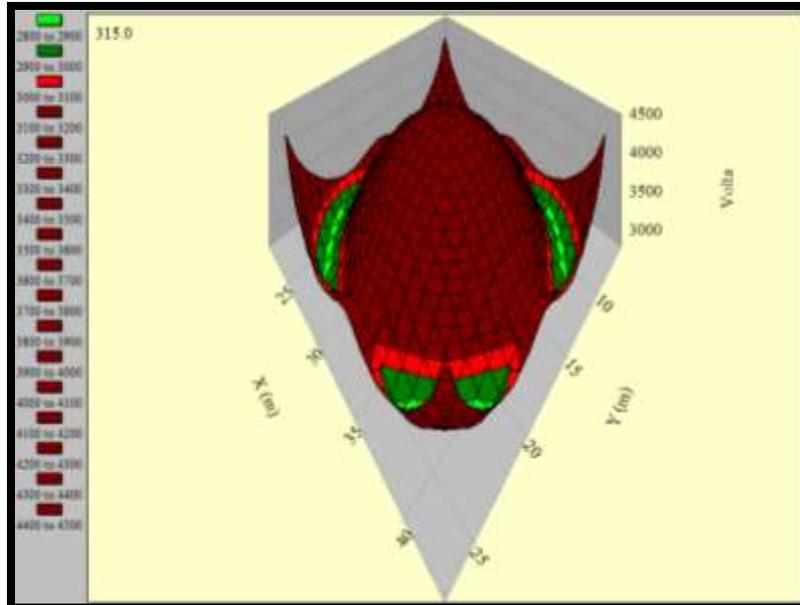


FIGURA 42: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA - CIRCULAR SIN ELECTROLITO

El voltaje de paso que se obtiene, no es más que la combinación entre el voltaje graficado de la malla circular y cuadrada, tenemos pocas zonas rojas, a diferencia que el voltaje de paso máximo calculado es mayor que los demás. Ver Fig. 43

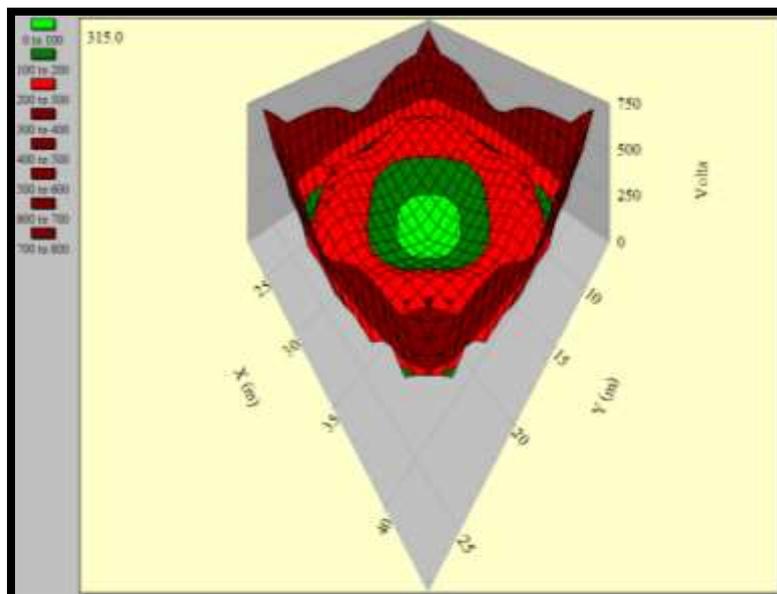


FIGURA 43: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA - CIRCULAR SIN ELECTROLITO

4.1.5. Voltaje de toque y paso en malla tipo rejilla

El voltaje de toque es totalmente menor en referencia a las mallas anteriores, tiene una distribución en forma de parábola cóncava hacia abajo, se mantiene la presencia de mayor voltaje en las esquinas, al igual que las configuraciones de malla cuadrada. Ver Fig. 44

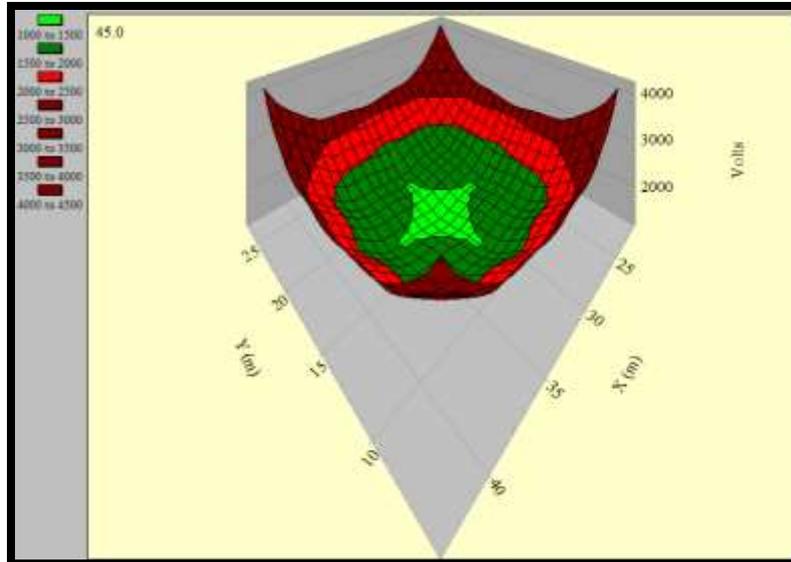


FIGURA 44: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TIPO REJILLA SIN ELECTROLITO

El voltaje de paso se distribuye uniformemente en el centro de la malla debido a la mayor cantidad de conductor, manteniendo la forma de las cuadrículas de la malla, mientras más nos aproximemos a los bordes el voltaje aumentará. Ver Fig. 45

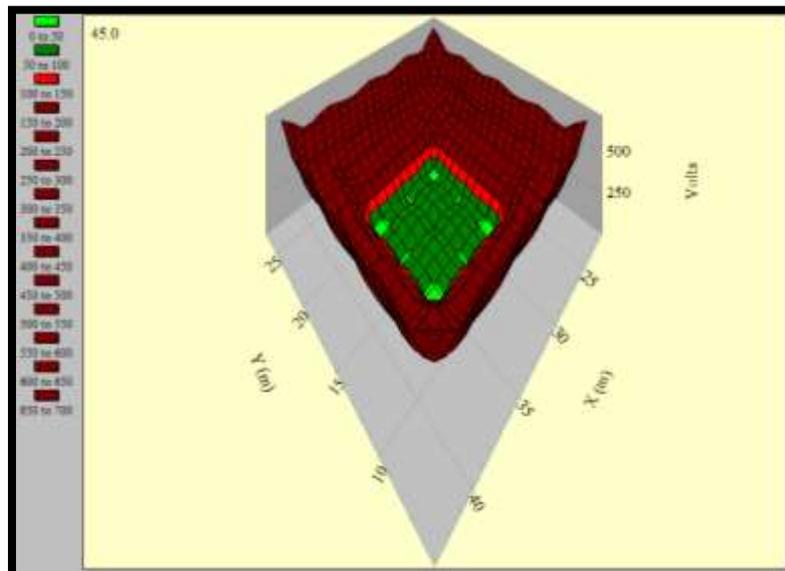


FIGURA 45: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TIPO REJILLA SIN ELECTROLITO

4.2. Valores del Sistema de Puesta a Tierra del modelado de una capa con electrolito

En este escenario, se conserva la misma estructura del tanque electrolito presentada en el caso anterior, con la diferencia que se agregará electrolito al terreno, con la finalidad de disminuir la resistividad del terreno, por ende se disminuirá la resistencia del sistema.

La resistividad del suelo puede reducirse de 15% a 90% por tratamiento químico (dependiendo del tipo y la textura del suelo). Hay varios productos químicos adecuados para este fin, incluido el cloruro de sodio, el sulfato de magnesio, sulfato de cobre, cloruro de calcio, bentonita, geles (thor gerl o gem). La sal común y el sulfato de magnesio son los más comúnmente utilizado. [22]

Para nuestro caso de estudio se utilizó sal común, debida que se adapta inmediatamente con el agua del tanque, visualizándose el proceso de mejoramiento en poco tiempo.

TABLA 9. VALORES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE UNA CAPA CON MEJORAMIENTO DEL TERRENO

Configuración de Malla	Voltaje (kV)	Corriente de falla (kA)	Resistencia (Ω)	Resistividad (Ω -m)
				IEEE 80-2013
Triangular	11,76	1,54	7,66	174,95
Cuadrada	11,48	2,41	4,77	151,92
Circular	11,72	1,6	7,32	198,34
Cuadrada – Circular	10,87	3,29	3,30	127,47
Rejilla	10,99	3,35	3,28	137,17

Tal como en las pruebas sin electrolito, aplicamos un voltaje en el sistema en el orden de los kV a la malla, produciendo una corriente de falla elevada, por la adición del cloruro de sodio, la cual disminuyó la resistencia del sistema y por ende la resistividad del terreno considerablemente, en comparación a los datos registrados en la tabla 7.

TABLA 10. VALORES CALCULADOS Y TOLERABLES DE UNA CAPA CON MEJORAMIENTO DEL TERRENO

Configuración de Malla	Rg (Ω)	Voltaje de Toque Tolerable (V)	Voltaje de Paso Tolerable (V)	Voltaje de Toque Calculado (V)	Voltaje de Paso Calculado (V)	GPR (V)
Triangular	6,348	280,3	455,1	4699,3	612,3	9801,2
Cuadrada	4,443	272,6	424,4	5661,2	572,3	10737
Circular	6,43	288,1	486,3	5304,8	435,7	10315,3
Cuadrada-Circular	2,968	264,5	391,8	3716,3	605,7	9789,7
Rejilla	2,973	267,7	404,8	3503,2	593,5	9986,7

El valor de Rg obtenida en la tabla 10 en comparación a la tabla 9, se mantienen dentro del rango, además aparece una reducción de los voltajes de toque y paso calculados.

4.2.1. Voltaje de toque y paso en malla triangular

Con la adición de electrolito, el voltaje de toque disminuyó en un porcentaje y el área de la zona verde que están cerca de las esquinas aumentaron. Ver Fig. 46

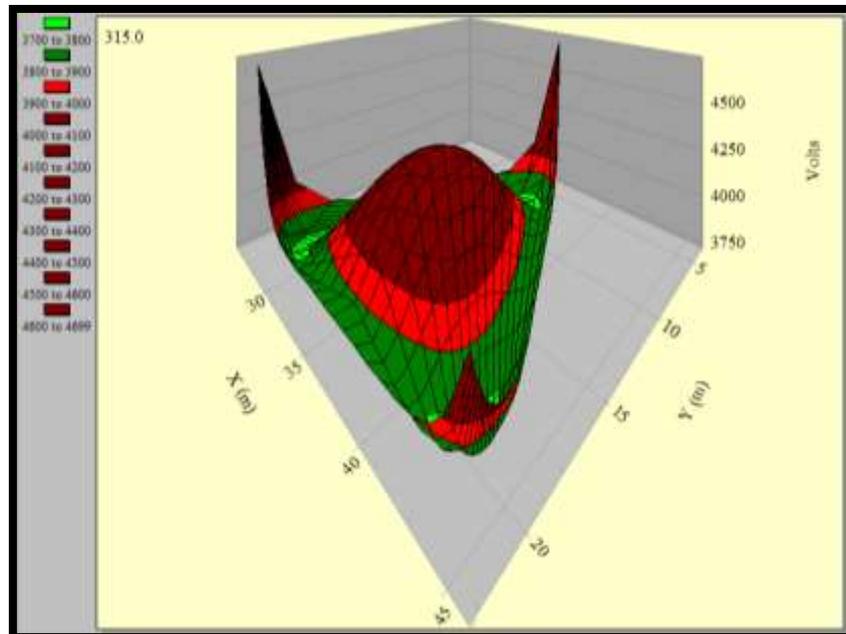


FIGURA 46: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TRIANGULAR CON ELECTROLITO

Mientras que en el voltaje de paso, el área de las zonas de color marrón que se forman cerca de las partes laterales de la malla ha decrecido, por otro lado se aumentó el área de zonas verdes, ofreciendo una mayor protección. Ver Fig. 47

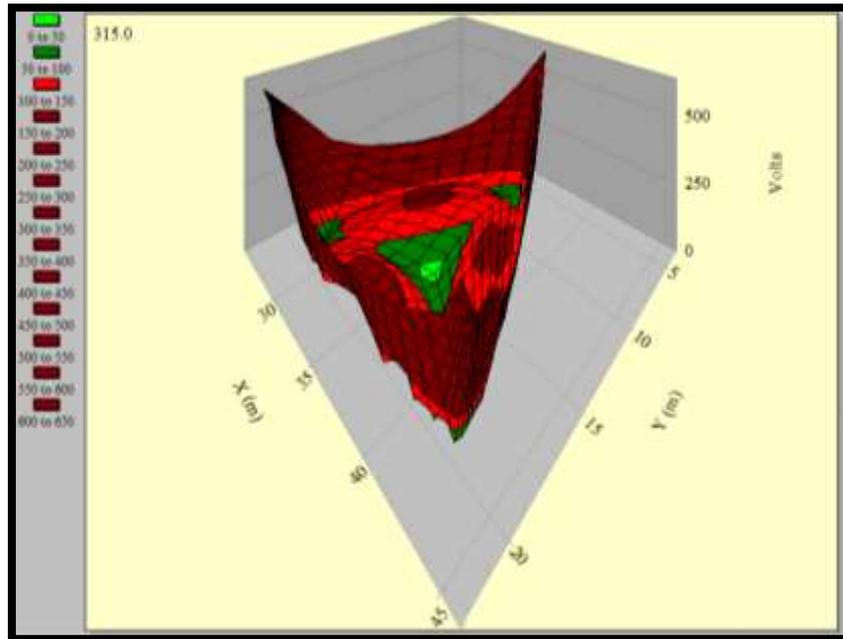


FIGURA 47: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TRIANGULAR CON ELECTROLITO

4.2.2. Voltaje de toque y paso en malla cuadrada

El voltaje de toque es las esquinas de la malla cuadrada se reduce, notamos la presencia de mayor área de color verde claro, en comparación a la forma de onda sin electrolito, donde solo había una franja de color verde oscuro. Ver Fig. 48

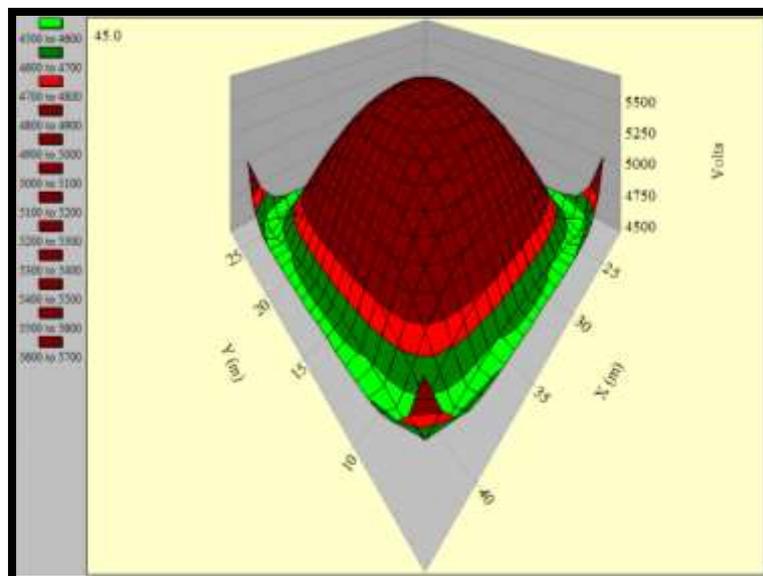


FIGURA 48: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA CON ELECTROLITO

Se visualiza menor voltaje de paso en el centro de la malla y a su vez una mayor área de protección, se redujo en un porcentaje los picos de tensión en las puntas. Ver Fig. 49

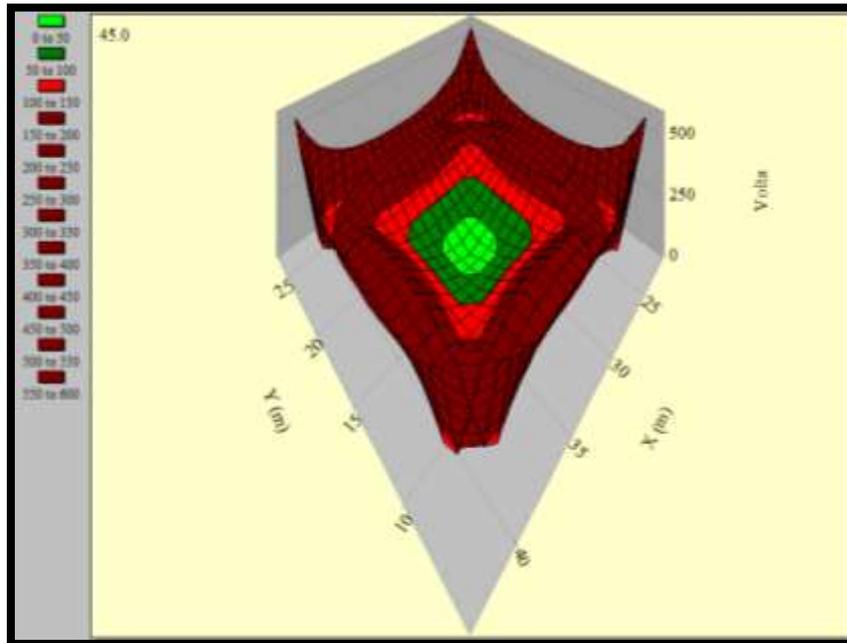


FIGURA 49: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA CON ELECTROLITO

4.2.3. Voltaje de toque y paso en malla circular

La adición de electrolito en la malla circular, reduce el voltaje de toque de forma notable, es decir aproximadamente 1kV, las zonas de colores y su forma de onda se mantienen idénticas. Ver Fig. 50

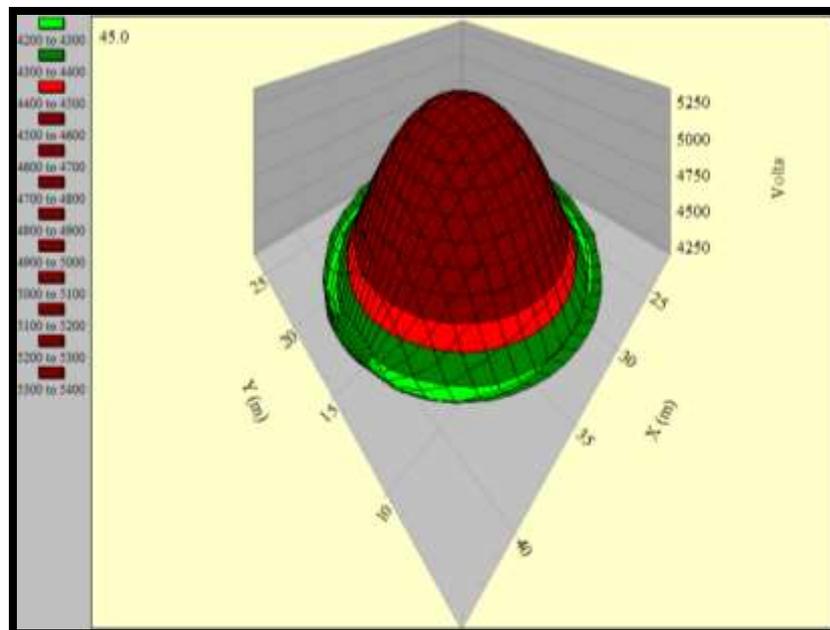


FIGURA 50: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CIRCULAR CON ELECTROLITO

El voltaje de paso se redujo en aproximadamente 100 V, presenciamos que tanto la zona verde claro, como la verde oscuro y naranja, poseen más área. Ver Fig. 51

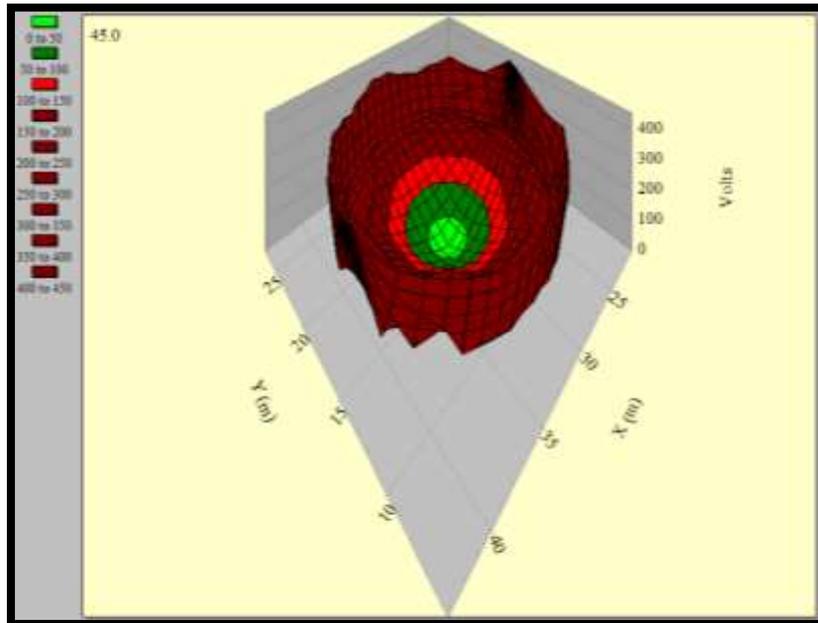


FIGURA 51: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CIRCULAR CON ELECTROLITO

4.2.4. Voltaje de toque y paso en malla cuadrada-circular

En la malla cuadrada-circular, el área de la zona verde se ha ampliado, desplazando las demás y los voltajes de toque se han aminorado, manteniendo la misma forma onda. Ver Fig. 52

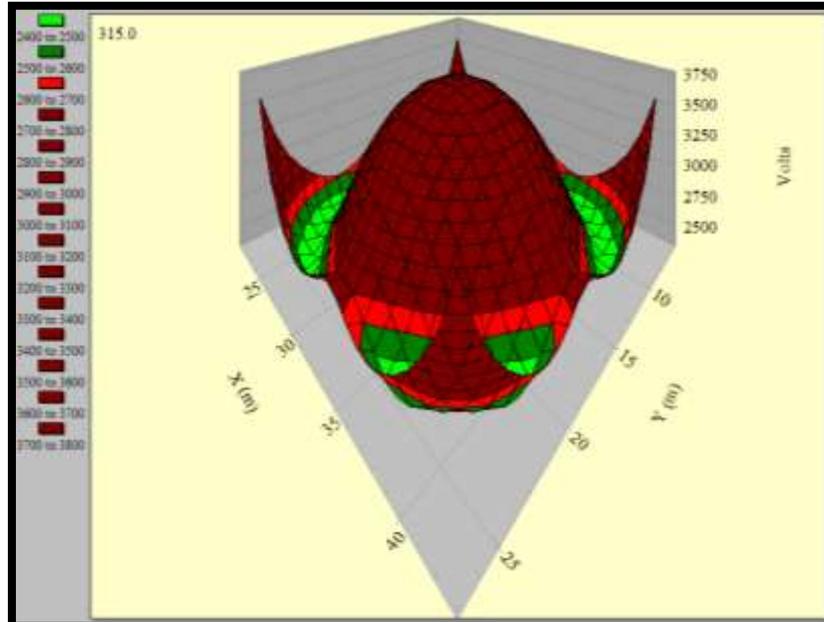


FIGURA 52: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR CON ELECTROLITO

Aunque el voltaje de paso máximo se aminoró, nos percatamos que las zonas del área central de la malla se redujeron, sobretodo la mayor parte de la zona naranja se encuentran de color marrón. Ver Fig. 53

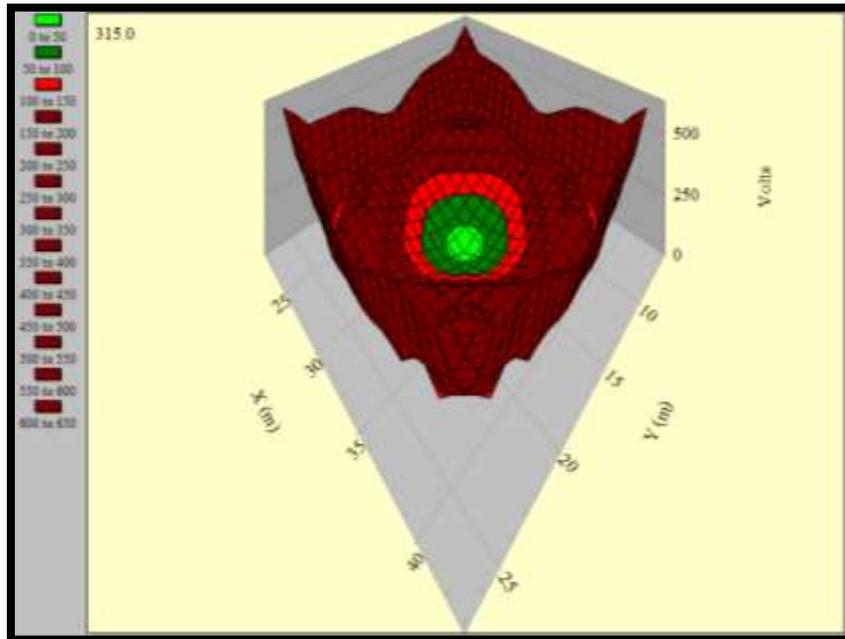


FIGURA 53: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR CON ELECTROLITO

4.2.5. Voltaje de toque y paso en malla tipo rejilla

En la malla tipo rejilla las zonas verdes, ocupan mayoritariamente todo el centro de la malla, aunque el voltaje calculado siga siendo superior al tolerable. Ver Fig. 54

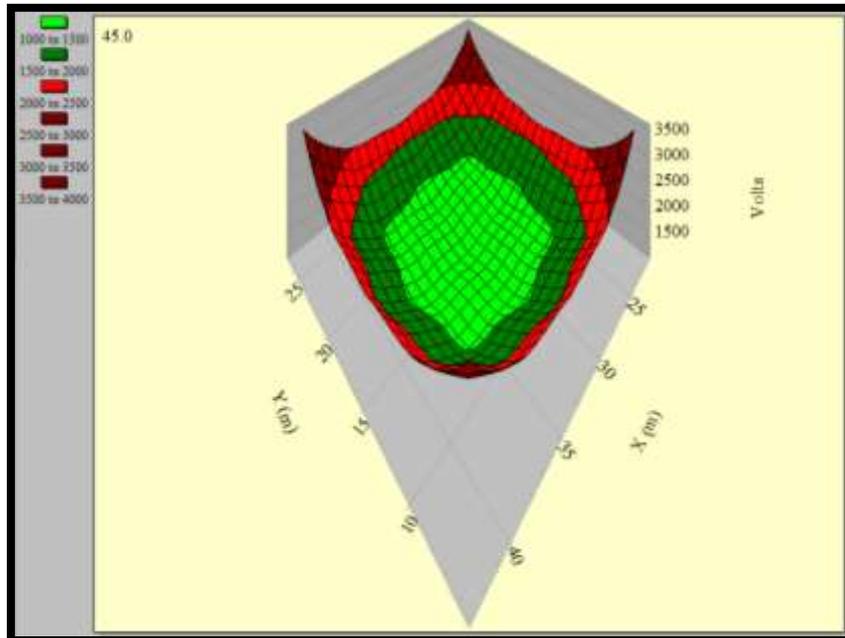


FIGURA 54: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TIPO REJILLA CON ELECTROLITO

El voltaje de paso conserva su forma de onda, únicamente las zonas de color verde claro se han ampliado, al igual que la zona naranja. Ver Fig. 55

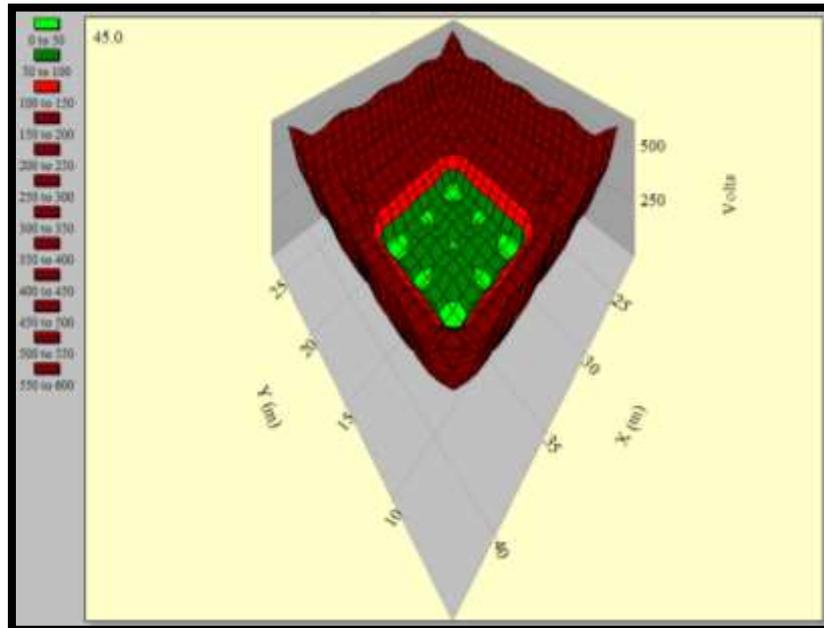


FIGURA 55: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TIPO REJILLA CON ELECTROLITO

4.3. Valores del Sistema de Puesta a Tierra del modelado de dos capa sin electrolito

El modelado de dos capas, se realiza mediante el arreglo de dos tanques acrílicos; un tanque de 0.80 m x 0.80 m x 0.60 m, y otro de 0,45 m x 0,45 m x 0,25m.

El tanque de mayor dimensión será la segunda capa del terreno, conteniendo agua a un determinado nivel; luego se colocará el tanque de menor dimensión dentro del primero, siendo éste la primera capa del terreno.

El tanque superior mantendrá el mismo nivel de agua utilizado para el modelo de una capa, la cantidad de agua contenida representa la profundidad a la cual se encontrará la segunda capa. Ver Fig. 56

FUENTE: EL AUTOR

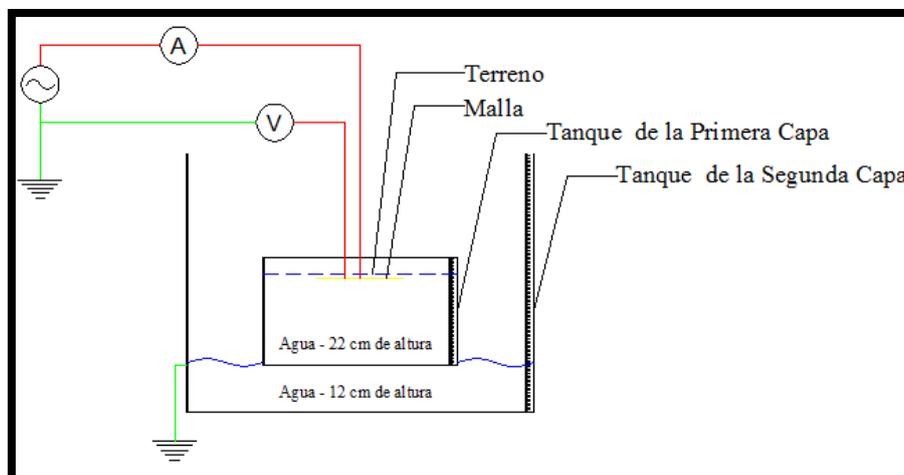


FIGURA 56: ARREGLO DE DOS CAPAS

El sistema de medición es el mismo que se empleó para el modelado de una capa, se aplica una tensión a la malla, que genera una corriente de falla y por ley de ohm obtenemos la resistencia equivalente del sistema.

TABLA 11. VALORES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA – MODELADO DE DOS CAPAS SIN MEJORAMIENTO DEL TERRENO

Configuración de Malla	Voltaje (kV)	Corriente de falla (kA)	Resistencia (Ω)	Resistividad Ω -m		
				ρ_a	ρ_1	ρ_2
Triangular	12,03	0,04	300,75	6870,71	8648,98	5092,44
Cuadrada	12,55	0,04	313,75	9990,2	10860,9	9119,5
Circular	12,55	0,04	313,75	8499,09	9974,94	7023,24
Cuadrada – Circular	12,28	0,05	245,60	9480,06	10799,43	8160,69
Rejilla	12,31	0,05	246,20	10298,77	11732,08	8865,46

En la tabla 11, contemplamos la resistividad de la primera y segunda capa, que fueron obtenidas mediante la resistividad aparente, en donde denotamos que la capa superior posee mayor resistividad que la capa inferior. Dado a la alta resistividad que presentan las capas, la corriente de falla que se genera, es menor en comparación a la primera capa.

TABLA 12. VALORES CALCULADOS Y TOLERABLES DE DOS CAPA SIN MEJORAMIENTO DEL TERRENO

Configuración de Malla	Rg (Ω)	Voltaje de Toque Tolerable (V)	Voltaje de Paso Tolerable (V)	Voltaje de Toque Calculado (V)	Voltaje de Paso Calculado (V)	GPR (V)
Triangular	299,847	3102,6	11744,1	6024,9	782,7	12025,7
Cuadrada	311,48	3839,2	14690,8	6724,3	677,4	12492,2
Circular	312,347	3544,2	13510,5	6679,4	545,6	12527
Cuadrada-Circular	241,808	3818,8	14608,9	4797,2	776,7	12122,4
Rejilla	243,725	4129,4	15851,4	4460,8	753,9	12218,5

En la tabla 12, observamos los valores obtenido por medio del ETAP en comparación a la tabla 8, la resistencia del sistema y el voltaje tolerable de toque y paso aumentaron considerablemente.

La resistencia mostrada por el ETAP es similar, a la medida en el tanque, de igual forma el potencial elevado de la malla con el voltaje aplicado.

Las gráficas de distribución de voltaje de toque y paso de dos capas que se presentan a continuación, son importadas desde el programa ETAP.

4.3.1. Voltaje de toque y paso en malla triangular

Verificamos que en el modelo de dos capas, la forma de onda de la malla triangular sigue siendo la misma a la del modelo de una capa, con la diferencia los voltajes de toque han aumentado. Ver Fig. 57

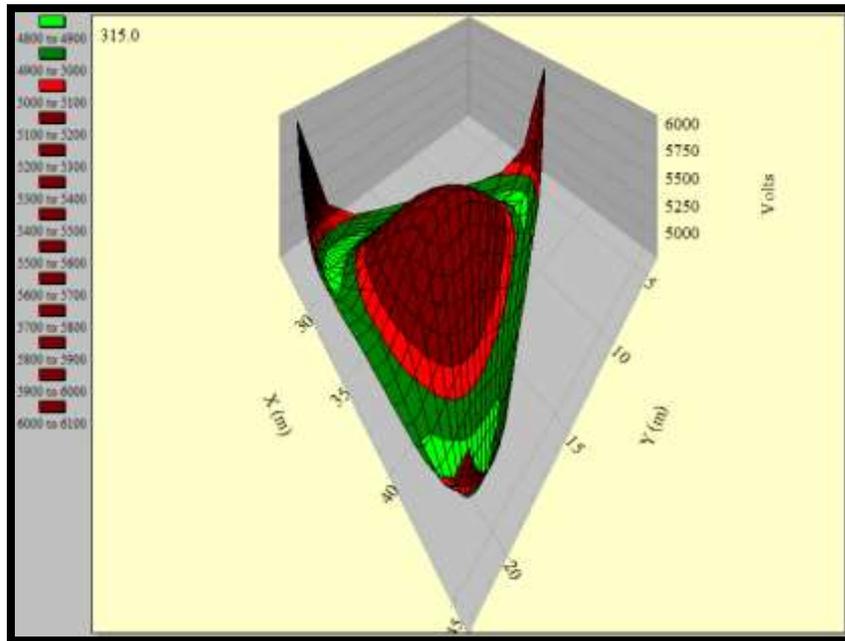


FIGURA 57: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TRIANGULAR SIN ELECTROLITO

En el voltaje de paso el área protegida aumento en relación al de una capa, donde había poca presencia de zonas verdes, dado que el voltaje era menor. Ver Fig. 58

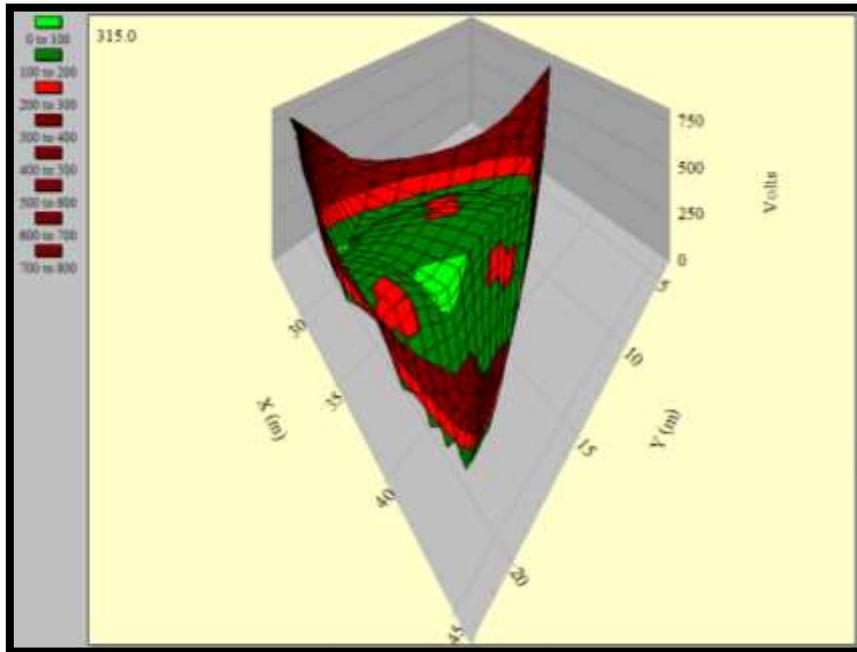


FIGURA 58: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TRIANGULAR SIN ELECTROLITO

4.3.2. Voltaje de toque y paso en malla cuadrada

En la malla cuadrada el voltaje de toque sigue siendo mayor al calculado, al igual que en la capa de un estrato, manteniendo la misma forma de onda. Ver Fig. 59

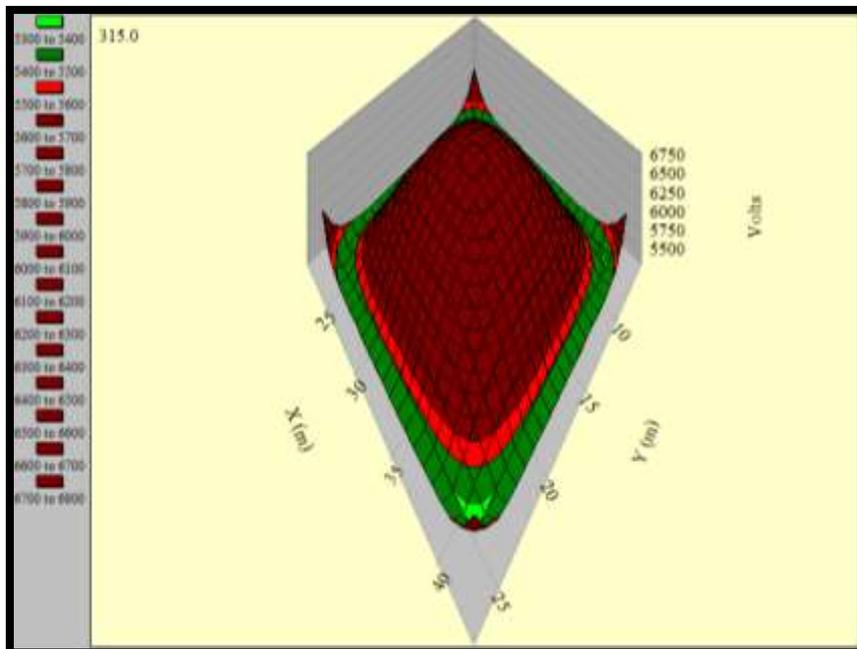


FIGURA 59: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA SIN ELECTROLITO

El voltaje de paso calculado es semejante al de una capa, observamos con la única diferencia es que presenta un porcentaje más de tensión en las puntas. Ver Fig. 60

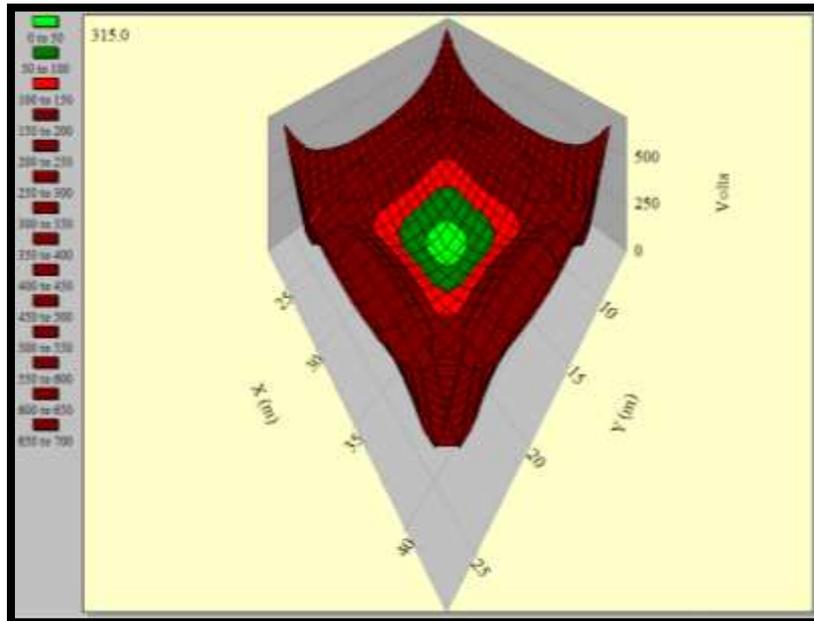


FIGURA 60: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA SIN ELECTROLITO

4.3.3. Voltaje de toque y paso en malla circular

Notamos que la presencia de la zona color verde claro ha disminuido como consecuencia del aumento de la tensión. Ver Fig. 61

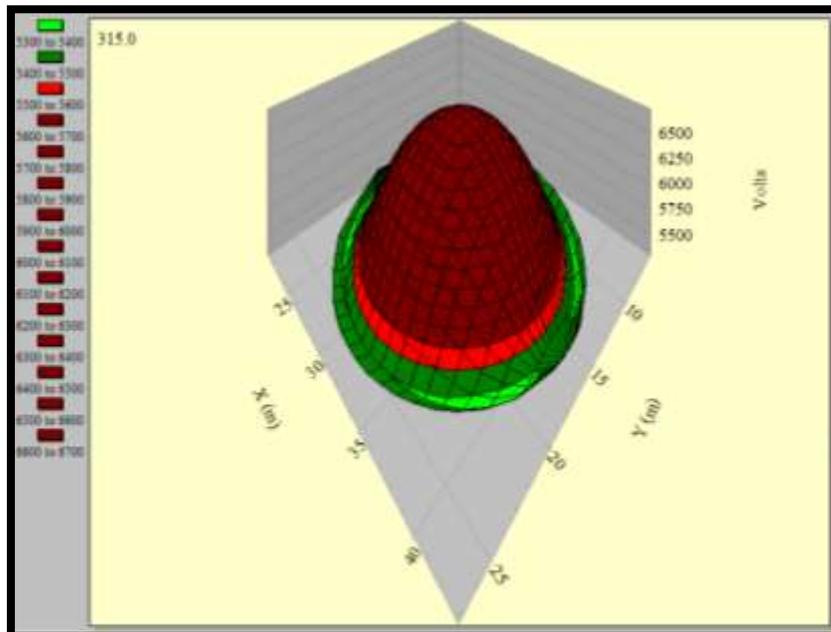


FIGURA 61: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CIRCULAR SIN ELECTROLITO

El voltaje de paso calculado no se ve afectado por la estratificación del terreno, la forma de voltaje de mantiene al igual que sus tensiones. Ver Fig. 62

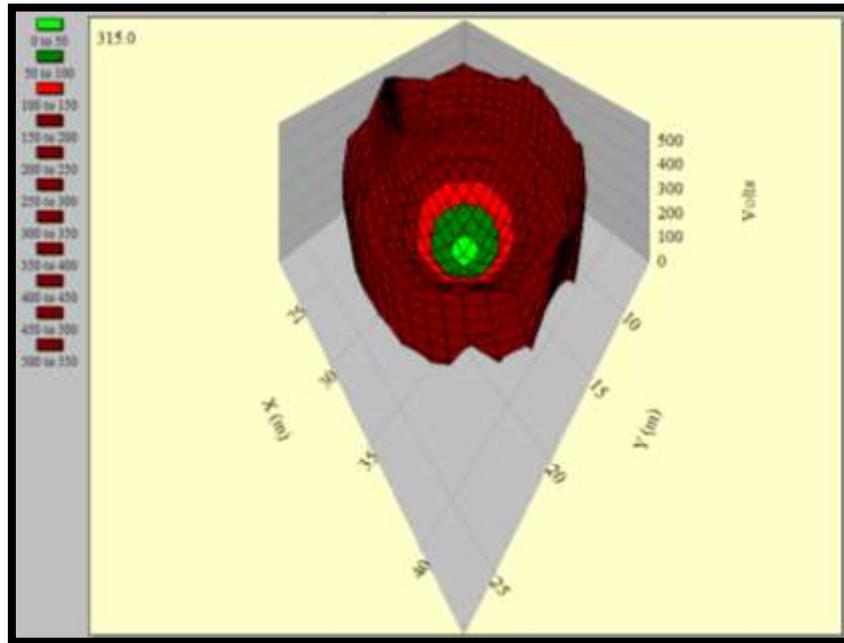


FIGURA 62: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CIRCULAR SIN ELECTROLITO

4.3.4. Voltaje de toque y paso en malla cuadrada-circular

En la malla cuadrada-circular la presencia más baja de voltaje se conserva en el entre el espacio comprendido de la malla cuadrada y circular. Ver Fig. 63

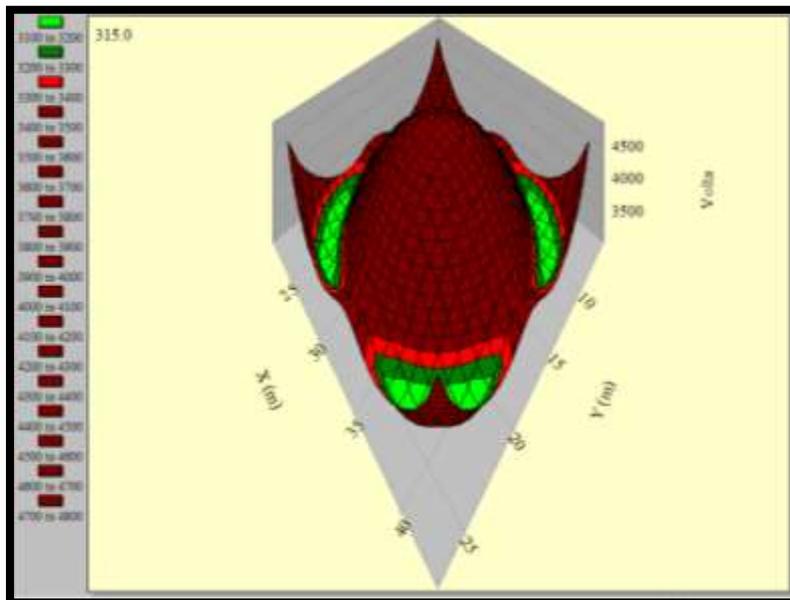


FIGURA 63: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR SIN ELECTROLITO

Visualizamos en la gráfica de paso, la presencia de voltajes mayores (color marrón) en los bordes que compone la malla circular, además la zona verde paso de una forma circular a tener una forma ovalada, en comparación al modelo de una capa. Ver Fig. 64

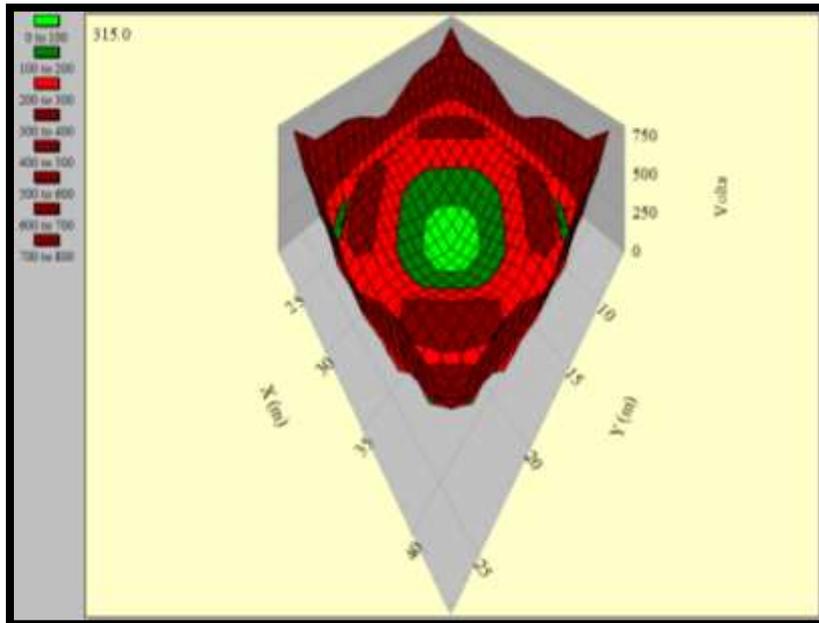


FIGURA 64: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR SIN ELECTROLITO

4.3.5. Voltaje de toque y paso en malla tipo rejilla

En la malla tipo rejilla se mantiene las tensiones de toque calculadas, al igual que la forma de onda, pero comparando con la figura 43, observamos detenidamente que la zona verde claro, ha disminuido considerablemente. Ver Fig. 65

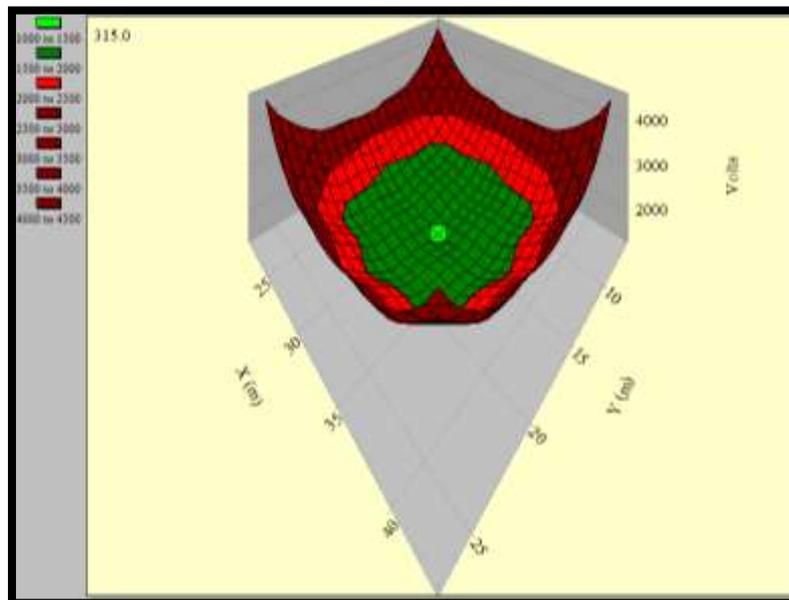


FIGURA 65: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TIPO REJILLA SIN ELECTROLITO

En la forma de onda del voltaje de paso, los escalonamientos que presencian en la figura 44, han disminuido; teniendo una mayor área de zonas verdes, al igual que la aparición de zonas naranjas, es decir, que el área de protección aumentó. Ver Fig. 65

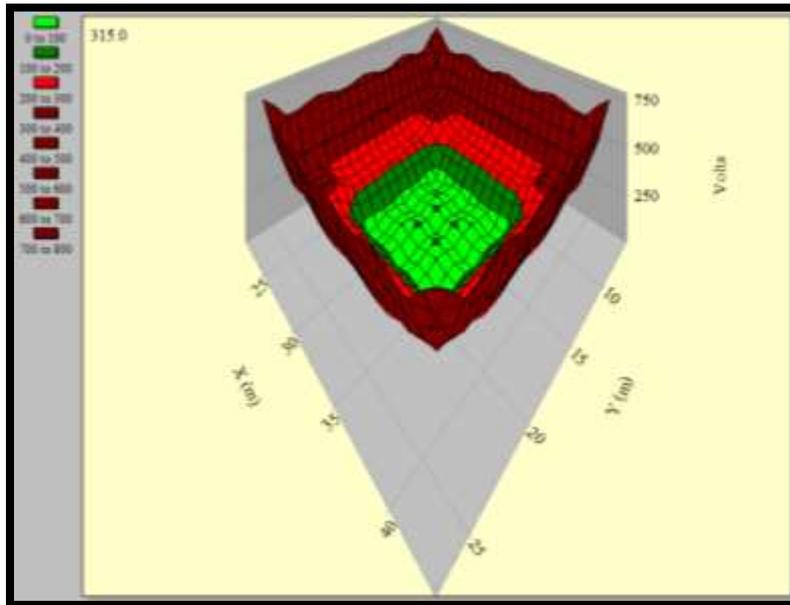


FIGURA 66. DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TIPO REJILLA SIN ELECTROLITO

4.4. Valores del Sistema de Puesta a Tierra del modelado de dos capa con electrolito

El electrolito es depositado únicamente en la capa superior, debido que en la práctica no se puede acceder a la segunda capa dado que se encuentra a mayor profundidad.

TABLA 13. VALORES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA - MODELADO DE DOS CAPAS CON MEJORAMIENTO DEL TERRENO

Configuración de Malla	Voltaje (kV)	Corriente de falla (kA)	Resistencia (Ω)	Resistividad Ω -m		
				ρ_a	ρ_1	ρ_2
Triangular	11,57	0,16	72,31	1652	2079,56	1224,44
Cuadrada	11,4	0,17	67,06	2135,24	2321,34	1949,14
Circular	11,63	0,16	72,69	1969,01	2310,92	1627,1
Cuadrada – Circular	11,64	0,17	68,47	2642,94	3056,39	2229,49
Rejilla	11,60	0,17	68,24	2854,34	3251,59	2457,09

En la tabla 13, denotamos que la resistencia del sistema, no disminuyó considerablemente en relación a la tabla 9 y la corriente de falla aumento. Se mantiene la capa superior mayor a la capa inferior.

TABLA 14. VALORES CALCULADOS Y TOLERABLES DE DOS CAPA CON MEJORAMIENTO DEL TERRENO

Configuración de Malla	Rg (Ω)	Voltaje de Toque Tolerable (V)	Voltaje de Paso Tolerable (V)	Voltaje de Toque Calculado (V)	Voltaje de Paso Calculado (V)	GPR (V)
Triangular	72,095	5794,5	752,8	914,6	2992,4	11565,8
Cuadrada	66,574	6108,1	615,4	995,1	3314,5	11347,5
Circular	72,362	6189,8	505,6	991,7	3300,6	11608,6
Cuadrada-Circular	68,12	4617,6	747	1240	4293,7	11611,4
Rejilla	67,549	4203,5	710,4	1305	4553,8	11513,8

En la tabla 14, el voltaje tolerable de toque disminuyó mientras que el de paso aumento, pero en comparación al calculado, las mallas no ofrecen garantía frente al voltaje de toque.

Las gráficas de distribución de voltaje de toque y paso de dos capas que se presentan a continuación, son importadas desde el programa ETAP.

4.4.1. Voltaje de toque y paso en malla triangular

En la malla triangular se observa que hay una reducción de tensión de toque en todas las zonas, además el área de la zona verde se ha aminorado cerca de las esquinas. Ver Fig.

67

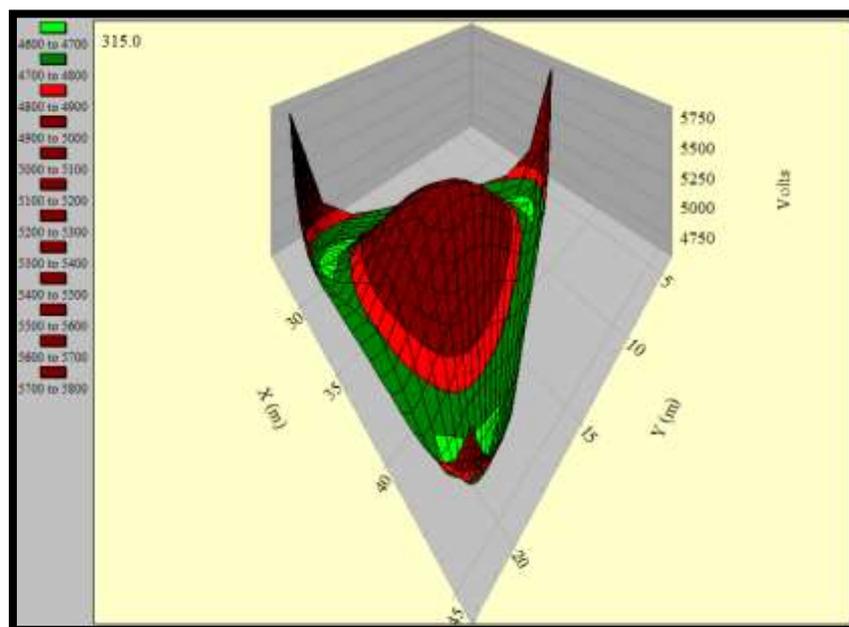


FIGURA 67: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TRIANGULAR CON ELECTROLITO

Los rangos de voltaje de paso se mantienen, la presencia de zonas de color verde han ocupado toda el área interna de la malla, en comparación al modelado de 2 capas sin electrolito. Ver Fig. 68

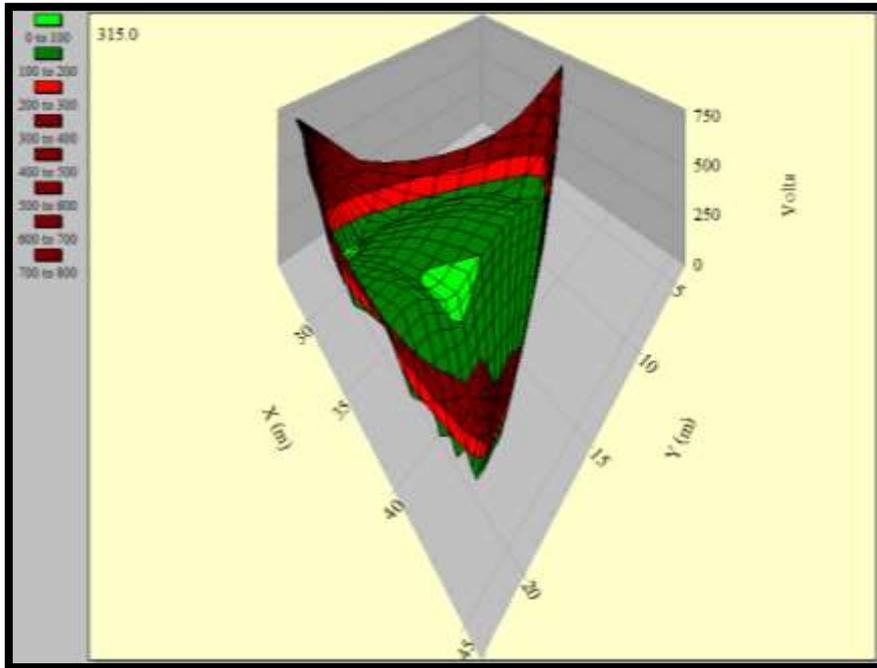


FIGURA 68: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TRIANGULAR CON ELECTROLITO

4.4.2. Voltaje de toque y paso en malla cuadrada

En la malla cuadrada el voltaje de toque se ha reducido, y el área de la zona verde ha aumentado levemente, la distribución del voltaje en las esquinas se mantiene. Ver Fig. 69

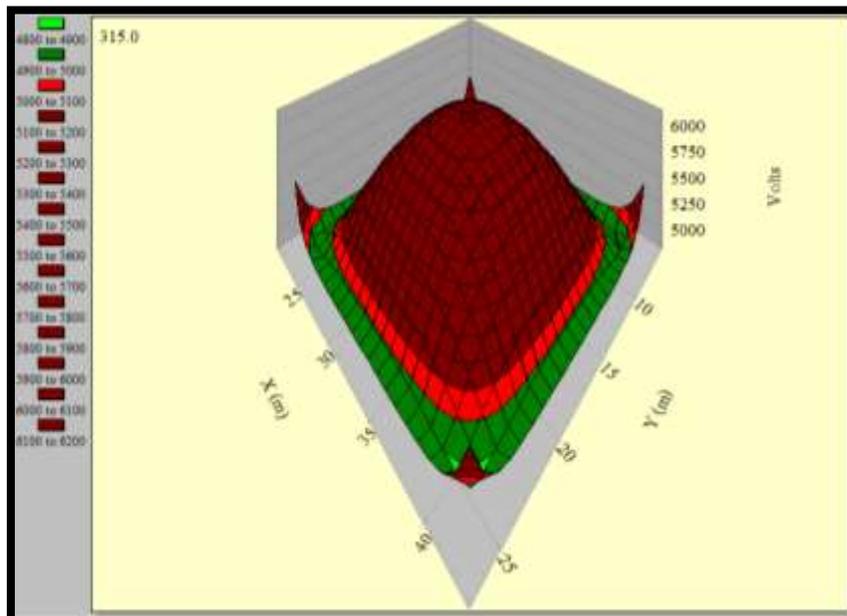


FIGURA 69: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA CON ELECTROLITO

El voltaje de paso de no se ve afectado en gran medida por la adición de electrolito, conserva la misma forma y magnitud de voltaje, con la diferencia que la zona verde ha aumentado. Ver Fig. 70

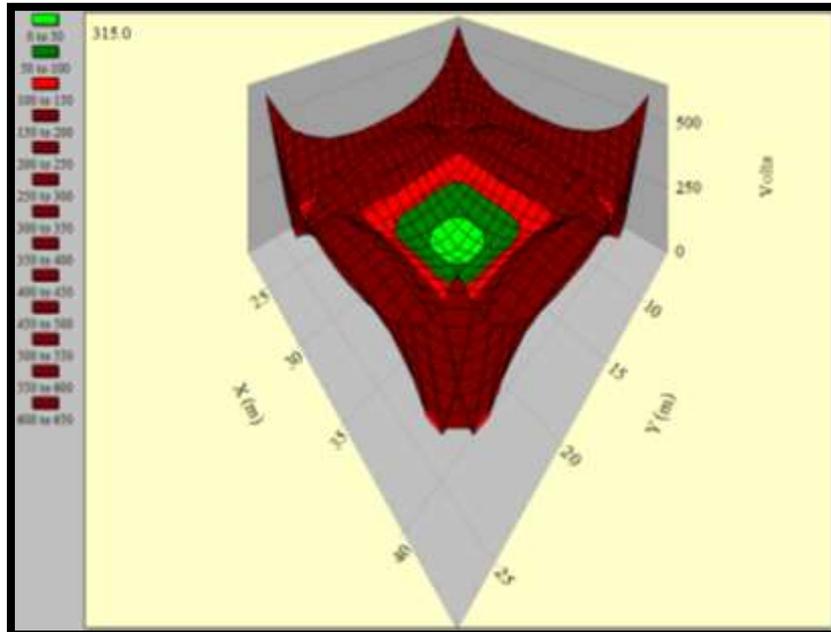


FIGURA 70: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA CON ELECTROLITO

4.4.3. Voltaje de toque y paso en malla circular

El voltaje de toque se reducido, pero sigue superando al voltaje tolerable al cuerpo humano, la forma de distribución se mantiene, sin presentar cambios en el área de las zonas. Ver Fig. 71

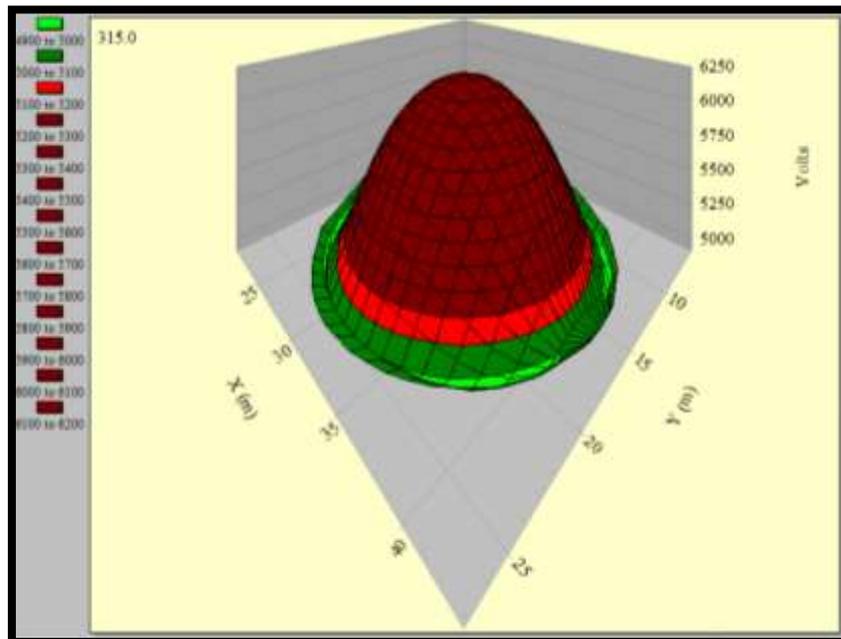


FIGURA 71: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CIRCULAR CON ELECTROLITO

De misma manera que la distribución de voltaje de toque, ocurre en la distribución de toque, únicamente el área central ha aumentado. Ver Fig. 72

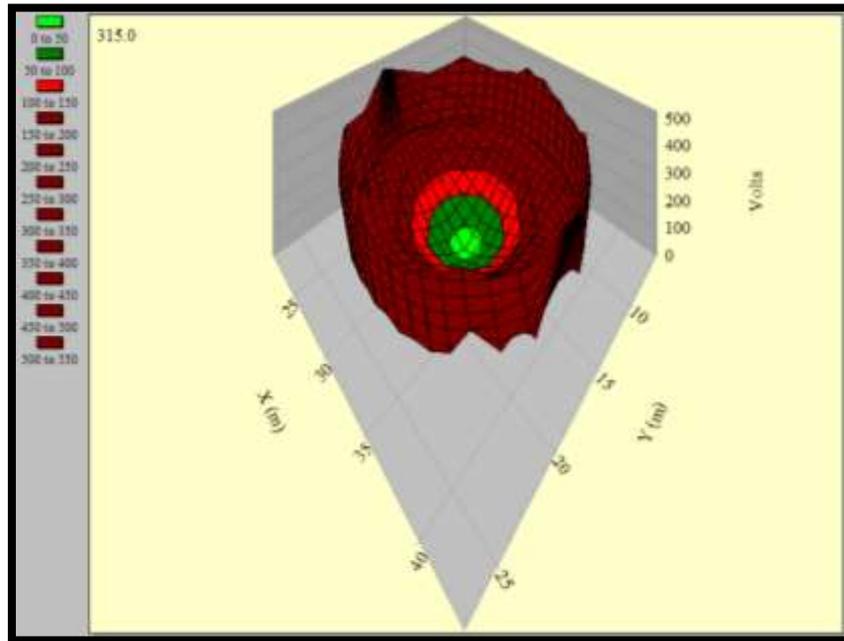


FIGURA 72: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CIRCULAR CON ELECTROLITO

4.4.4. Voltaje de toque y paso en malla cuadrada-circular

En la distribución de toque, desaparece la zona de color verde claro, y toda el área pasa a abarcar la zona de color verde oscuro, además que la zona naranja se amplía levemente. Ver Fig. 73

Ver Fig. 73

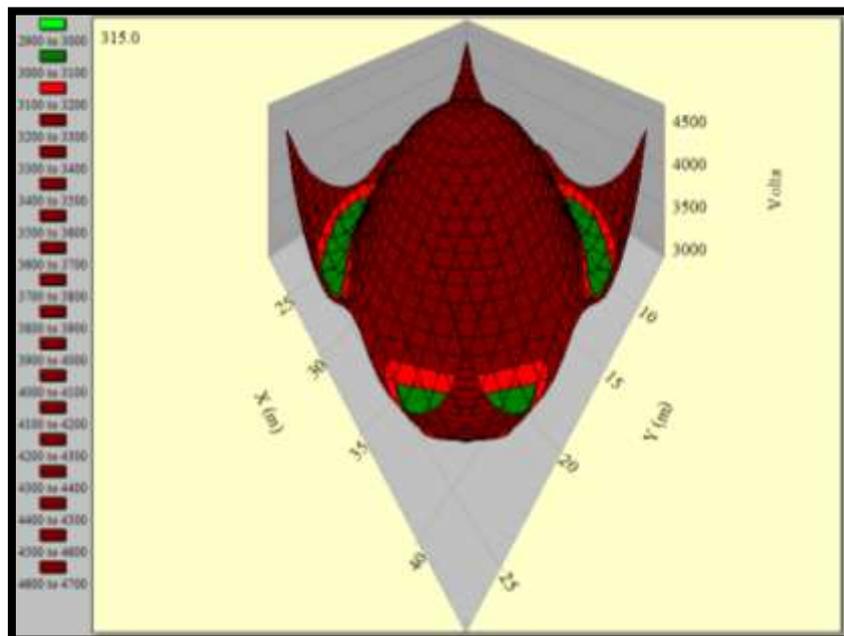


FIGURA 73: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR CON ELECTROLITO

La distribución del voltaje de paso, no manifiesta cambio alguno con la adición de electrolito, se preserva igual a la distribución sin electrolito. Ver Fig. 74

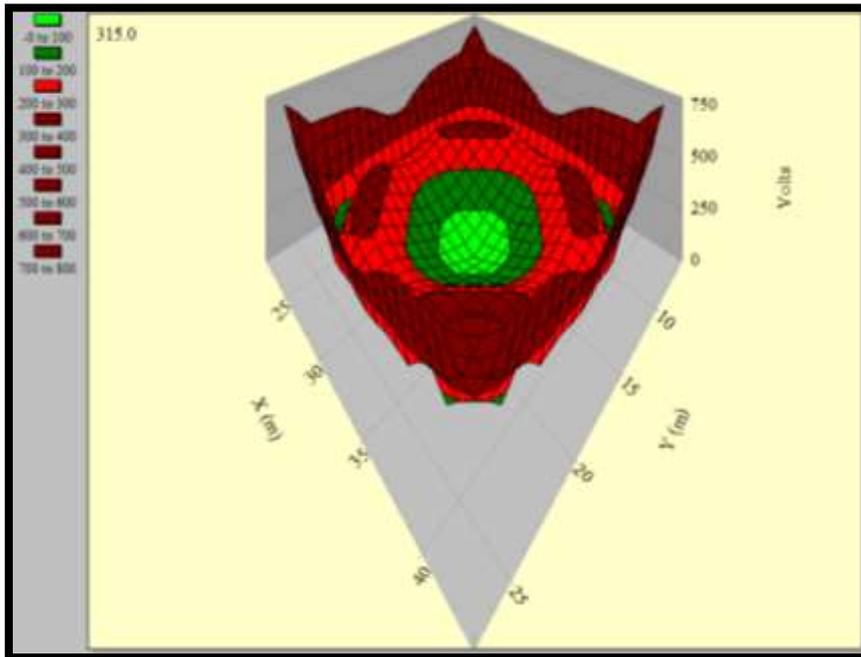


FIGURA 74: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR CON ELECTROLITO

4.4.5. Voltaje de toque y paso en malla tipo rejilla

En la malla tipo rejilla, se visualiza el aumento notable del área de la zona verde claro en el centro y un aumento parcial de la zona verde oscura, no hay reducción de los niveles de voltaje toque como en el resto de las mallas. Ver Fig. 75

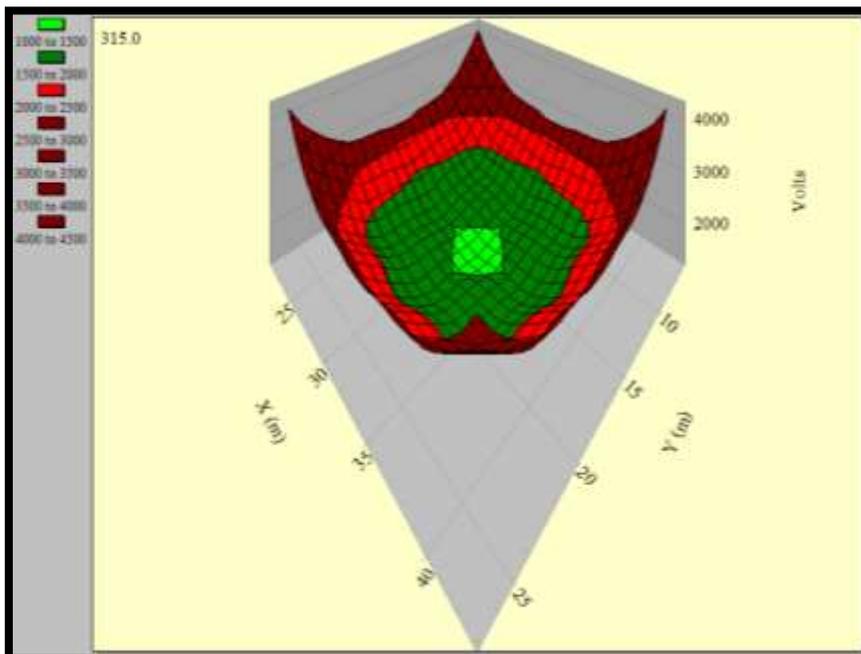


FIGURA 75: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TIPO REJILLA CON ELECTROLITO

En la distribución de voltaje de paso el área de la zona de color verde claro, desaparece en su totalidad siendo ocupada por la zona verde oscuro, se reduce también la zona naranjada. Los niveles de tensión no varían en relación al modelo de 2 capas sin electrolito. Ver Fig. 76

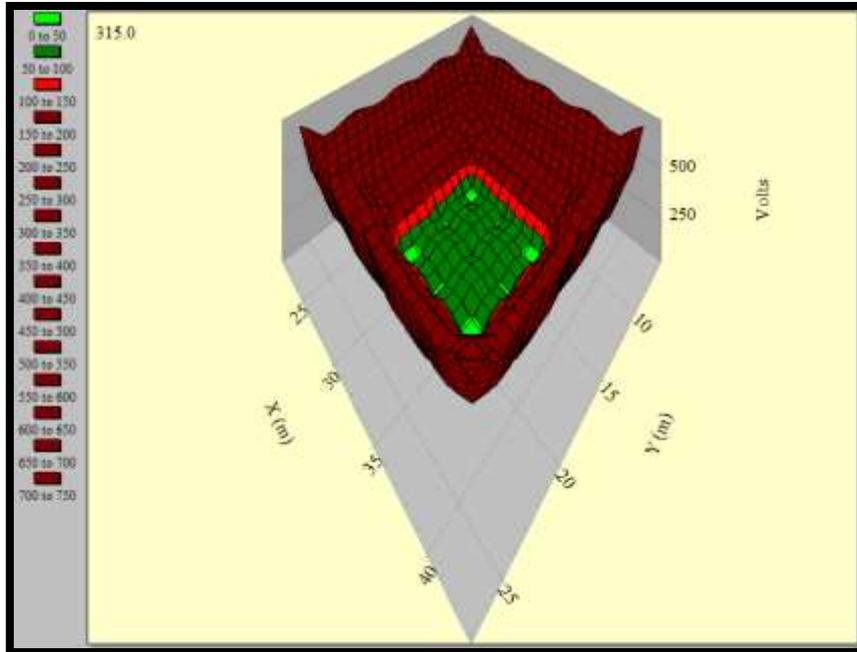


FIGURA 76: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TIPO REJILLA CON ELECTROLITO

4.5. Pruebas de Campo de un Sistema de Puesta a Tierra

Un sistema de puesta a tierra, está conformado en primer lugar por el terreno en el cual se efectuará la instalación de la malla de tierra.

El terreno requerido para la implementación del SPT en campo está compuesto en parte por arcilla compacta y arena, las medidas del terreno donde se instalarán las mallas son de 2m x 2m x 0.10m, el cual se encuentra trazado en cuatro rutas distintas. Ver Fig. 77

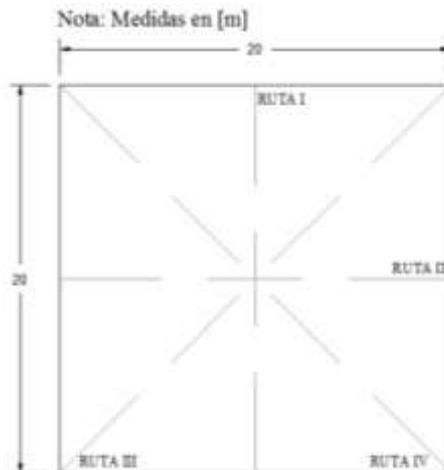


FIGURA 77. DIMENSIONES Y TRAZADO DEL TERRENO PARA EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El objetivo de trazar el terreno en la mayor cantidad de rutas posibles, permite aproximarnos al valor real de resistividad del terreno.

TABLA 15. VALORES DE RESISTENCIA DEL TERRENO EN LAS DIFERENTES RUTAS

Separación entre electrodos (m)	Valor de la resistencia medido en Ruta 1 (Ω)	Valor de la resistencia medido en Ruta 2 (Ω)	Valor de la resistencia medido en Ruta 3 (Ω)	Valor de la resistencia medido en Ruta 4 (Ω)	Promedio (Ω)
2,5	94,1	81	97,8	133	101,5
5	55,2	58,9	54	57,9	56,5
7,5	50,8	47,9	47,8	51,5	49,5
9,5	0	0	40,2	42,3	20,6

Los valores que se muestran en la Tabla 15, se obtienen por medio de la utilización de un telurómetro; en donde, se colocan 4 varillas separadas a una distancia simétrica en las rutas trazadas, hasta ocupar toda el área del terreno. Ver Anexo 3

El telurómetro mide la resistencia del terreno, y es mediante la ecuación (10) planteada por Wenner, en donde calculamos la resistividad del terreno.

TABLA 16. VALORES DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN LAS DIFERENTES RUTAS

Separación entre electrodos (m)	Valor de la resistividad medido en Ruta 1 (Ω -m)	Valor de la resistividad medido en Ruta 2 (Ω -m)	Valor de la resistividad medido en Ruta 3 (Ω -m)	Valor de la resistividad medido en Ruta 4 (Ω -m)	Promedio (Ω -m)
2,5	147,8	127,2	153,6	208,9	159,4
5	173,4	185,0	169,6	181,9	177,5
7,5	239,4	225,7	225,3	242,7	233,3
9,5	0,00	0,00	252,6	265,8	129,6

Luego de calcular la resistividad en cada ruta, procedemos a deducir el promedio que existe en cada separación de los electrodos, tal como se muestra en la tabla 16.

La separación entre los electrodos, es la profundidad del terreno a la cual se está midiendo. Ver Anexo 4

Una vez obtenido la resistividad promedio de cada separación, graficamos la curva de resistividad aparente del terreno. Ver Fig.78

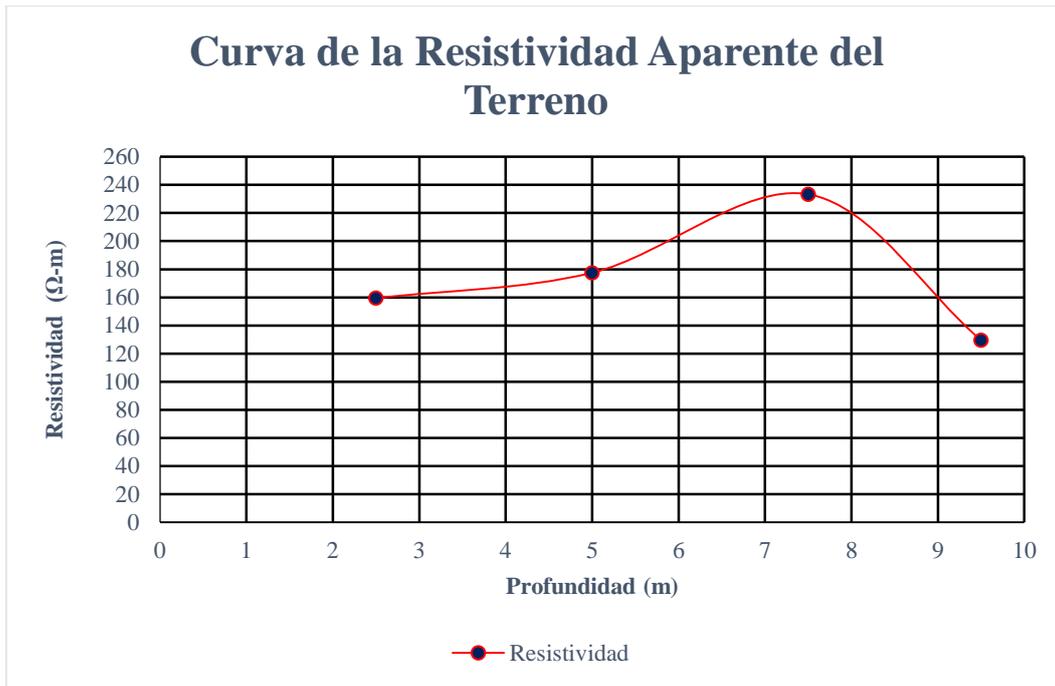


FIGURA 78: CURVA DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La curva de resistividad aparente nos ofrece una visualización de la estratificación del terreno, en el cual denotamos la existencia de una resistividad máxima y mínima; es decir que el terreno en el que estamos trabajando posee dos estratos, en donde la capa superior posee una mayor resistividad que la capa inferior ($\rho_1 > \rho_2$).

Para determinar la resistividad aparente del terreno, utilizamos el método gráfico de Sunde.

1.- Estimamos la resistividad de la capa superior e inferior de la curva de resistividad.

$$\rho_1 = 159,4 \Omega\text{-m}; \quad \rho_2 = 129,6 \Omega\text{-m}$$

2.- Determinamos ρ_2 / ρ_1 y seleccionamos una curva en el gráfico, en caso que la curva no se encuentre, procedemos a trazar la curva por extrapolación. Ver Fig. 79

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{129,6}{159,4} = 0,81$$

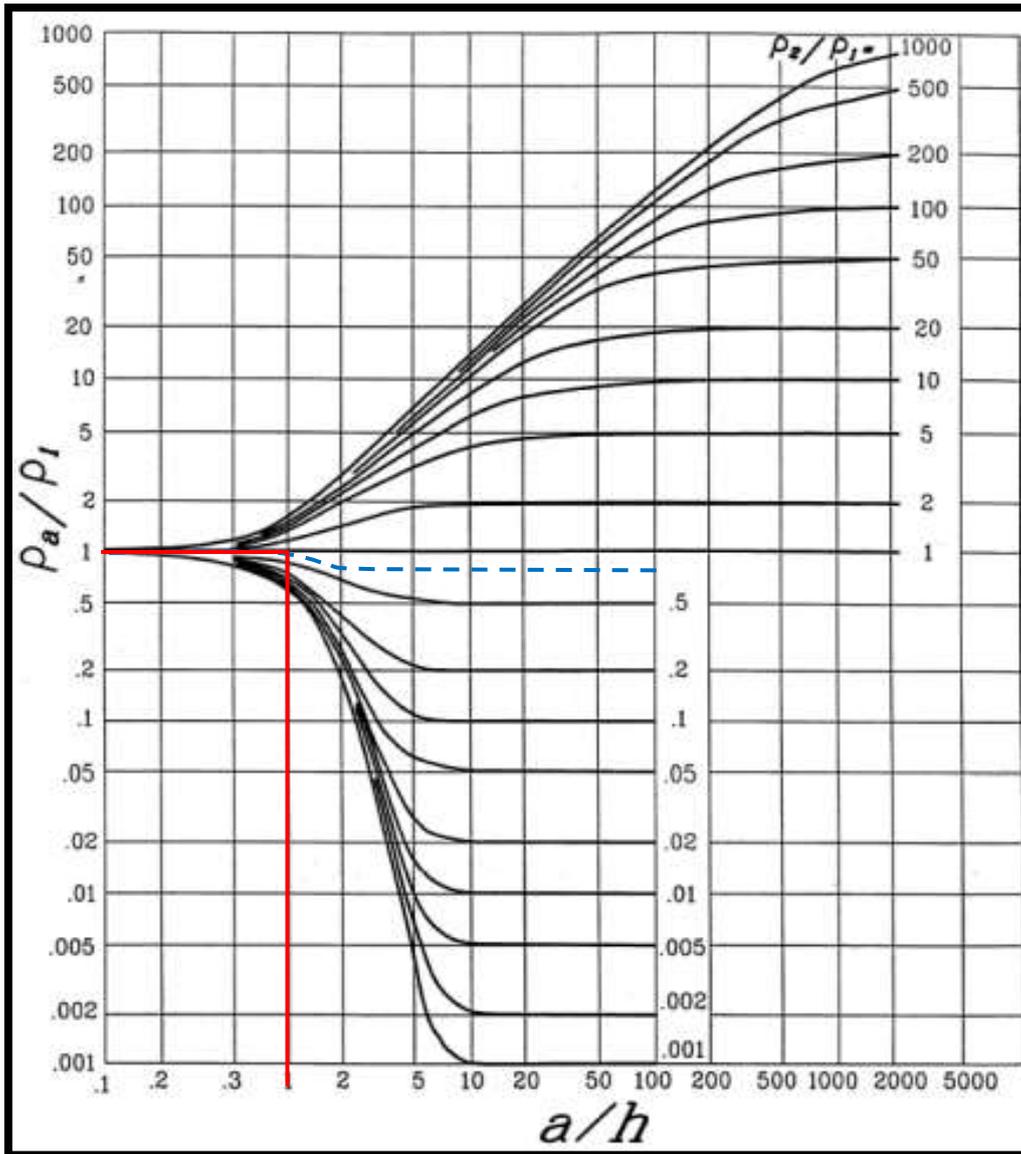


FIGURA 79: GRAFICA DE SUNDE – TRAZADO DE VALORES

3.- Seleccionamos el valor de ρ_a/ρ_1 sobre el eje “Y” dentro de la región pendiente de la curva ρ_2/ρ_1 apropiada.

$$\rho_a/\rho_1 = 1$$

4.- Escogemos el valor correspondiente a/h sobre el eje X.

$$a/h = 1$$

5.- Calculamos ρ_a multiplicando por el valor de ρ_a/ρ_1 por ρ_1 .

$$\rho_a = \rho_a/\rho_1 * \rho_1 = 1 * 159,4 = 159,4 \Omega\text{-m}$$

6.- Ubicamos ρ_a en la gráfica de ρ_a vs. a , obtenida mediante el método de Wenner, hasta interceptar con la gráfica con la finalidad de encontrar el valor de “ a ”. Ver Fig. 80

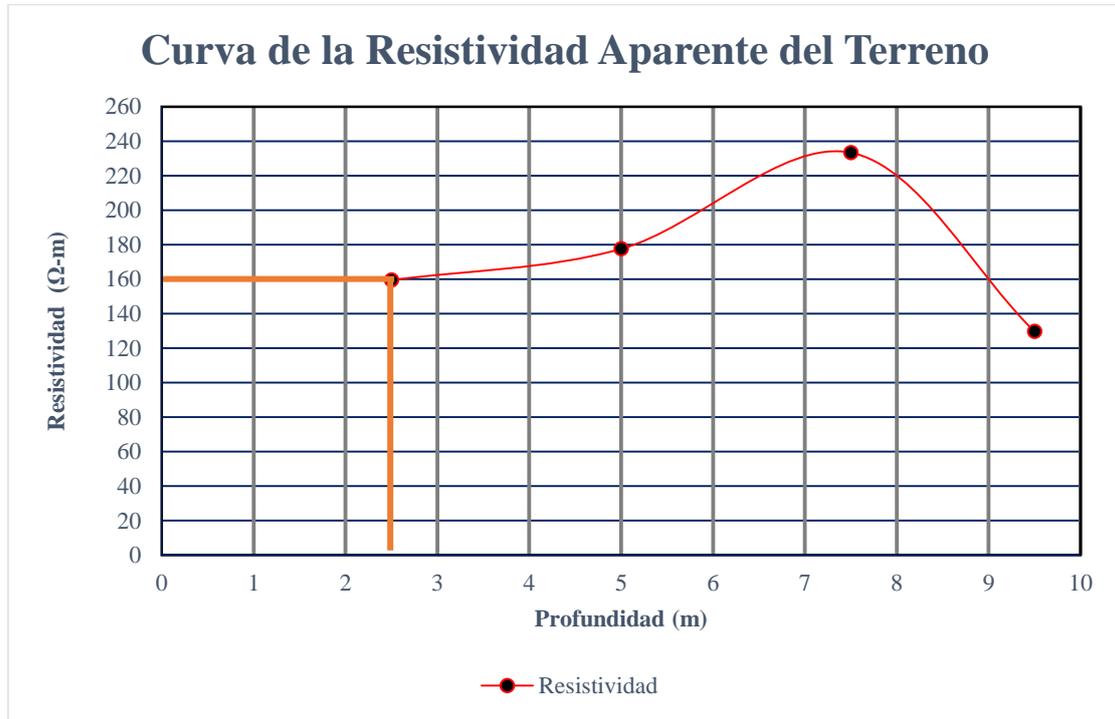


FIGURA 80: TRAZADO DE LA RESISTIVIDAD APARANTE Y PROFUNDIDAD DE LA SEGUNDA CAPA

7.- Calculamos la profundidad del nivel superior “ h ” usando la separación de prueba apropiada “ a ”, siendo: $h = \frac{a}{a/h}$

$$h = \frac{a}{a/h} = \frac{2,5}{1} = 2,5m$$

De acuerdo a los datos obtenidos, la profundidad entre la capa superior $\rho_1 = 159,4 \Omega\text{-m}$ y la capa inferior $\rho_2 = 129,6 \Omega\text{-m}$, es de 2,5m.

TABLA 17. RESISTENCIA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Configuración de Malla	Distancia (m)	10%	20%	30%	40%	50%	62%	70%	80%	90%
Triangular	30	129,5	138,1	144,3	152	158	165,8	170,1	184,4	195,9
Circular	60	141,6	151,6	156,9	160,6	161,6	163,7	165,3	166,2	189,2
Cuadrada	90	101,8	115,9	118,4	119,6	120,6	121,8	124,7	142,9	164,8
Cuadrada - Circular	90	83,1	90,1	92,5	93,7	94,6	98	98,8	111,3	138,3
Rejilla	90	41,9	49,3	51,7	52,8	53,8	54,6	57,4	71,3	100,9

La resistencia del SPT se calcula mediante el método del 62%, para visualizar el comportamiento de la malla en el terreno, se varió la posición del electrodo de potencial en intervalos de 10% entre la distancia comprendida desde el punto de medición hasta el electrodo de corriente. Ver Anexo 5.

Notamos que entre el 50% y 70% de la distancia trazada, los valores de resistencia no sufren mayor variación, es decir que mientras más cerca estemos de la malla, la resistencia será menor y mientras más nos alejemos la resistencia aumentará.

Entre estos dos porcentajes nos ubicamos a una distancia del 62% en donde gráficamente la pendiente se aproxima a cero, siendo éste valor la resistencia promedio del sistema. Ver Fig. 81

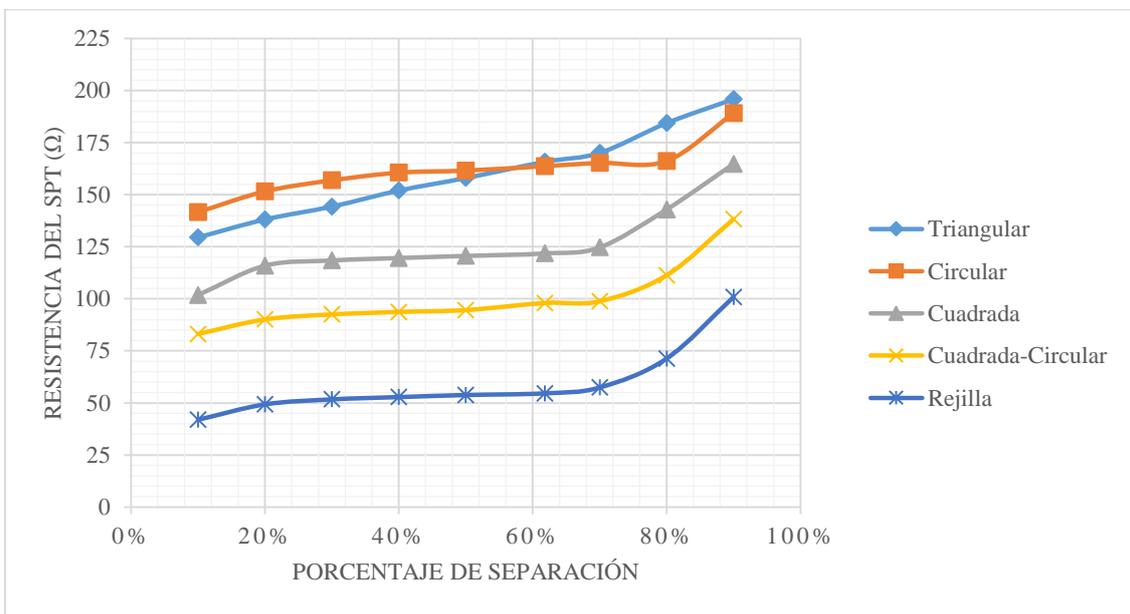


FIGURA 81: COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE LAS MALLAS DEL SPT

TABLA 18. VALORES CALCULADOS Y TOLERABLES DEL SPT EN CAMPO

Configuración de Malla	Rg (Ω)	Voltaje de Toque Tolerable (V)	Voltaje de Paso Tolerable (V)	Voltaje de Toque Calculado (V)	Voltaje de Paso Calculado (V)	GPR (V)
Triangular	166,009	7147,1	744,2	2273,4	8427,5	12150,8
Cuadrada	121,246	6235,5	628,5	1607,3	5763,1	11792
Circular	166,891	7304,9	511,2	2273,4	8427,5	12215,3
Cuadrada-Circular	97,916	6304,2	770,8	2273,4	8427,5	12173,7
Rejilla	103,101	5020,5	748,2	2273,4	8427,5	12404,9

La tabla 18, muestra los voltajes de toque y paso que se presentan en la malla realizada en campo, apreciamos que únicamente el voltaje de toque excede al voltaje tolerable. Mientras que la resistencia obtenida mediante el ETAP es semejante a la calculada por el método del 62%.

4.5.1. Voltaje de toque y paso en malla triangular

En comparación a las gráficas obtenidas mediante al ETAP de las mediciones realizadas en el tanque electrolítico, apreciamos que la distribución de voltajes mantiene la misma forma, en este caso tenemos una gran presencia de zonas verdes cerca de los extremos y los puntos más elevados se producen las esquinas. Ver Fig. 82

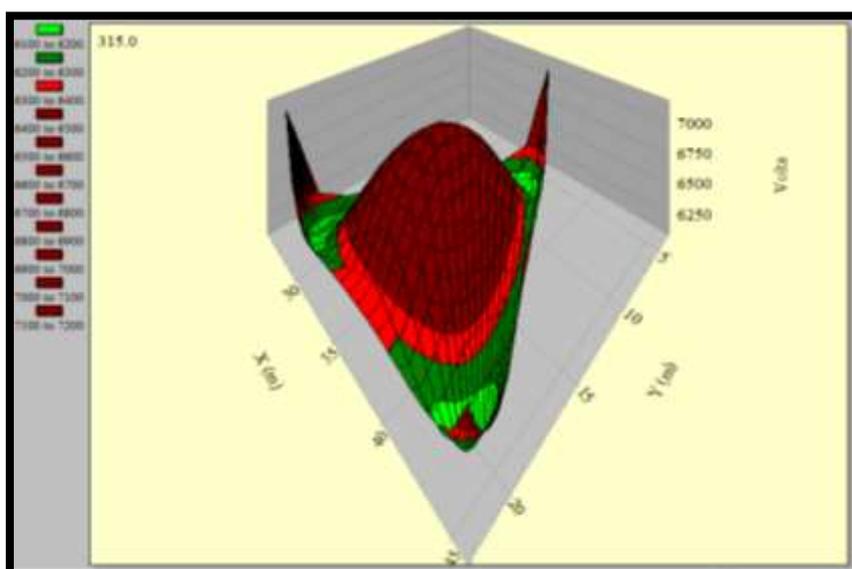


FIGURA 82: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TRIANGULAR EN CAMPO

En cambio los voltajes menores de paso de la malla triangular, se distribuyen del centro hacia todos los extremos, en las pruebas del tanque generalmente los voltajes menores, se concentraban en el centro. Ver Fig. 83

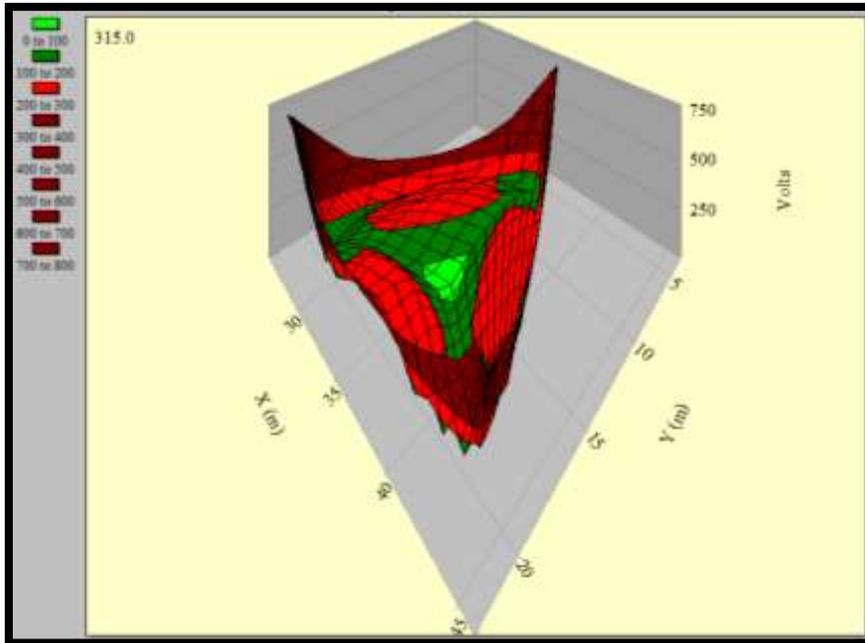


FIGURA 83: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TRIANGULAR EN CAMPO

4.5.2. Voltaje de toque y paso en malla cuadrada

La distribución voltaje de toque en la malla cuadrada, no difiere en comparación a las realizadas en el tanque electrolítico, se mantiene el pico voltaje en el centro de la malla. Ver Fig. 84

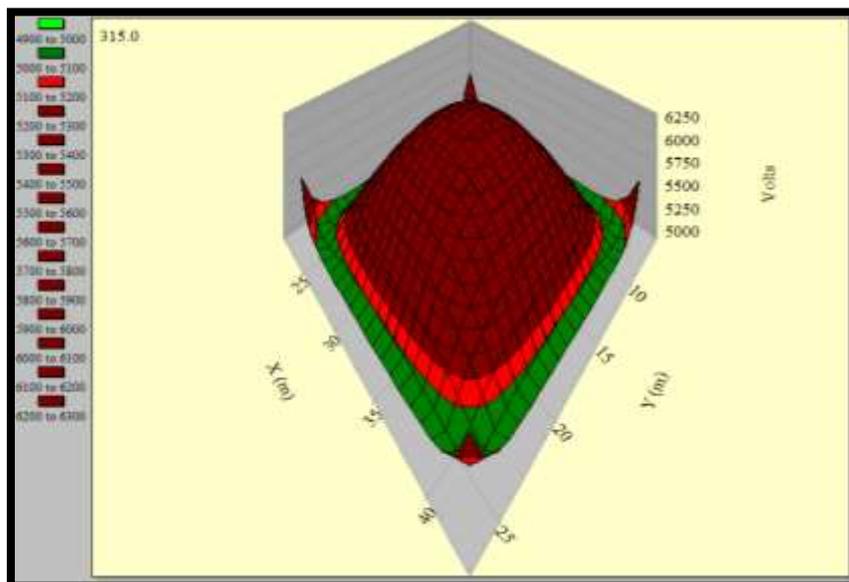


FIGURA 84: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA EN CAMPO

De igual modo el voltaje de paso no varía, las tensiones más bajas se encuentran en el centro, las tensiones más altas se producen en las esquinas, pero no superan el voltaje tolerable. Ver Fig. 85

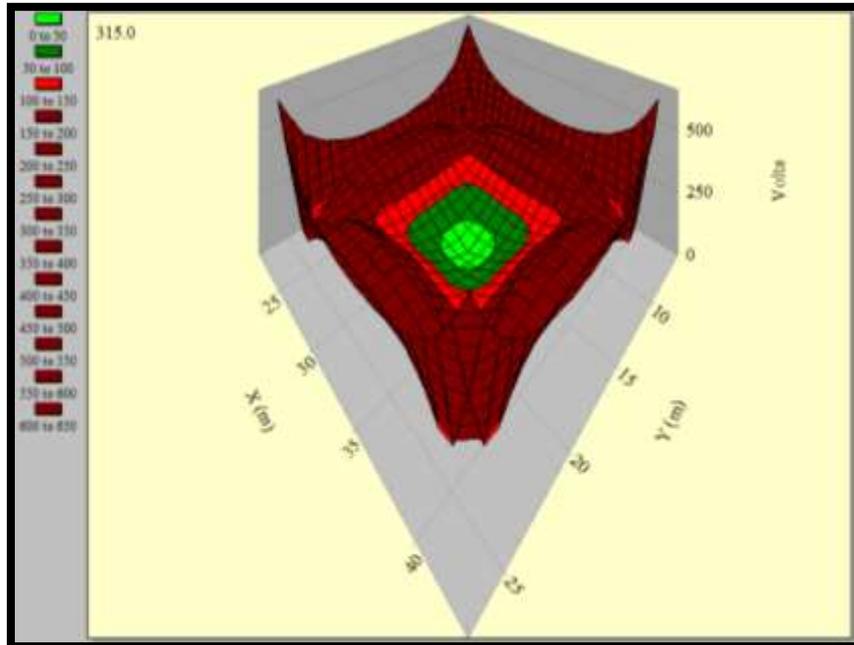


FIGURA 85: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA EN CAMPO

4.5.3. Voltaje de toque y paso en malla circular

En la distribución de voltaje de toque, los voltajes menores se encuentran en el perímetro de la malla, conforme nos aproximemos al centro, las tensiones aumentaran. Ver Fig. 86

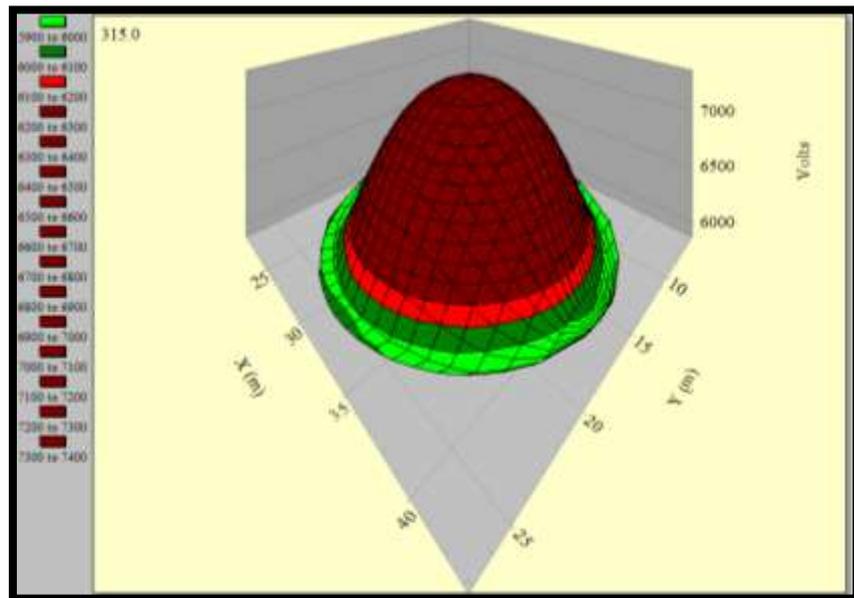


FIGURA 86: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CIRCULAR EN CAMPO

En el voltaje de paso se mantiene la misma distribución que se ha presenciado en las gráficas anteriores. Ver Fig. 87

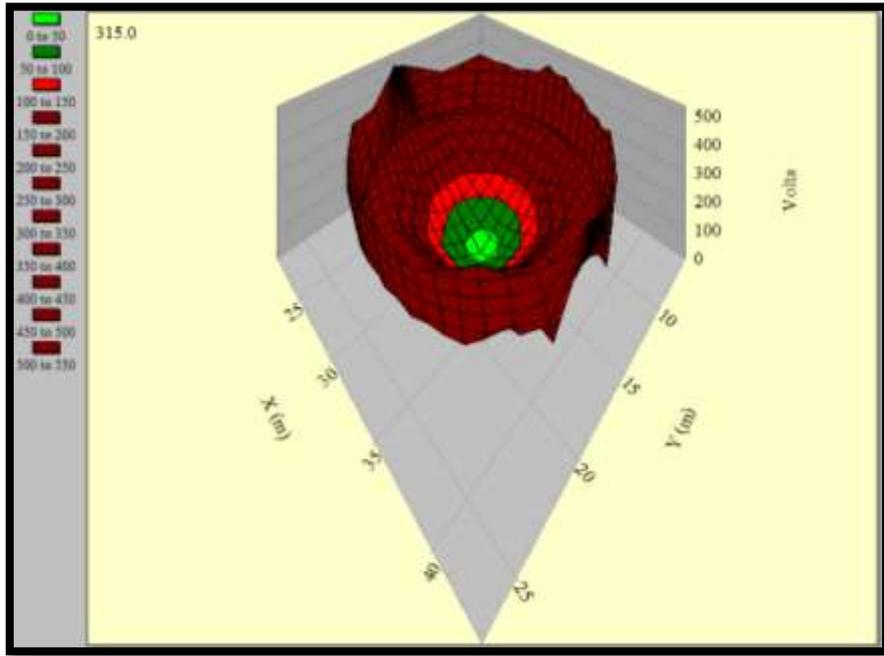


FIGURA 87: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CIRCULAR EN CAMPO

4.5.4. Voltaje de toque y paso en malla cuadrada – circular

La distribución de voltaje de toque en la malla cuadrada – circular, no presenta variaciones, pero observamos que los voltajes se han incrementado, en comparación a los modelos realizados en tanque sin electrolito. Ver Fig. 88

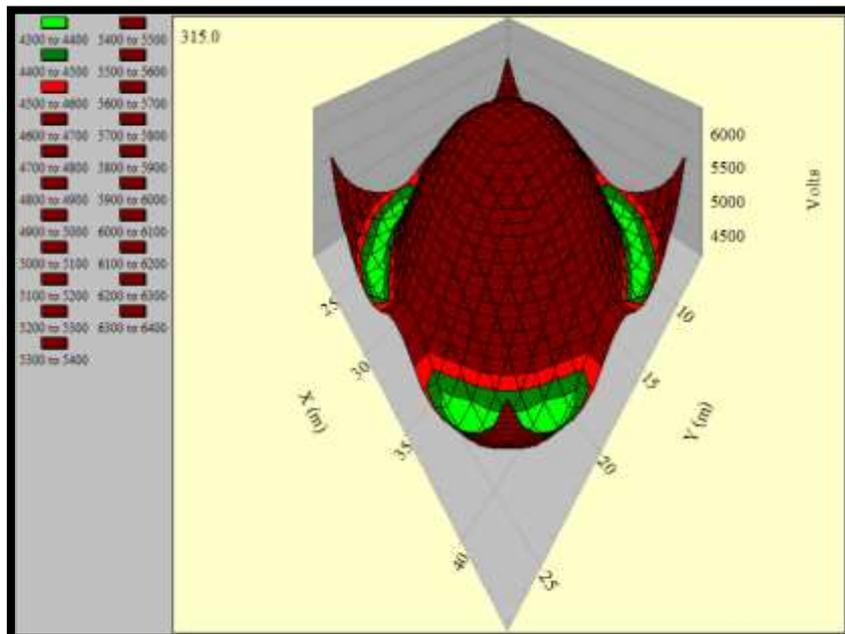


FIGURA 88: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR EN CAMPO

Notamos que en la distribución de voltaje paso, niveles de voltaje que se producen en la malla circular aumentaron (zona marrón), mientras que en las gráficas anteriores, la zona marrón se presentaba generalmente en los bordes de la malla cuadrada. Ver Fig.89

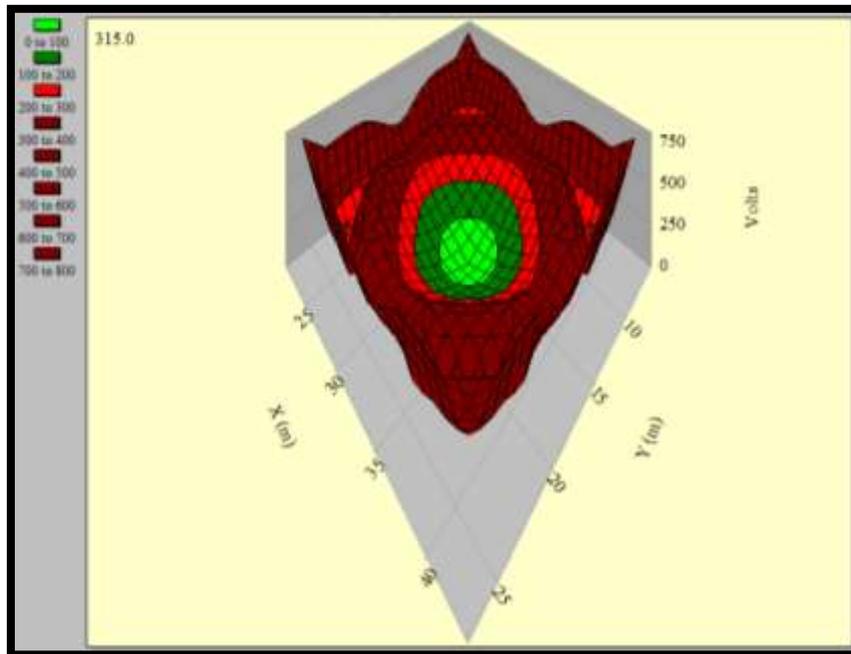


FIGURA 89: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA CUADRADA-CIRCULAR EN CAMPO

4.5.5. Voltaje de toque y paso en malla tipo rejilla

En la malla tipo rejilla, la zona de color verde claro, se aminora significativamente, aumenta el área de los voltajes elevados hacia el interior de la malla. Ver Fig. 90

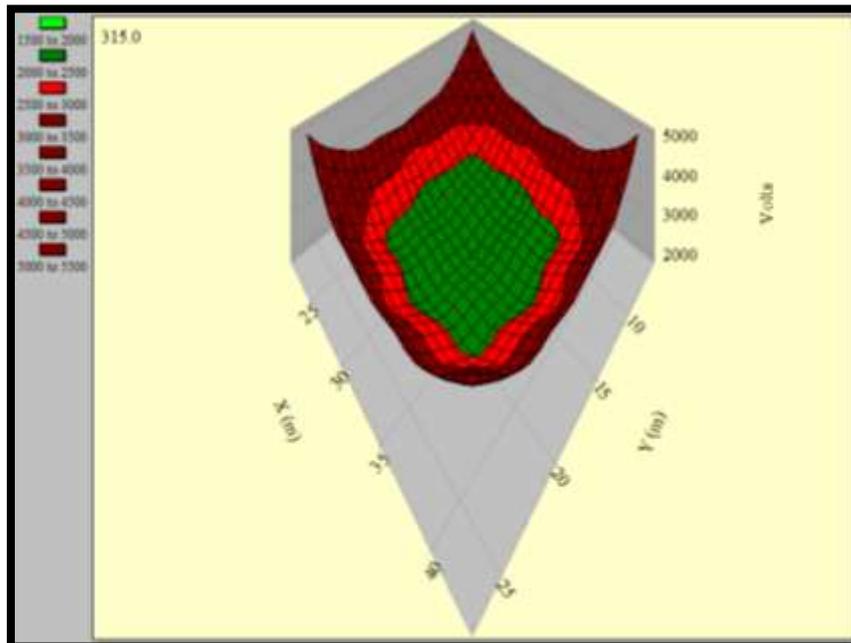


FIGURA 90: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE TOQUE EN MALLA TIPO REJILLA EN CAMPO

En la distribución de voltaje de paso, presenciamos que en el centro de la malla las zonas de color verde oscuro se encuentran en disposición de cuadrícula, rodeada de zonas color verde claro, además en las esquinas los voltajes elevados obtienen más área hacia el interior de la malla. Ver Fig. 91

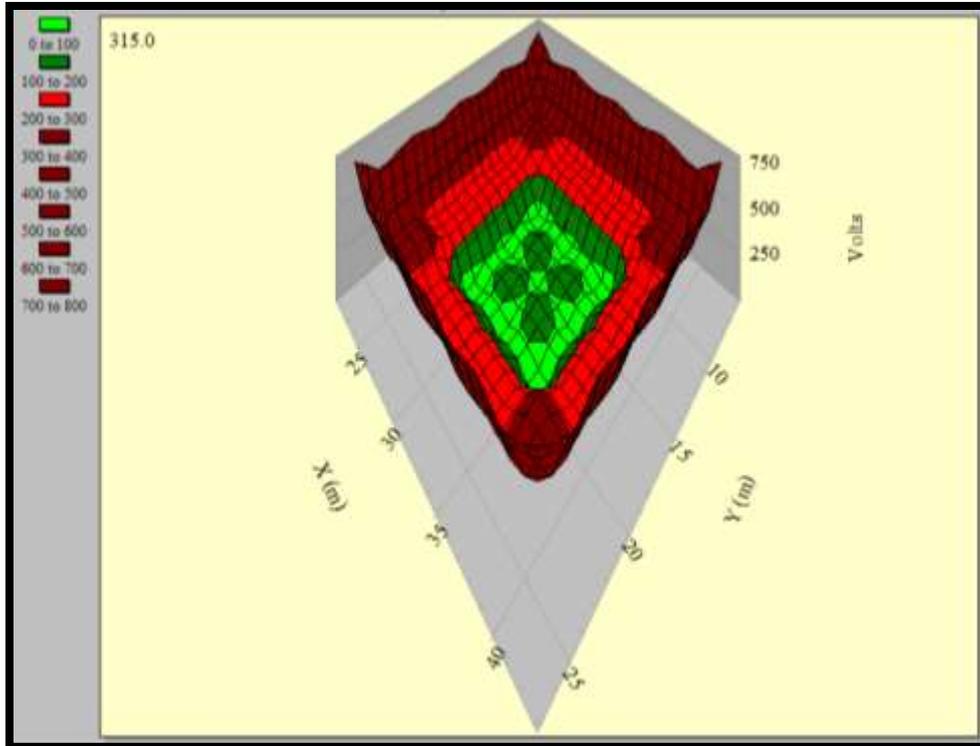


FIGURA 91: DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE DE PASO EN MALLA TIPO REJILLA EN CAMPO

4.6. Resumen de datos finales

A continuación analizaremos las tablas de los datos obtenidos en las prácticas en el tanque electrolítico, ETAP y campo.

TABLA 19. ELEVACIÓN DEL POTENCIAL DE MALLA Y RESISTENCIA DEL SPT DEL MODELADO DE UN ESTRATO

Configuración de malla	1 Capa – Tanque Electrolito Sin electrolito		1 Capa – ETAP Sin Electrolito		1 Capa – Tanque Electrolito Con electrolito		1 Capa – ETAP Con Electrolito	
	GPR (kV)	Rg (Ω)	GPR (kV)	Rg (Ω)	GPR (kV)	Rg (Ω)	GPR (kV)	Rg (Ω)
Triangular	12,45	191,54	10,35	158,76	11,76	7,66	9,8	6,35
Cuadrada	12,41	155,13	11,59	144,47	11,48	4,77	10,74	4,443
Circular	12,35	145,29	12,21	135,27	11,72	7,32	10,32	6,43
Cuadrada-Circular	12,33	117,43	11,64	105,53	10,87	3,3	9,79	2,97
Rejilla	12,41	107,87	11,77	97,81	10,99	3,28	9,99	2,97

En la tabla 19, observamos la elevación del potencial de la malla calculada con y sin electrolito en el modelado de una capa, en el cual definimos que la malla que nos ofrece una baja resistencia del sistema de puesta de tierra es la tipo rejilla, seguida de la cuadrada circular, debido a longitud del conductor que se ha utilizado y el área que abarca cada malla, estando ambas a la profundidad de 1m.

TABLA 20. ELEVACIÓN DEL POTENCIAL DE MALLA Y RESISTENCIA DEL SPT DEL MODELADO DE DOS ESTRATO

Configuración de malla	2 Capa – Tanque Electrolito Sin electrolito		2 Capa – ETAP Sin Electrolito		2 Capa – Campo	
	GPR (kV)	Rg (Ω)	GPR (kV)	Rg (Ω)	GPR (kV)	Rg (Ω)
Triangular	11,57	72,31	11,56	72,095	12,15	165,8
Cuadrada	11,4	67,06	11,35	66,574	11,79	163,7
Circular	11,63	72,69	11,61	72,362	12,21	121,8
Cuadrada-Circular	11,64	68,47	11,61	68,12	12,17	98
Rejilla	11,6	68,24	11,51	67,549	12,41	54,6



En la tabla 20, visualizamos la elevación del potencial de la malla calculada con y sin electrolito en el modelado de dos capas, en el cual la malla tipo rejilla sigue siendo la más óptima para su implementación tanto en la resistencias del sistema de puesta a tierra y en la distribución de voltajes.

CONCLUSIONES

- El criterio de usar diversos tipos de configuraciones de malla y dar un tratamiento al terreno, depende de la factibilidad de obtener los recursos. Se debe aclarar que la distribución de los voltajes a las que puede estar expuesta una persona, depende de la configuraciones a emplearse, es decir, no siempre se debe fijar en quién ofrezca la menor resistencia, sino más bien el que otorgue la menor probabilidad que una persona este expuesta a un voltaje por encima de lo permisible.
- La aplicación del método de un tanque electrolítico para mediciones, está enmarcado a analizar la distribución de voltajes de toque y paso en diferentes configuraciones de malla, sobretodo en mallas que no posean una forma geométrica singular, y es un impedimento llevarla a un software, para su análisis.
- Al realizar las mediciones y comparaciones de los voltajes de paso, toque y GPR entre las diferentes configuraciones de mallas de puesta a tierra analizadas, podemos concluir que la malla circular posee una mejor distribución de voltajes que las mallas triangular y cuadrada al no poseer puntas donde se producen picos de voltaje. Pero su debilidad son los voltajes altos en el centro del círculo. Sin embargo la malla que presentó los niveles de voltajes de toque y paso más bajos y por lo tanto es la que presenta mayor seguridad es la tipo rejilla.
- Al colocar aditivo se obtienen niveles de voltaje de toque y paso más bajos en todas las configuraciones de mallas. Sin embargo la forma de la distribución de los voltajes de cada tipo de malla no cambia.

RECOMENDACIONES

- La obtención de datos mediante el método del campo electrolítico, no nos permite encontrar la resistividad de manera teórica de cada capa en el modelo de 2 capas, debido a que en los tanques se simula un terreno uniforme, por lo tanto, no es aplicable la utilización del mismo.
- Colocar la capa superficial ayuda a disminuir los niveles de voltaje de toque y paso, debido a que aíslan a la persona del terreno natural, manteniendo el terreno húmedo por debajo de la capa superficial. Esta capa superficial pasa a formar parte de la resistencia de la persona.
- Al realizar las mediciones de los voltajes de toque y paso en de las mallas a tierra dentro del tanque electrolítico, se debe mantener estable el nivel de profundidad a la que están colocadas las mismas, ya que al moverlas se afectan las mediciones obtenidas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Juárez Cervantes, *Instalaciones eléctricas en Alta Tensión. Tomo II*. 1era Edición, Distrito Federal México: Instituto Politécnico Nacional, 2010.
- [2] Boix Oriol, Córcoles Felipe, Sainz Luis y J. Suelves Francesc., *Tecnología eléctrica*, Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, 2da. Edición, Barcelona: Cano Pina Editorial Ceysa, 2009, pp. 20-40.
- [3] *Lightning Protection Guide*, 3rd Edition, Dehn und Söhne und Co.KG, Neumarkt - Alemania, 2014, pp. 118-128.
- [4] *Guía de la medición de tierra*, 2da Edición, Chauvin Arnoux Group S.A, Barcelona, 2015.
- [5] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, *Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias*, *Boletín del Estado*, n° 139, pp. 43662 – 43676, Junio, 2014.
- [6] Gilberto Enríquez Harper, *Elementos de diseño de subestaciones eléctricas*, 2da. Edición, México: Noriega Editorial Limusa, 2005, pp. 488-492.
- [7] *Manual de uso de soldadura exotérmica APLIWELD*, Aplicaciones Tecnológicas – Tecnología de protección contra el rayo, Valencia-España, 2013.
- [8] Irene Calle Millán, *Montaje y mantenimiento de instalaciones eléctricas de interior*, 1era Edición, Andalucía: Editorial Innovación y Cuanlificación, 2012
- [9] *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*, IEEE Std 81, 2012.
- [10] Martínez Velasco, *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*, Madrid: García Jurado Editorial McGraw-Hill/Interamericana de España, 2013.
- [11] S. D. Buba, W. F. Wan Ahmad, M. Z. A. Ab Kadir, C. Gomes, J. Jasni, M. Osman, "Design of distribution substation earth grid in high resistivity soil using CDEGS", Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO) 2014 IEEE 8th International, pp. 508-513, 2014.
- [12] Narciso Moreno y Pedro Martínez, *RCE: Reglamento sobre centrales eléctricas, subestaciones y centros de Transformación*, Madrid: Editorial Tébar, 2009.

- [13] José de la Cruz, Jacinto Gallego y Tarsicio Trujillo, *Instalaciones de puesta a tierra y protección de sistemas eléctricos*, Barcelona: Editorial Ediciones Experiencia S.L., 2014.
- [14] Rubén Roberto Levy, *Las puestas a tierra: criterios de seguridad eléctrica y técnica*, 2da. Edición, Argentina: Jorge Sarmiento Editorial Universitas, 2010.
- [15] José Manuel Sánchez Moncayo, *Operaciones de montaje de apoyos en redes eléctricas aéreas*, 1era Edición, Málaga: Editorial Innovación y Cualificación, S.L., 2012.
- [16] Rodolfo Dufo, José Bernal, José Yusta y Daniel Millán, *Trabajos y maniobras en alta tensión*, 1era Edición, Madrid: Editorial Paraninfo, 2012.
- [17] Antonio Conejo, José Arroyo, Federico Milano, *Instalaciones eléctricas*, Madrid: Carmelo Sánchez Editorial McGraw-Hill/Interamericana de España, 2007
- [18] *Sistema de tierra para plantas y subestaciones eléctricas*, NRF-011-CFE, 2004
- [19] Manual Fluke 1625-2 Earth/Ground Tester, FLUKE, Washington – Estados Unidos, 2014.
- [20] Moreno Ospina, Valencia Velásquez y Cárdenas Agudelo, *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos*, 1era Edición, Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2007.
- [21] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Std 80, 2013.
- [22] *Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE Std. 142, 2007.
- [23] José Ramírez Castaño y Eduardo Cano Plata, *Sistemas de puesta a tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*, 1era Edición, Colombia: Editorial Blanecolor Ltda, 2010.
- [24] Saúl Holguín, Feliciano Montoya y Erasmo Flores, *Fundamentos de Electroquímica*, 1era Edición, México: Instituto Politécnico Nacional, 2010.

ANEXOS

ANEXO 1. FLUKE 373 PINZA AMPERIMÉTRICA DE CA

Corriente CA	
Rango	600,0 A
Resolución	0,1 A
Exactitud	2 % ± 5 dígitos (48 a 62 Hz)
Factor de cresta (50/60 Hz)	2,5 a 600 A
Tensión CA	
Rango	600,0 V
Resolución	0,1 V
Exactitud	1,0 % ± 5 dígitos (48 a 62 Hz)
Tensión CC	
Rango	600,0 V
Resolución	0,1 V
Exactitud	1 % ± 5 dígitos
Resistencia	
Rango	600,0 Ω/6000 Ω
Resolución	0,1 Ω/1 Ω
Exactitud	1 % ± 5 dígitos
Señal acústica de continuidad	30 Ω
Capacidad	
Rango	10,0 a 100,0 μF/1.000 μF
Resolución	0,1 μF / 1 μF
Exactitud	1,9% ± 2 dígitos
Especificaciones mecánicas	
Tamaño (largo x ancho x alto)	232 mm x 85 mm x 45 mm
Peso	370 g
Especificaciones ambientales	
Temperatura de funcionamiento	-10 °C a +50 °C
Temperatura de almacenamiento	-40 °C a +60 °C

Humedad de funcionamiento	Sin condensación (< 10 °C) ≤ 90 % HR (a una temperatura de 10 °C hasta 30 °C) ≤ 75 % HR (a una temperatura de 30 °C hasta 40 °C) ≤ 45 % HR (a una temperatura de 40 °C hasta 50 °C) (sin condensación)
Altitud de funcionamiento	3.000 metros
Altitud de almacenamiento	12.000 metros
EMI, EMC	Cumple todos los requisitos aplicables de la norma EN61326-1:2006
Coefficientes de temperatura	sumar 0,1 x la precisión especificada por cada grado centígrado por arriba de 28 °C o por debajo de 18 °C.
Conformidad de seguridad	ANSI/ISA S82.02.01:2004 CAN/CSA-C22.2 No. 61010-1-04 IEC/EN 61010-1:2001, 600V CAT III, 300V CAT IV Grado de contaminación 2 EN/IEC 61010-2-32:2002 EN/IEC 61010-031:2002/A1:2008 
Aprobaciones de agencias regulatorias	
Baterías	2 AA, NEDA 15A, IEC LR6

ANEXO 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE COMPROBADOR DE PUESTA A TIERRA 1625-2 GEO DE FLUKE

General	
Memoria	Memoria interna con capacidad de almacenamiento de hasta 1.500 registros, a la que se puede acceder a través de un puerto USB
Función de medición	Frecuencia e interferencia de voltaje, resistencia de tierra de 3 y 4 hilos con o sin transformador de corriente con sujetador, resistencia de 2 hilos con CA y de 2 y 4 hilos con CC
Pantalla	Pantalla de cristal líquido de 4 dígitos (2.999 dígitos) y 7 segmentos con visibilidad mejorada
Funcionamiento	Selector giratorio central y teclas de función
Rango de temperatura	
Temperatura de trabajo	-10 °C a 50 °C (14 °F a 122 °F)
Temperatura de almacenamiento	-30 a 60 °C (-22 a 140 °F)

Coefficiente de temperaturas	$\pm 0,1$ % de lectura/ $^{\circ}\text{C}$ <18 $^{\circ}\text{C}$ >28 $^{\circ}\text{C}$
Tipo de protección	Estuche con clasificación IP56 y tapa del compartimento de la batería con clasificación IP40 según la norma EN60529
Voltaje máx.	Advertencia: Toma de "pinza" a toma E, ES, S o H $U_{\text{rms}} = 0$ V Tomas E, ES, S o H entre sí en cualquier combinación, máx. $U_{\text{rms}} = 250$ V (en relación con el uso indebido)
Seguridad	Protección mediante aislamiento doble o reforzado. Máx. 50 V a tierra según IEC61010-1. CAT II de 300 V; grado de contaminación 2
Estándar de calidad	Desarrollado, diseñado y fabricado para cumplir con los requisitos de la norma DIN ISO 9001.
Influencia del campo externo	Cumple con la norma DIN 43780 (8/76)
Alimentación auxiliar	6 baterías alcalinas de 1,5 V (IEC LR6 o tipo AA)
Vida útil de la batería	Con IEC LR6/tipo AA: tipo 3.000 medidas ($R_{\text{E}} + R_{\text{H}} \leq 1$ k Ω) Con IEC LR6/tipo AA: tipo 6.000 medidas ($R_{\text{E}} + R_{\text{H}} > 10$ k Ω)
Dimensiones (ancho x alto x profundidad)	250 mm x 133 mm x 187 mm (9,75 pulg. x 5,25 pulg. x 7,35 pulg.)
Peso	$\leq 1,1$ kg (2,43 lb) sin accesorios 7,6 kg (16,8 lb) con accesorios y baterías en el estuche
Material del estuche	Poliéster
Medición de voltaje de interferencia CC + CA (U_{ST})	
Límites de error de la medición: método	Rectificación de onda completa
Rango de medición	1 V a 50 V
Rango de la pantalla	0 V a 50 V
Resolución	0,1 V
Rango de frecuencia	CC/CA de 45 Hz a 400 Hz, senoidal
Precisión	\pm (5% de lectura + 5 dígitos)
Secuencia de medición	Aprox. 4 mediciones/s
Resistencia interna	Aprox. 1,5 M Ω
Sobrecarga máxima	$U_{\text{rms}} = 250$ V
Medición de la frecuencia de interferencia (F)	

Límites de error de la medición: método	Medición del periodo de oscilación del voltaje de interferencia
Rango de medición	6,0 Hz a 400 Hz
Rango de la pantalla	16 Hz a 299,9 Hz a 999 Hz
Resolución	0,1 Hz a 1 Hz
Rango	1 V a 50 V
Precisión	± (1% de lectura + 2 dígitos)
Resistencia a tierra (RE)	
Método de medición	Medición de la corriente y el voltaje con una sonda según la norma IEC61557-5
Voltaje del circuito abierto	20/48 V CA
Corriente en cortocircuito	250 mA CA
Frecuencia de medición	94, 105, 111, 128 Hz seleccionada manual o automáticamente. (AFC) 55 Hz en función R*
Rechazo del ruido	120 dB (16 2/3, 50, 60, 400 Hz)
Sobrecarga máxima	$U_{rms} = 250 V$

Especificaciones de mediciones eléctricas				
Error intrínseco o cantidad de influencia	Condiciones de referencia o rango de operación especificado	Código de designación	Requisitos o prueba de acuerdo con las partes pertinentes de IEC 1557	Tipo de prueba
Error intrínseco	Condiciones de referencia	A	Sección 5, 6.1	R
Cargo	Posición de referencia ± 90°	E1	Sección 1, 4.2	R
Voltaje de alimentación	Con los límites establecidos por el fabricante	E2	Sección 1, 4.2, 4.3	R
Temperatura	0 °C y 35 °C	E3	Sección 1, 4.2	T
Voltaje de interferencias en serie	Consulte las secciones 4.2 y 4.3	E4	Sección 5, 4.2, 4.3	T
Resistencia de las sondas y los electrodos	0 a 100 x R _A pero ≤ 50 kΩ	E5	Sección 5, 4.3	T

de puesta a tierra auxiliares				
Frecuencia del sistema	99 % al 101 % de la frecuencia nominal	E7	Sección 5, 4.3	T
Voltaje del sistema	85 % a 110 % del voltaje nominal	E8	Sección 5, 4.3	T
Error de operación	$B = \pm(A + 1,15 \sqrt{E_1^2 E_2^2 E_3^2 E_4^2 E_5^2 E_6^2})$		Sección 5, 4.3	R
A = error intrínseco En = variaciones R = prueba de rutina T = Tipo de prueba		B[%] = \pm Valor fiduciario x 100%		
Rango de medición	0,020 Ω a 300 k Ω			
Rango de la pantalla	0,001 Ω a 2,999 Ω			
	3,00 Ω a 29,99 Ω			
	30,0 Ω a 299,9 Ω			
	0,300 k Ω a 2,999 k Ω			
	3,00 k Ω a 29,99 k Ω			
	30,0 k Ω a 299,9 k Ω			
Resolución	0,001 Ω			
	0,01 Ω			
	0,1 Ω			
	1 Ω			
	10 Ω			
	100 Ω			
Precisión	\pm (2 % de lectura + 2 dígitos)			
Error de operación	\pm (5 % de lectura + 5 dígitos)			
Tiempo de medición	Típica: 8 segundos con una frecuencia fija de 30 seg. máx. con AFC y ciclo completo de todas las frecuencias de medición			
Error adicional debido a resistencia de la sonda y del electrodo de puesta a tierra	$R_H(R_S + 2.000 \Omega)/R_E \times 1,25 \times 10^{-6}\% + 5$ dígitos			
Error de medición de R_H y R_S	Tipo 10% de $R_E + R_S + R_H$			

Resistencia máxima de la sonda	$\leq 1 \text{ M}\Omega$
Resistencia máx. del electrodo de puesta a tierra auxiliar	$\leq 1 \text{ M}\Omega$
<p>Comprobación automática si el error se encuentra dentro de los límites requeridos por la norma IEC61557-5.</p> <p>Si, tras una medición de sonda, un electrodo de masa auxiliar, y resistencia de la conexión a tierra, se asume un error de medición superior al 30 % debido a las condiciones que influyen en ella, la pantalla muestra un símbolo de advertencia y un aviso de que la SR o la RH son demasiado altas.</p>	

Cambio automático de la resolución de medición en función de la resistencia del electrodo de puesta a tierra auxiliar R_H	
RH con $U_{\text{medida}} = 48 \text{ V}$	$< 300 \Omega$
	$< 6 \Omega$
	$< 60 \Omega$
	$< 600 \Omega$
RH con $U_{\text{medida}} = 20 \text{ V}$	$< 250 \Omega$
	$< 2,5 \text{ k}\Omega$
	$< 25 \text{ k}\Omega$
	$< 250 \text{ k}\Omega$
Resolución	1 m Ω
	10 m Ω
	100 m Ω
	1 Ω

Medición selectiva de la resistencia de tierra (R_E Pinza)	
Método de medición	Medición de la corriente y el voltaje con sonda de acuerdo con la norma EN61557-5 y medición de corriente en la derivación individual con transformador de corriente adicional

	(patente en trámite).
Voltaje del circuito abierto	20/48 V CA
Corriente en cortocircuito	250 mA CA
Frecuencia de medición	94, 105, 111, 128 Hz seleccionada manual o automáticamente (AFC), 55 Hz (R*)
Rechazo del ruido	120 dB (162/3, 50, 60, 400 Hz)
Sobrecarga máxima	Máx. $U_{rms} = 250$ V (la medición no se iniciará)
Rango de medición	0,020 Ω a 300 k Ω
Rango de la pantalla	0,001 Ω a 2,999 Ω
	3,00 Ω a 29,99 Ω
	30,0 Ω a 299,9 Ω
	0,300 k Ω a 2,999 k Ω
	3,00 k Ω a 29,99 k Ω
Resolución	0,001 Ω
	0,01 Ω
	0,1 Ω
	1 Ω
	10 Ω
Precisión	\pm (7 % de lectura + 2 dígitos)
Error de operación	\pm (10 % de lectura + 5 dígitos)
Error adicional debido a resistencia de la sonda y del electrodo de puesta a tierra auxiliar	$R_H(R_S + 2.000 \Omega)/R_{ETOTAL} \times 1,25 \times 10^{-6}\% + 5$ dígitos
Error de medición de R_H y R_S	Tipo de 10 % de $R_{ETOTAL} + R_S + R_H$

Tiempo de medición	Tipo 8 seg. con una frecuencia fija de 30 seg. máx. con AFC y ciclo completo de todas las frecuencias de medición.	
Corriente mínima en la derivación individual que se va a medir	0,5 mA	Con transformador (1000:1)
	0,1 mA	Con transformador (200:1)
Corriente de interferencia máx. a través del transformador	3:00 AM	Con transformador (1000:1)
* Con pinzas amperimétricas o transformadores recomendados.		

Medición de la resistencia (R~)	
Método de medición	Medición de corriente y voltaje
Medición de voltaje	20 V CA, pulso cuadrado
Corriente en cortocircuito	> 250 mA CA
Frecuencia de medición	94, 105, 111, 128 Hz seleccionada manual o automáticamente (AFC)
Rango de medición	0,020 Ω a 300 k Ω
Rango de la pantalla	0,001 Ω a 2,999 Ω
	3,00 Ω a 29,99 Ω
	30,0 Ω a 299,9 Ω
	300 Ω a 2999 Ω
	3,00 k Ω a 29,99 k Ω
	30,0 k Ω a 299,9 k Ω
Resolución	0,001 Ω
	0,01 Ω
	0,1 Ω
	1 Ω
	10 Ω

	100 Ω
Precisión	\pm (2 % de lectura + 2 dígitos)
Error de operación	\pm (5 % de lectura + 5 dígitos)
Tiempo de medición	Típica: 6 segundos
Voltaje de máximo de interferencia	24 V, con mediciones de voltaje superiores no se iniciará
Sobrecarga máx.	U_{rms} máx. = 250 V

Medición de la resistencia (R CC)	
Método de medición	Se puede medir la corriente y el voltaje según la norma IEC61557-4
Medición de voltaje	20 V CC
Corriente en cortocircuito	250 mA CC
Formación del valor de medición	Con cables de medición de 4 hilos en H, S, ES se puede ampliar sin error adicional. Las resistencias > 1 Ω en el cable E pueden provocar errores adicionales de 5 m Ω/Ω .
Rango de medición	0,020 Ω a 300 k Ω
Rango de la pantalla	0,001 Ω a 2,999 Ω
	3,00 Ω a 29,99 Ω
	30,0 Ω a 299,9 Ω
	300 Ω a 2999 Ω
	3,0 k Ω a 29,99 k Ω
	30,0 k Ω a 299,9 k Ω
Resolución	0,001 Ω
	0,01 Ω
	0,1 Ω
	1 Ω
	10 Ω
	100 Ω
Precisión	\pm (2 % de lectura + 2 dígitos)
Error de operación	\pm (5 % de lectura + 5 dígitos)
Secuencia de medición	Aprox. 2 mediciones/s

Tiempo de medición	Típica: 4 segundos incl. inversión de polaridad (2 o 4 hilos)
Voltaje máximo de interferencia	≤ 3 V CA o CC, con voltajes más altos no se iniciará la medición
Inductividad máxima	2 Henry
Sobrecarga máxima	$U_{rms} = 250$ V

Compensación de la resistencia de los conductores (R_K)

Compensación de la resistencia de los conductores (R_K) se puede cambiar en las funciones R_E 3 hilos, R_E 4 hilos (pinzas), R CA, y R CC 2 hilos

Formación del valor de medición	$R_{pantalla} = R_{medida} - R_{compensada}^*$
--	--

* Valor de la entrada del punto de referencia $R_K = 0 \Omega$, variable de 0 a 29,99 Ω mediante un ajuste de la medición.

Medición de bucle de tierra sin picas (dos pinzas sin picas)

Posición del selector	RA a 4 hilos (dos pinzas sin picas)
Resolución	0,001 Ω a 0,1 Ω
Rango de medición	0,02 Ω a 199,9 Ω
Precisión	\pm (7 % de lectura + 3 dígitos)
Error de operación	\pm (10 % de lectura + 5 dígitos)
Medición de voltaje	$V_m = 48$ V CA (principal)
Frecuencia de medición	128 Hz
Corriente de ruido (IEXT)	Máx. IEXT = 10 A (ca) (RA < 20 Ω)
	Máx. IEXT = 2 A (ca) (RA > 20 Ω)
<p>Fundamento de medición: Medición de resistencia sin picas en bucles cerrados con dos transformadores de corriente. Selección automática de rangos. La información relacionada con las mediciones del bucle de tierra sin picas será válida solo cuando se use en conjunto con las pinzas amperimétricas recomendadas a la distancia mínima especificada.</p>	

ANEXO 3. INSTALACIÓN DE MALLA EN TERRENO





ANEXO 4. MEDICIÓN DE 4 POLOS MEDIANTE EL MÉTODO DE WENNER



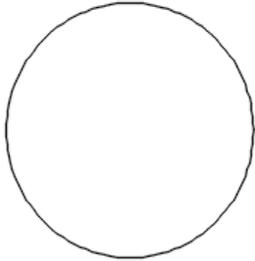


ANEXO 5. PRUEBAS DE CAIDA DE POTENCIAL DEL 62%

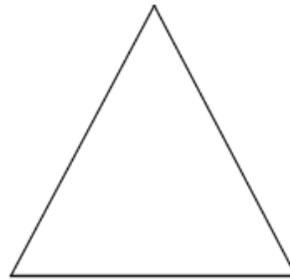
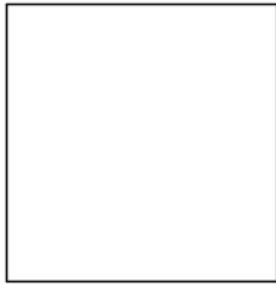




ANEXO 6. TIPOS DE CONFIGURACIONES DE MALLAS DE TIERRA.

Anillo Circular	
	
<p style="text-align: center;">UNE EN 62305-3 - 2006 (IEC 62305-3).</p> $R = \frac{\rho}{\pi^2 d} * Ln\left(\frac{\pi d}{a}\right)$ <p>d= diámetro del anillo o área equivalente ρ = resistividad del electrolito a= radio de conductor</p>	<p style="text-align: center;">IEEE Std. 80-2013 – Método Sverak</p> $R_s = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$ <p>LT = Longitud total de conductores enterrados en m. ρ = Resistividad del terreno Ω-m. A = Área ocupada por la malla de tierra m². h = Profundidad de la malla en m.</p> <p style="text-align: center;">IEEE Std. 142-2007</p> $R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} * (Ln\left(\frac{8D}{d}\right) + Ln\left(\frac{4D}{h}\right))$ <p>D= diámetro del anillo h= profundidad del electrodo d = diametro del conductor ρ = resistividad del electrolito</p>

Anillo Cuadrado y Triangular



UNE EN 62305-3 - 2006

(IEC 62305-3).

$$R = \frac{2 * \rho}{3 * d}$$

d = diámetro del anillo o área equivalente

ρ = resistividad del electrolito

En dimensiones rectangulares o poligonales de la malla de tierra:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

IEEE Std. 80-2013 – Método Severak

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

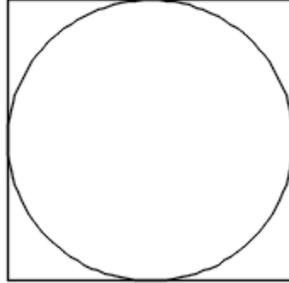
LT = Longitud total de conductores enterrados en m.

ρ = Resistividad del terreno Ω -m.

A = Área ocupada por la malla de tierra m².

h = Profundidad de la malla en m.

Anillo Cuadrado - Circular



IEEE Std. 80-2013 – Método Sverak

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

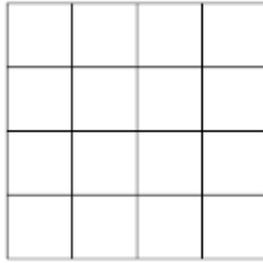
LT = Longitud total de conductores enterrados en m.

ρ = Resistividad del terreno Ω -m.

A = Área ocupada por la malla de tierra m².

h = Profundidad de la malla en m.

Rejilla



IEEE Std. 80-2013 – Método Sverak

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

L_T = Longitud total de conductores enterrados en m.

ρ = Resistividad del terreno Ω -m.

A = Área ocupada por la malla de tierra m^2 .

h = Profundidad de la malla en m.

IEEE Std. 142-2007

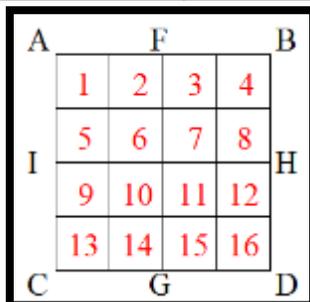
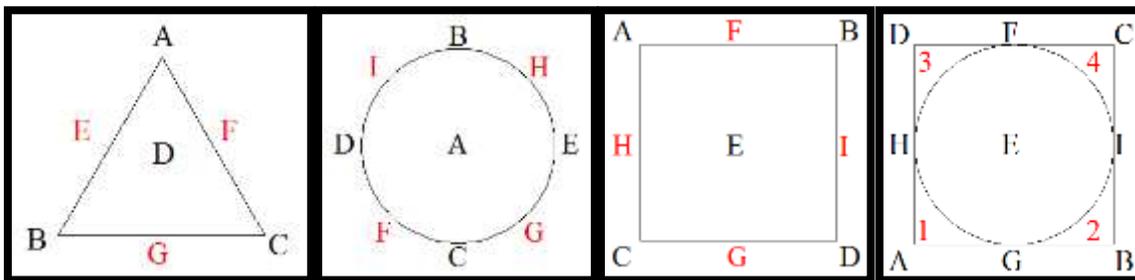
$$R = \frac{\rho}{4y} + \frac{\rho}{L}$$

L = longitud total de los conductores enterrados

y = radio de un círculo con la misma superficie que el área cubierta por la malla.

ρ = resistividad del electrolito

ANEXO 7. VALORES DE TOQUE Y PASO DE UNA CAPA MEDIDOS EN EL TANQUE ELECTROLITICO.



Voltajes de Toque Sin Electrolito – Modelo 1 Capa [V]									
Malla	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Triangular	57,6	78,5	74,9	47,7	60,6	47,9	48,9		
Circular	58	53,5	54,6	60,1	65,2				
Cuadrada	64	55	64,5	65	60	38,3	32,5	66,5	70,6
Cuadrada-Circular	55,7	66,2	70,4	71,6	48,6	35,3	36,9	56,6	60,5
Rejilla	58,6	58,6	52,8	63,4		49,4	46,4	55,3	55,4

Voltajes de Toque Con Electrolito – Modelo 1 Capa [V]									
Malla	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Triangular	75,9	65,7	74,5	45,4	70,3	68,1	65,6		
Circular	60	63,5	64,5	81,5	80,5				
Cuadrada	73,6	78,5	74	76,9	70	60	60,5	67,8	72,9
Cuadrada-Circular	61,2	67,7	54,8	48,4	41,6	33,9	33,1	52,2	53,5
Rejilla	65,2	67,2	61,7	66		61,4	59,7	65	58,6

Voltajes de Paso Internos de la Malla Sin Electrolito – Modelo 1 Capa [V]																
Malla	A	B	C	D	E	F	G	H	I							
Triangular	3,9	4,6	3,5	3,7	4,9	7,2	4,1									
Circular	2,4	8,9	13,6	10,9	12,1	9,6	9,7	8,2	9,4							
Cuadrada	16,6	16,5	14,9	14,1	3,6	8,9	9,1	13,1	8,6							
Cuadrada-Circular	13,2	14,6	13,9	13,2	0,4	12,8	13,3	11,9	12,9							
Voltajes de Paso Internos de la Malla Sin Electrolito – Modelo 1 Capa [V]																
Malla	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Rejilla	2,9	1,2	0,2	2,2	3,3	1	0,2	2	3,,8	0,9	0,2	2,1	3,2	0,5	0,2	2,4

Voltajes de Paso Internos de la Malla Con Electrolito – Modelo 1 Capa [V]																
Malla	A	B	C	D	E	F	G	H	I							
Triangular	4,1	4,2	4,5	2	5,9	3,8	3,2									
Circular	2,7	11	13,4	12	7,2	12	11,8	8,3	12,8							
Cuadrada	10	10,2	9,9	8,9	1,85	2,8	2,7	3,1	3,1							
Cuadrada-Circular	2,4	3,1	3	0,8	2,43	1,4	2,4	2,9	3,5							
Voltajes de Paso Internos de la Malla Con Electrolito – Modelo 1 Capa [V]																
Malla	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Rejilla	4,3	4,8	2,2	3,5	3,7	1,8	0,8	3	4,7	3,4	2,8	3,4	4,5	2,6	2,5	2,4