

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



TRABAJO DE GRADUACIÓN:

**APLICACIÓN DEL ELECTROMAGNETISMO COMPUTACIONAL  
AL CÁLCULO DE REDES A TIERRA**

PRESENTADO POR:

**ALLAN ARMANDO MONTENEGRO DOMINGUEZ**

**SALVADOR ANTONIO MONTES TOBAR**

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2018**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**MSc. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR:

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERON**

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título:

**APLICACIÓN DEL ELECTROMAGNETISMO COMPUTACIONAL AL  
CÁLCULO DE REDES A TIERRA.**

Presentado por:

**ALLAN ARMANDO MONTENEGRO DOMINGUEZ**

**SALVADOR ANTONIO MONTES TOBAR**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTÉZ**

SAN SALVADOR, MAYO 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

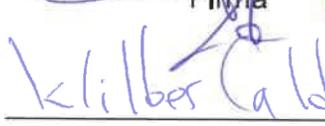
**ING. NUMA POMPILIO JIMENÉZ CORTÉZ**

## ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, jueves 19 de abril de 2018, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 5:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón  
Director

  
Firma

  
Firma



2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTEZ  
(Docente Asesor)

  
Firma

- MSC. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS

  
Firma

- MSC. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ

  
Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

APLICACIÓN DEL ELECTROMAGNETISMO COMPUTACIONAL AL CÁLCULO DE REDES DE TIERRA

A cargo de los Bachilleres:

- MONTENEGRO DOMÍNGUEZ ALLAN ARMANDO

- MONTES TOBAR SALVADOR ANTONIO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.0

( *nueve punto cero* )

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, agradecer a Dios por permitirme culminar de manera satisfactoria mis estudios universitarios, por protegerme a lo largo de tantos años y llenarme de muchas bendiciones.

A las personas más importantes de mi vida, que nada de esto fuese posible sin su apoyo incondicional a pesar de las adversidades vividas y quienes han hecho de mí la persona que soy, mis padres: María Milagro Tobar de Montes y José Porfirio Montes Hernández, las palabras no son suficientes para agradecerles, los amo. Agradezco a mi hermano: José Porfirio Montes Tobar, quien ha sido el mejor hermano que uno pueda tener apoyándome siempre, le deseo muchos éxitos en carrera y su vida.

A toda mi familia que siempre ha estado apoyándome y dándome ánimos a seguir adelante, en especial a mis tíos: Raúl Montes y Daneli Montes, mis primos, abuelos, gracias a todos.

A todos mis amigos y personas que me han motivado a culminar mis estudios y brindado su apoyo siempre, en especial a: Alan Cesar Rivas, es muy difícil mencionar a cada uno de ellos, pero se los agradezco infinitamente.

Especial agradecimiento a mi amigo y compañero Allan Montenegro, de quien he aprendido mucho y fue un excelente compañero desde que lo conocí, este trabajo no hubiese sido posible sin él y el buen equipo que formamos ¡Lo logramos!

Agradecimiento a Brenda López quien facilito información básica para la realización del presente trabajo de graduación.

A todos los compañeros y amigos con quienes he compartido clases y realizados trabajos a lo largo de la carrera, en especial a Isaías Chafoya, quien fue un buen compañero y amigo, apoyándonos en la realización del trabajo de graduación, se les agradece mucho.

Salvador Montes

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a Dios por estar conmigo dándome fuerzas en todo el proceso de convertirme en profesional, no solamente en el ámbito académico, sino también en todos los aspectos de la vida.

A una de las personas más importantes en mi vida, agradecer a mi madre Magda Luz Domínguez por todo su apoyo incondicional, sus consejos, su paciencia y ser mi maestra en varios aspectos en mi vida, es a quien dedico todo mi esfuerzo y éxito hasta el momento y todos los venideros.

A mis hermanos Andrea Montenegro y Kevin Guardado por su apoyo, su cariño y estar brindando atención desde la distancia y desearles lo mejor para su vida, solamente decir unas pocas palabras: los extraño y los quiero mucho.

A mis amigos Brenda López y Víctor Sagastume, por su apoyo, en especial por el aporte de información en la realización de este trabajo, siendo una de las bases en todo el trabajo de investigación.

Son demasiadas las personas que debo agradecer a lo largo de mi carrera, al final no se puede avanzar solo en todo este proceso universitario y aunque no mencione a todos, estoy agradecido de haber conocido a tanta gente, entre todos a mis amigos Dennys, Emerson, Ronald, Xavi, Manases y Juan por su amistad desde que entre a la carrera y estar pendiente, mostrando interés en todo el proceso, por todas las reuniones y mostrar su apoyo cuando de verdad necesitaba ayuda.

A mis amigos y compañeros de estudio en la carrera Ernesto Cerón, Byron Cantor e Isaías Chafoya, por aparecer en un punto adecuado donde necesitaba conocer gente con una misma proyección dentro de la carrera, brindar su ayuda, apoyo y consejos durante varias etapas de la carrera universitaria y de este proceso de investigación.

Siendo la carrera de ingeniería donde se exige mucho trabajo en equipo, quiero agradecer a mi compañero y amigo Salvador Montes, porque a pesar de todas las dificultades para realizar esta investigación, ha sido parte de uno de los mejores grupos de trabajo que he conformado a lo largo de mi carrera de ingeniería eléctrica.

A mis amigos de la infancia, los miembros de IEEE, miembros de ASEIE y a los que tuve oportunidad de impartirles laboratorios, gracias porque de todos aprendí y espero haberles enseñado algo también.

Allan Montenegro

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>14</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
<b>CAPÍTULO 1: GENERALIDADES</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Antecedentes</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Planteamiento del problema</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Justificación</b>	<b>17</b>
<b>1.4 Alcances y limitaciones</b>	<b>18</b>
1.4.1 Alcances	18
1.4.2 Limitaciones	18
<b>1.5 Metodología de investigación</b>	<b>19</b>
<b>1.6 Definiciones</b>	<b>20</b>
<b>1.7 Normas aplicadas</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO 2: REDES A TIERRA</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Objetivo de las puestas a tierra</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Condiciones de peligro</b>	<b>23</b>
<b>2.3 Electrodo de puesta a tierra</b>	<b>24</b>
<b>2.4 Rango de corriente tolerable</b>	<b>24</b>
<b>2.5 Criterios de voltajes tolerables</b>	<b>25</b>
<b>2.6 Acerca de la geo eléctrica electrotécnica</b>	<b>26</b>
<b>2.7 Definiciones físico-matemáticas fundamentales del campo eléctrico estacionario terrestre</b>	<b>27</b>
<b>CAPITULO 3: MÉTODO ELEMENTO FINITO APLICADO A REDES DE TIERRA</b>	<b>35</b>
<b>3.1 Aplicación del método de elementos finitos (MEF) en ingeniería eléctrica</b>	<b>35</b>
3.1.1 El método de elementos finitos	35
<b>3.2 Corriente de fuga</b>	<b>36</b>
<b>3.3 Resistencia mutua en suelo uniforme</b>	<b>38</b>
<b>3.4 Integral de Neumann</b>	<b>39</b>

<b>3.5 Segmentos paralelos no colineales</b>	<b>41</b>
<b>3.6 Segmentos de líneas colineales paralelas</b>	<b>42</b>
<b>3.7 Segmentos colineales perpendiculares</b>	<b>42</b>
<b>3.10 Cálculo del voltaje superficial</b>	<b>44</b>
<b>3.11 Análisis matemático de gradiente de potencial según IEEE 80- 86</b>	<b>45</b>
<b>3.12 Potencial de toque</b>	<b>48</b>
<b>3.13 Potencial de paso (1 metro)</b>	<b>48</b>
<b>3.14 Análisis gráfico de cuadrículas cuadradas sin varillas de tierra en suelo uniforme</b>	<b>48</b>
<b>3.15 Cálculo de resistencia de puesta a tierra</b>	<b>49</b>
<b>3.16 Ejemplo de la aplicación del método presentado por la IEEE 80-1986</b>	<b>49</b>
<b>3.17 Cálculo de Malla S4</b>	<b>52</b>
<b>CAPITULO 4: MEDICIONES A REDES DE TIERRA</b>	<b>55</b>
<b>4.1 Necesidad de las mediciones de potencial eléctrico</b>	<b>55</b>
<b>4.2 Objetivos de las mediciones de potenciales a tierra</b>	<b>55</b>
<b>4.3 Métodos de medición</b>	<b>56</b>
4.3.1 Arreglo de Wenner para medir resistividad del suelo	56
4.3.2 Caída de potencial (62%) para medir resistencia de puesta a tierra	57
4.3.3 Método de medición de potenciales superficiales con telurómetro convencional	57
4.3.4 Medición del GPR	58
<b>4.4 Equipo de medición</b>	<b>59</b>
<b>4.5 Sitios de medición</b>	<b>60</b>
<b>4.8 Resultados de mediciones en una varilla</b>	<b>60</b>
4.8.1 Datos del gradiente de potencial	61
4.8.2 Datos de potencial de toque	62
4.8.3 Datos de potencial de paso	62
<b>4.9 Resultado mediciones malla S1 con varillas</b>	<b>62</b>
4.9.1 Datos de gradiente de potencial	63
4.9.2 Datos de potencial de toque	64
4.9.3 Datos de potencial de paso	64
<b>4.10 Resultado de mediciones malla S4</b>	<b>65</b>
4.10.1 Datos del gradiente de potencial	65

4.10.2 Datos del potencial de toque-----	66
4.10.3 Datos de potencial de paso -----	67
<b>CAPITULO 5: ESTUDIO DE CASOS -----</b>	<b>68</b>
<b>5.1 Método de simulación en ETAP -----</b>	<b>68</b>
<b>5.2 Método de simulación en MATLAB-----</b>	<b>73</b>
5.2.1 Introducción a GUIDE. -----	74
<b>5.3 Método de simulación en R-PAT -----</b>	<b>76</b>
<b>5.4 Configuración electrodo (Varilla) -----</b>	<b>78</b>
5.4.1 Cálculo de potenciales mediante ETAP -----	78
5.4.2 Cálculo de potenciales mediante MATLAB -----	80
5.4.3 Análisis de resultados -----	81
<b>5.4 Configuración malla S1 con y sin varillas -----</b>	<b>82</b>
5.4.1 Cálculo de potenciales mediante ETAP -----	82
5.4.2 Cálculo de potenciales mediante MATLAB -----	85
5.4.3 Cálculo de potenciales mediante R-PAT -----	86
5.4.4 Análisis de resultados -----	86
<b>5.5 Configuración malla S4-----</b>	<b>87</b>
5.5.1 Cálculo de potenciales mediante ETAP -----	87
5.5.2 Cálculo de potenciales mediante MATLAB -----	90
5.5.3 Cálculo de potenciales mediante R-PAT -----	91
5.5.4 Análisis de resultados -----	91
<b>5.6 Configuración malla S25 -----</b>	<b>92</b>
5.6.1 Cálculo de potenciales mediante ETAP -----	92
5.6.2 Cálculo de potenciales mediante MATLAB -----	95
5.6.3 Cálculo de potenciales mediante R-PAT -----	96
5.6.4 Análisis de resultados -----	96
<b>5.7 Subestación Aguilares-----</b>	<b>97</b>
5.7.1 Simulación en R-PAT-----	98
5.7.2 Simulación de Matlab (AS-PotencialesSuperficiales)-----	99
5.7.3 Análisis de resultados -----	101
<b>OBSERVACIONES-----</b>	<b>102</b>
<b>CONCLUSIONES-----</b>	<b>103</b>
<b>RECOMENDACIONES -----</b>	<b>105</b>

<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>106</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>108</b>
<b>A.1 Fotos de las mediciones</b>	<b>108</b>
<b>A.2 Modelado del terreno (Arreglo de Wenner)</b>	<b>110</b>
<b>A.3 Guía de usuario del programa</b>	<b>111</b>
SECCION 1: PARA EMPEZAR	111
1.1 Introducción	111
1.2 Acerca de AS- PotencialesSuperficiales vol.1.0	111
1.3 Acerca del manual de usuario	112
1.4 Requisitos del sistema	112
1.5 Instalación	112
1.6 Como ejecutar el programa AS-PotencialesSuperficiales vol. 1.0 dentro del entorno MATLAB	113
SECCION 2: CONCEPTOS BASICOS	115
2.1 Introducción	115
2.2 Conceptos de puesta a tierras implícitos dentro del programa	115
2.3 Concepto básicos del modelado de puestas a tierras	116
2.4 Consideraciones para graficar los potenciales superficiales	117
2.7 Conceptos mostrados en las respuestas del programa	119
<b>SECCION 3: CONTROL DE BOTONES</b>	<b>120</b>
3.1 Introducción	120
3.2 Botones y opciones principales	120
3.3 Opciones y menús secundarios dentro del programa	125
<b>A.3 Funciones dentro del programa</b>	<b>126</b>

## INDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Desplazamiento de una carga puntual $Q$ en un campo electrostático $E$ ----	28
Fig. 2: Frontera entre dos medios de conductividad $\varepsilon_1$ y $\varepsilon_2$ -----	30
Fig. 3: Relación de las componentes tangenciales a las componentes normales de la intensidad de campo eléctrico-----	31
Fig. 4: Distribución de corriente normal del electrodo-tierra-----	32
Fig. 5: Esfera enterrada a una profundidad $t$ -----	32
Fig. 6: <b>(a)</b> Carga puntual y plano conductor a tierra; <b>(b)</b> configuración de imágenes y líneas de campo -----	33
Fig. 7: Electrodo puntual de corriente en la superficie de un terreno -----	34
Fig. 8: Ejemplo de numeración de segmentos en una malla S9 asimétrica. -----	37
Fig. 9: Resistencia mutua entre dos segmentos-----	40
Fig. 10: Relación de las resistencias mutuas de dos segmentos cada una en su plano y las proyecciones del segmento opuesto -----	40
Fig. 11: Relación de resistencias mutuas en un plano donde existen ambos cables y las proyecciones de los segmentos de cable -----	41
Fig. 12: Resistencia mutua entre dos segmentos paralelos no colineales.-----	42
Fig. 13: Resistencia mutua entre dos segmentos colineales perpendiculares -----	42
Fig. 14: Geometría para la derivación de $E_{x1}$ -----	45
Fig. 15: Distancias entre la línea central de la esquina de malla y conductores paralelos con sus imágenes -----	46
Fig. 16: Geometría para la derivación de $E_{yk}$ -----	47
Fig. 17: Porcentaje de potencial de malla -----	49
Fig. 18: Porcentaje de potencial de paso-----	49
Fig. 19: Conductores paralelos (formando malla S4), cálculo de 10 puntos superficiales. -----	50
Fig. 20: Perfil de gradiente de potencial IEEE Std 80-1986 -----	51
Fig. 21: Perfil de potencial de toque IEEE Std 80-1986 -----	51
Fig. 22: Perfil de potencial de paso IEEE Std 80-1986 -----	52
Fig. 23: Malla S4 calculada y valores introducidos en la hoja de cálculo -----	52
Fig. 24: Puntos a calcular (potencial) de la malla, ejemplo de cálculo de un punto $V_a$ -----	54
Fig. 25: <i>Grafica 3D del gradiente de potencial de una configuración S4 sin varillas</i> -----	54
Fig. 26: Distribución de gradiente de voltaje y potenciales de toque y paso-----	55
Fig. 27: Arreglo de Wenner-----	56
Fig. 28: Método de caída de potencial (62%) -----	57
Fig. 29: Ubicación de sondas de medición del Telurómetro para medición gradiente de potencial y potenciales de toque y paso-----	58
Fig. 30: Ubicación de sondas de medición del Telurómetro para medición de GPR -----	59

Fig. 31: Telurómetro modelo 6471 -----	60
Fig. 32: Varilla de 3 pies-----	61
Fig. 33: Mapeo de gradiente de potencial de una varilla -----	61
Fig. 34: Grafica de del potencial de toque lineal de una varilla -----	62
Fig. 35: Grafica del potencial de paso radial de una varilla-----	62
Fig. 36: Malla S1 de 3x3m con varillas-----	63
Fig. 37: Mapeo del gradiente de potencial de malla S1 con varillas -----	63
Fig. 38: Mapeo de potencial de toque de malla S1 con varillas -----	64
Fig. 39: Mapeo de potencial de paso de malla S1 con varillas -----	65
Fig. 40: Malla S4 de 5x5m-----	65
Fig. 41: Mapeo de gradiente de potencial de malla S4 -----	66
Fig. 42: Mapeo de potencial de toque de malla S4 -----	67
Fig. 43: Mapeo de potencial de paso de malla S4 -----	67
Fig. 44: Ventana one-line con un Ground Grid-----	69
Fig. 45: Ventana de selección del modelo -----	69
Fig. 46: Ventana de trabajo del Ground Grid Systems-----	70
Fig. 47: Ventana editor de conductores-----	70
Fig. 48: Ventana FEM Group Editor-----	71
Fig. 49: Ventana de Soil Editor -----	71
Fig. 50: Modo Ground-Grid Study -----	72
Fig. 51: Ventana GRD Study Case Editor-----	72
Fig. 52: Ventana Plot Selection -----	73
Fig. 53: Interfaz de MATLAB-----	74
Fig. 54: Interfaz de la aplicación GUIDE en MATLAB-----	75
Fig. 55: Modificación de resistividad del terreno-----	76
Fig. 56: Modificación de Datos de falla-----	76
Fig. 57: Modificación de datos de electrodos-----	77
Fig. 58: Datos de cuadrícula a modificar-----	77
Fig. 59: Geometría del terreno a modificar-----	77
Fig. 60: Capa de material superficial-----	77
Fig. 61: Factores de IG -----	78
Fig. 62: Diseño de electrodo (varilla) en el entorno de ETAP, y tipo de suelo homogéneo de $83.1 \Omega\text{-m}$ -----	78
Fig. 63: Parámetros de corriente para simulación en ETAP-----	78
Fig. 64: Respuesta de simulación en ETAP para una varilla-----	79
Fig. 65: Simulación en ETAP del gradiente de potencial de una varilla -----	79
Fig. 66: Simulación en ETAP de potencial de toque en una varilla-----	80
Fig. 67: Simulación en ETAP de potencial de paso en una varilla-----	80
Fig. 68: Resultados obtenidos mediante Matlab utilizando modelo de elementos finitos para una varilla de 3 pies -----	81

Fig. 69: Mapeo de potenciales en MATLAB (2) Gradiente de potencial, (3) Potencial de toque -----	81
Fig. 70: Diseño de la malla S1 con varillas en el entorno de ETAP, y tipo de suelo homogéneo de 83.3 $\Omega$ ·m-----	82
Fig. 71: Parámetros de corriente para simulación en ETAP-----	83
Fig. 72: Respuesta de simulación en ETAP para una malla S1 con varillas -----	83
Fig. 73: Simulación en ETAP del gradiente de potencial de una malla S1 con varillas -----	84
Fig. 74: Simulación en ETAP de potencial de toque para una malla S1 con varillas-----	84
Fig. 75: Simulación en ETAP de potencial de toque para una malla S1 con varillas-----	85
Fig. 76 Resultados obtenido mediante Matlab utilizando modelo de elementos finitos para una malla S1 sin varillas de 3x3m -----	85
Fig. 77: Mapeo de potenciales en MATLAB (2) Gradiente de potencial, (3) Potencial de toque -----	86
Fig. 78: Resultados de malla S1 de 3x3m con varillas, mediante R-PAT-----	86
Fig. 79: Diseño de la malla S4 en el entorno de ETAP, y tipo de suelo homogéneo de 50 $\Omega$ ·m -----	88
Fig. 80: Ventana de configuración de datos de corriente para una malla S4 -----	88
Fig. 81: Resultados de parámetros básicos de malla S4-----	88
Fig. 82: Simulación en ETAP del gradiente de potencial para una malla S4 -----	89
Fig. 83: Simulación en ETAP de potencial de toque para una malla S4 -----	89
Fig. 84: Simulación en ETAP de potencial de paso para una malla S4 -----	90
Fig. 85: Resultados obtenidos mediante MATLAB utilizando modelo de elementos finitos para una malla S4 de 5x5 metros-----	90
Fig. 86: Mapeo de potenciales en MATLAB (2) Gradiente de potencial, (3) Potencial de toque -----	91
Fig. 87: Resultados de malla S4 de 5x5m, mediante R-PAT-----	91
Fig. 88: Diseño de la malla S25 en el entorno de ETAP, y tipo de suelo homogéneo de 150 $\Omega$ ·m-----	93
Fig. 89: Ventana de configuración de parámetros de corrientes -----	93
Fig. 90: Resultados de parámetros básicos de malla S4-----	93
Fig. 91: Simulación en ETAP de gradiente de potencial de una malla S25 -----	94
Fig. 92: Simulación en ETAP de potencial de toque para una malla S25 -----	94
Fig. 93: Simulación en ETAP de potencial de paso para una malla S25 -----	95
Fig. 94: Resultados obtenido mediante Matlab utilizando modelo de elementos finitos para una malla S4 de 5x5m -----	95
Fig. 95: Mapeo de potenciales en MATLAB (2) Gradiente de potencial, (3) Potencial de Toque -----	96
Fig. 96: Resultados de malla S25 de 50x50m, mediante R-PAT -----	96

Fig. 97: Vista en planta de red de puesta a tierra, SE Aguilares -----	98
Fig. 98: Potenciales tolerables para el diseño de SE Aguilares en R-PAT -----	98
Fig. 99: Valores de diseño de SE Aguilares para cumplir acuerdo 29 E-2000 (SIGET) -----	98
Fig. 100 Curva aproximada del factor de división $S_f$ , con contribución 100% remota y 3 circuitos de distribución aterrizados -----	99
Fig. 101: Resultados obtenido mediante Matlab utilizando modelo de elementos finitos para una malla S30 de 27x32m -----	100
Fig. 102: Mapeo del Gradiente de Potencial en MATLAB -----	100
Fig. 103: Mapeo del potencial de toque en MATLAB -----	101
Fig. A1: Grafica para calcular la resistividad del suelo.....	110
Fig. A2: Gráfico de Resistividad aparente vs Espaciamiento de a .....	111
Fig. A3: Ejecutar el programa desde línea de comando de MATLAB .....	113
Fig. A4: Ejecutar el programa desde editor de archivos .m de MATLAB.....	113
Fig. A5: Abrir el archivo desde la app GUIDE de MATLAB .....	113
Fig. A6: Ejecutar el programa desde GUIDE de MATLAB .....	114
Fig. A7: Error al ejecutar el archivo ASSP.Fig.....	114
Fig. A8: Interfaz del programa AS-PotencialesSuperficiales vol. 1.0.....	116
Fig. A9: Mensaje de error al colocar un numero negativo en las variables .....	118
Fig. A10: Mensaje de error al colocar letras en las variables .....	119
Fig. A11: Interfaz del programa AS-SurfaceVoltage vol. 1.0 .....	119
Fig. A12: Botones principales dentro del programa.....	120
Fig. A13: Muestra del resultado con el botón MOSTRAR .....	121
Fig. A14: Muestra del resultado con el botón GRAFICAR.....	122
Fig. A15: Ventana de resultado de la opción Graficar pot. superficiales .....	123
Fig. A16: Ventana de resultado de la opción Graficar $E_{touch}$ .....	123
Fig. A17: Archivo plot3D.jpg .....	124
Fig. A18: Archivo generado en Excel .....	124
Fig. A19: Mensaje de error al sobrepasar el límite de 200 datos para Excel .....	125
Fig. A20: barra de herramientas y menú de ayuda que dispone el programa .....	125
Fig. A21: Matriz Mres con una malla S4.....	127
Fig. A22: Matriz A para una malla S4.....	127
Fig. A23: Ecuación a resolver para encontrar la densidad de corriente de fuga .	128
Fig. A24: Matriz r, Cálculo de resistencias mutuas.....	129
Fig. A25: Suma de resistencias mutuas para poder encontrar las corrientes por segmento.....	129
Fig. A26: Resistencia mutua entre dos segmentos paralelos.....	129
Fig. A27: Resistencia mutua entre dos segmentos perpendiculares.....	130
Fig. A 28 Respuesta de matriz de corriente (q), GPR (v) y resistencia de puesta a tierra (r) para una malla S4.....	133

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cálculo de diferencia de potencial en la superficie.....	50
Tabla 2: Datos para graficar el gradiente de potencial .....	51
Tabla 3: Datos para graficar el gradiente de potencial .....	51
Tabla 4: Datos para graficar el potencial de paso .....	52
Tabla 5: Sitios de medición .....	60
Tabla 6: Resultados de medición de varilla .....	61
Tabla 7: Gradiente de potencial de una varilla .....	61
Tabla 8: Datos de potencial de toque de varilla.....	62
Tabla 9: Datos de potencial de paso de varilla.....	62
Tabla 10: Resultados de medición de malla S1 con varillas .....	63
Tabla 11: Datos de gradiente de potencial de malla S1 con varillas .....	63
Tabla 12: Datos el potencial de toque de malla S1 con varillas .....	64
Tabla 13: Datos de potencial de paso de malla S1 con varillas .....	64
Tabla 14: Resultados de medición de malla S4 .....	65
Tabla 15: Datos de gradiente de potencial medido en malla S4 .....	66
Tabla 16: Datos de potencial de toque de malla S4 .....	66
Tabla 17: Datos de potencial de paso de malla S4 .....	67
Tabla 18: Comparación de resultados obtenidos entre medición y simulaciones para una varilla de 3 pies .....	82
Tabla 19: Comparación de resultados obtenidos entre medición y simulaciones para una malla S1 con varillas y sin varillas .....	87
Tabla 20: Comparación de resultados obtenidos entre medición y simulaciones para una malla S4 .....	92
Tabla 21: Comparación de resultados obtenidos entre medición y simulaciones para una malla S25 .....	97
Tabla 22: Comparación de resultados obtenidos entre simulaciones para la SE Aguilares .....	101
Tabla 23: Datos de resistividad aparente medidos.....	111
Tabla 24: Calibre de conductor con su respectivo diámetro en mm.....	117

## INTRODUCCIÓN

El estudio de potenciales eléctricos superficiales en las diferentes combinaciones de redes de puesta a tierra es de suma importancia para el diseño de las mismas, teniendo en cuentas la norma IEEE Std 80-2013 en donde se presentan los parámetros tolerables de potenciales a los que una persona promedio puede estar expuesta, ya que la finalidad es la de proteger al personal de trabajo de accidentes provocados por fallas eléctricas ante todo y la de proteger a los equipos dando una referencia para la descarga de fallas o corto circuitos.

En El Salvador existe en vigencia el acuerdo 29-E-2000 de la SIGET, el cual establece entre otras normativas que; dependiendo de la capacidad en MVA de la subestación instalada, así será el valor establecido para la resistencia de puesta a tierra y el valor máximo de GPR. Estos parámetros no son suficientes para obtener una red de puesta a tierra segura para el personal y los equipos eléctricos, ya que se desconocen los valores de potenciales eléctricos a los que el personal puede estar expuesto durante una falla. Es por ello que se ha implementado en el presente trabajo de graduación, el cálculo de potenciales eléctricos en una red de puesta a tierra, no solo el cálculo puntual, sino que el comportamiento de los mismos a lo largo del terreno de influencia, siendo esto el mapeo de los potenciales eléctricos 3D.

Para obtener resultados con un alto grado de exactitud se ha utilizado el Método de Elementos Finitos (MEF), el cual implica dividir el problema en un numero de sub dominios de simples de solución, este método se implementó en una herramienta computacional desarrollada en el entorno de MATLAB, ya que se ha visto la necesidad de desarrollar nuevos métodos de cálculo mucho más veloces, versátiles y precisos mediante herramientas electrónicas que resuelvan una gran cantidad de ecuaciones de los fenómenos electromagnéticos.

La recolección de información se realizó de 3 formas fundamentales para el presente trabajo, mediante información teórica de los diferentes libros y papers, los datos obtenidos mediante mediciones físicas realizadas en terrenos de la Universidad de El Salvador basadas en la norma IEEE Std 81-2012 y la información obtenida de software comerciales al simular las redes de puesta a tierra.

Se presenta las definiciones más importantes en relación a las redes de puesta a tierra, así como también las condiciones de peligro y las condiciones tolerables por el cuerpo humano. Definiendo las ecuaciones físico-matemáticas fundamentales del campo eléctrico estacionario terrestre.

Se implementó el método de computación de voltajes superficiales asumiendo una distribución de corriente no uniforme [7]. Este método utiliza el MEF para asumir la corriente de distribución no uniforme, debido a que en la mayoría de la información sobre

voltajes y gradientes de voltajes en la norma IEEE Std 80, se asume que la densidad de corriente de fuga es la misma en todos los puntos del cable, en cuadrículas uniformemente espaciadas, la densidad de corriente de fuga es más pequeña cerca del centro de la cuadrícula y más alto en los bordes y las esquinas.

Se obtuvo datos prácticos mediante mediciones de campo de las redes de puesta a tierra, utilizando los diferentes métodos planteados en la norma IEEE Std 81-2012, como lo son: El método de las cuatro puntas de Wenner para la medición de resistividad del terreno, el método de caída de potencial de 3 puntas (62%) para la resistencia de puesta a tierra  $R_g$  y el método para mediciones de potenciales superficiales con un telurómetro convencional, pudiendo medir con este último método el GPR, el gradiente de potencial, los potenciales de toque y los potenciales de paso. Las mediciones se llevaron a cabo en las instalaciones de la Universidad de El Salvador, construyendo redes de prueba aisladas.

Con los datos de diseño de las mallas físicas construidas y los valores medidos de resistividad del suelo, se simuló en el programa comercial ETAP, la herramienta R-PAT y por último en la herramienta computacional diseñada para el presente trabajo AS-Potenciales Superficiales, así se realizó un análisis comparativo entre los diferentes resultados obtenidos.

Además, se simuló en el programa realizado en el entorno de MATLAB una red de puesta a tierras en la subestación Aguilares con los siguientes datos principales: Un transformador 10/12 MVA con una conexión Yyn0, en el lado de alta tensión de 46 kV y en el lado de baja tensión de 23 kV, con una corriente de falla monofásica 1300 A por contribuciones por los bancos de transformadores ubicados en la red (valores censados), posee tres circuitos de distribución.

Se espera que el presente trabajo funde las bases de nuevas investigaciones y aplicación de las diferentes ramas de la Ingeniería Eléctrica utilizando el método de elementos finitos para un mayor grado de exactitud en los resultados. Así como en el desarrollo de software más completos unificando R-PAT y superando las limitantes que acá se presentan.

## ABSTRACT

The work done arises from the importance of knowing the surface potentials in a land network by using the Finite Element Method (FEM) to obtain greater accuracy in the results, complying with the IEEE Std 80-2013 standard, since in El Salvador is not taken into account as SIGET regulations for the safety of people and equipment. It started with the effect of the electric fields by passing a fault current  $I_g$  through the grounding network focusing on the image method that is the basis for the calculation of potentials with the mathematical model investigated, continuing with the taking of real data of meshes installed by measurement with conventional tellurometer, until the theory research is implemented in a computational tool developed in MATLAB for the calculation of superficial potentials and to compare the obtained results.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Determinar aplicaciones computacionales para representar los diferentes fenómenos electromagnéticos presentes en las redes de tierra, y así verificar el cumplimiento de los valores tolerables definidos por las normas IEEE Std 80 e IEEE Std 81, utilizando como base los modelos de elementos finitos (FEM).

### **Objetivos específicos**

- Investigar el modelo electromagnético de transmisión de conducción de corriente por tierra aplicable en la puesta a tierra de sistemas eléctricos.
- Investigar y presentar los fundamentos de aplicación de modelos de elementos finitos al análisis de redes de tierra utilizadas en subestaciones de potencia, modelo del método de imágenes en conjunto con la integración de Neumann.
- Investigar el modelo de elementos finitos de la IEEE Std 80-1986 y compararlo con el método de las imágenes.
- Investigar los fundamentos de los modelos de elementos finitos aplicado en la Ingeniería Eléctrica.
- Realizar una herramienta computacional en el entorno de MATLAB para obtener los potenciales superficiales de las diferentes configuraciones de redes de tierra, así como los potenciales de toque, paso y GPR.
- Evaluar las configuraciones básicas de mallas S1 con varillas, S4, S25, el electrodo simple (varilla) y la unión de mallas con electrodos principalmente en las esquinas, para los cuales se calcularán los potenciales superficiales.
- Obtener mediciones de campo de potenciales superficiales (voltaje de paso, de toque y GPR) para comparar los resultados simulados y calculados. basados en la IEEE 81.
- Simular el comportamiento de redes de tierra prácticos utilizando el modelo de elementos finitos (FEM) de programas comerciales y R-PAT.

## **CAPÍTULO 1: GENERALIDADES**

### **1.1 Antecedentes**

En la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, se ha desarrollado un trabajo previo en el ámbito computacional aplicado a las redes de puesta a tierra como lo es la herramienta R-PAT [24], el cual presenta un entorno para diseño de redes de puesta a tierra, calculando los voltajes tolerables ya sea  $E_{touch}$ ,  $E_{step}$  y GPR. En donde se puede observar la aplicación de la norma IEEE Std 80-2013, así como también el acuerdo 29-E-2000 de la SIGET.

Actualmente no se tienen investigaciones o trabajos referentes a resolver problemas mediante el uso del Método de Elementos Finitos (MEF) dentro de la Escuela de Ingeniería Eléctrica.

Existen trabajos previos en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura en donde se utiliza el modelo de elementos finitos, específicamente en las Escuela de Ingeniería Civil [20] [21] para resolver problemas con la geometría de la pieza sometida a cargas y restricciones, así como en la resolución de ecuaciones parciales en la facultad de Ciencias Naturales y Matemática [19]. Cabe mencionar que la mayoría de trabajos hacen uso de software comerciales que utilizan métodos de elementos finitos para resolver problemas, muy pocos o ninguno tratan la parte matemática de dicho método.

Asimismo en la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas se tienen trabajos donde se resuelven las ecuaciones diferenciales por métodos de elementos finitos y diferencias finitas, elaborando programas en un entorno computacional como lo es MATLAB [18].

### **1.2 Planteamiento del problema**

El hecho de que la tierra conduzca corriente eléctrica es de suma importancia para los sistemas eléctricos, en central de un sistema de distribución de transformación es un elemento.

En El Salvador, la SIGET en el acuerdo N° E-2000, ha establecido los valores máximos de la resistencia de una red de tierra de acuerdo a la capacidad en MVA de la instalación eléctrica y el valor máximo del GPR (5000 V). De acuerdo al estándar IEEE Std 80, existen condiciones de diseño en los valores de los potenciales de paso y de contacto para mantener segura una subestación, así también del GPR. En lo que se deriva a problemas de mala puesta de los sistemas a tierras, los cuales son comunes, citando algunos ejemplos: El impacto de un rayo en el cable de guarda en Guayaquil resultó en el daño de un recloser, el hurto de cobre en una subestación resultó en varios problemas en la telecomunicación [22].

Sin embargo, los efectos eléctricos, magnéticos, térmicos y fisiológicos que se originan en el traspaso y circulación de una corriente dentro de la tierra son trascendentes;

repercuten en la eficiencia y economía de un sistema eléctrico, así como en aspectos de seguridad de los seres vivos.

En el caso de este estudio se basa en el potencial eléctrico que es el inicio para cualquier información que se desee sobre campos electrostáticos en algún punto. Esto no se puede lograr por medio de una configuración de carga en un problema práctico (en nuestro caso aplicado a redes de puesta a tierras) y una de las formas de solución que se pueden aplicar a estos problemas son con los métodos iterativos y obtener una gran exactitud que pueden utilizarse computadoras para simplificar el proceso.

El Método de Elementos Finitos (FEM) es una técnica general para construir soluciones aproximadas a problemas de valor en la frontera. El método implica dividir el dominio de la solución en un número finito de subdominios simples, los elementos finitos, y usando conceptos de variación para construir una aproximación de la solución. Debido a la generalidad el método ha sido utilizado con notable éxito en la solución de un amplio rango de problemas en prácticamente todas las áreas de la ingeniería, matemática y física.

### **1.3 Justificación**

En la actualidad, los fenómenos electromagnéticos presentes en procesos industriales son de mucha importancia, se conoce en teoría ya que sus modelos matemáticos son extensos y difíciles de calcular sin herramientas electrónicas. Es por ello que se crea la necesidad de desarrollar nuevos métodos de cálculo mucho más veloces, versátiles y precisos mediante herramientas computacionales que resuelvan una gran cantidad de ecuaciones de los fenómenos electromagnéticos en cuestión de milisegundos o menos. Una de las áreas de mayor interés del electromagnetismo computacional para la industria es el cálculo en el diseño y optimización de equipos magnéticos como sensores, motores, electroimanes, etc.

La norma IEEE Std 80-2013 está actualmente vigente a nivel internacional, en la cual su objetivo es la protección de la vida humana al establecer tensiones máximas tolerables por el cuerpo de una persona promedio, a diferencia de sus versiones antiguas en donde la prioridad era obtener un valor muy bajo de resistencia a tierra, así como también el acuerdo 29-E-2000 de la SIGET que es la normativa utilizada en El Salvador, la cual se basa en el cumplimiento de una baja  $R_g$ . Las tensiones de paso y de toque tolerables son parámetros de diseño, son de mucha importancia en terrenos con resistividad alta en donde es muy difícil y hasta costoso obtener una  $R_g$  muy baja.

Se pretende en el ámbito académico, la realización de un tema pionero en el campo del electromagnetismo, lo cual funde las bases para futuros proyectos o trabajo de graduación de la Universidad de El Salvador. Así mismo retomar el programa R-PAT y

ampliar sus herramientas utilizando los modelos finitos para representar de una manera más precisa la mayor cantidad de fenómenos electromagnéticos presentes en las redes de tierra.

## **1.4 Alcances y limitaciones**

### **1.4.1 Alcances**

Investigar y aplicar el método de elementos finitos (FEM) para la creación de una herramienta computacional en el entorno de MATLAB y así obtener parámetros básicos de las redes de tierra como lo son: gradiente de potencial, resistencia de tierra  $R_g$ ,  $E_{touch}$ , y GPR, de las configuraciones de electrodo (varilla), malla S1 con varillas, malla S4 y malla S25. Se realizó mediciones reales de las configuraciones antes mencionadas a excepción de la malla S25. Además, se hizo comparaciones contra resultados obtenidos mediante ETAP y R-PAT.

### **1.4.2 Limitaciones**

No se modificó el programa R-PAT para implementar el modelo de elementos finitos, siendo esto retomado por futuros trabajos una vez sentadas las bases del electromagnetismo computacional en el presente trabajo.

Se presentó limitantes para el desarrollo del trabajo con respecto a la poca información acerca de modelos de elementos finitos aplicados a resolver problemas de puesta a tierra, así como también que en la escuela de ingeniería eléctrica no existen estudios previos en el ámbito.

No se realizó la medición de una malla S25 debido al espacio a utilizar y la cantidad de cable, siendo también el tiempo a emplear en la construcción de la misma.

Se obtuvo datos de las mediciones con un margen de error amplio debido al método utilizado el cual consiste en la utilización únicamente de un telurómetro que inyectaría corrientes relativamente pequeñas a diferencia del valor de una corriente de falla real y son mallas aisladas con fines didácticos.

Se limitó el estudio a suelos homogéneos (1 capa), siendo los suelos multicapas retomados para futuros trabajos.

Se establece solamente la utilización de mallas simétricas (cuadradas y rectangulares) para los diferentes cálculos, ya que para mallas asimétricas las ecuaciones a utilizar deben ser diferentes y consideran más incógnitas.

La herramienta computacional desarrollada en MATLAB se limita a mallas sin el uso de electrodos.

## 1.5 Metodología de investigación

El trabajo de investigación consta de distintas etapas con las cuales se da conocer el efecto de los campos eléctricos generados, cuando pasa una corriente en las redes a tierra. Se realiza y compara los datos tanto de forma teórica, trabajo de campo y de forma simulada con programas comerciales.

En el trabajo de campo se realizó en la Universidad de El Salvador y se complementa con el apoyo de algunas instituciones que accedieron a colaborar con el grupo de investigación. El trabajo de investigación es realizado con las siguientes actividades agrupadas según cada etapa:

1. Investigación sobre la conducción de electricidad por tierra, y de modelos de elemento finito aplicados en ingeniería eléctrica, prestando atención a la aplicación de métodos alternativos que sugieren en el paper titulado: "Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution" sobre cálculo de gradiente de potencial eléctricos en redes a tierra.
2. Estudio de la norma IEEE Std 80-1986 que tratan la temática planteada. Tomando los tópicos más importantes y haciendo una comparación entre métodos.
3. Realización de trabajo de campo que incluye las mediciones de resistividad del suelo y potenciales superficiales de las configuraciones básicas como son: una varilla, una malla S1 con 4 varillas en los extremos y una malla S4, utilizando métodos descritos en las normas IEEE Std 81.
4. Realización de un método computación desarrollado en el entorno de MATLAB, para el cálculo y mapeo los potenciales generados en una red de tierra aplicando el método propuesto por el ingeniero Robert J. Heppe, además del cálculo y mapeo de los potenciales de toque aplicando las ecuaciones de la IEEE 80-1986.
5. Simulación de las diferentes configuraciones básicas antes mencionadas en los softwares que poseen los métodos investigados anteriormente como es: ETAP (norma IEEE 80-1986), R-PAT y el método desarrollado en la investigación en el entorno de MATLAB.
6. Simulación con el programa en MATLAB y R-PAT de un caso real aplicado a la subestación Aguilares trafo de 10/12MVA en configuración Yyn0, en el lado de alta tensión de 46 kV y en el lado de baja tensión de 23 kV, con una corriente de falla monofásica 1300 A, posee tres circuitos de distribución.
7. Analizar la información obtenida en el trabajo de campo, simulaciones y contrastar con la teoría, con el objetivo de dejar plasmado un método sencillo para graficar los

potenciales que se producen en las redes a tierra y los primeros pasos para comprender cómo se producen.

## 1.6 Definiciones

**Electrotecnia:** Técnica de la energía eléctrica, tanto en corriente continua como en corriente alterna; técnica de las comunicaciones eléctricas e informáticas; y técnica de los transportes eléctricos.

**Tierra:** Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por el cual un circuito eléctrico o equipo se conecta al suelo o a algún cuerpo conductor de magnitud relativamente grande que sirve en lugar de la tierra.

**Elevación del potencial de tierra (GPR):** El potencial eléctrico máximo que un electrodo de tierra puede alcanzar respecto a un punto de conexión a tierra distante que se supone se encuentra el potencial de tierra remoto. Este voltaje GPR, es igual a la corriente máxima de tierra, multiplicado por la resistencia de la red de tierra.

**Voltaje de toque:** La diferencia de potencial entre el incremento de potencial de tierra (GPR) de una cuadrícula o sistema de tierra y el potencial de superficie en el punto en que una persona puede estar de pie, mientras que, al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura conectada a tierra.

**Voltaje de paso:** La diferencia en el potencial de la superficie que podría ser experimentada por una persona parada con los pies separados una distancia de 1 m sin contactar algún objeto conectado a tierra.

**Teorema de la divergencia:** establece que el flujo total hacia afuera de un campo vectorial  $A$  a través de la superficie cerrada  $S$  equivale a la integral de volumen de la divergencia de  $A$ .

**Teorema de Stokes:** establece que la circulación de un campo vectorial  $A$  alrededor de una trayectoria (cerrada)  $L$  es igual a la integral de superficie del rotacional de  $A$  sobre la superficie abierta  $S$  circunscrita por  $L$ , siempre que  $A$  y  $S$  sean continuos en  $S$ .

**Ley de Coulomb:** establece que la fuerza  $F$  entre dos cargas puntuales  $q_1$  y  $q_2$  es:

1. De dirección igual a la de la línea que las une.
2. Directamente proporcional al producto de las cargas.
3. Inversamente proporcional al cuadrado de la distancia  $R$  entre ellas.

**Ley de Gauss:** establece que el flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga total encerrada por esa superficie, el potencial en cualquier punto es la diferencia de potencial entre ese punto y un punto elegido como referencia en el que el potencial sea cero.

**Conductor perfecto:** Es el que no puede contener un campo electrostático.

**Teorema de Unicidad:** Si se puede determinar que una solución de la ecuación de Laplace satisface las condiciones en la frontera, esa solución es la única.

**La teoría de las imágenes:** Establece que una configuración de carga dada sobre un plano conductor perfecto e infinito conectado a tierra puede reemplazarse por la propia configuración de carga, su imagen y una superficie equipotencial en sustitución del plano conductor.

**Colineales:** En geometría sirve para indicar si un punto o una serie de puntos se encuentran en la misma recta.

**Coplanares:** En geometría sirve para indicar si una Fig. o una recta se encuentran dentro de un mismo plano

**Condición de frontera de Dirichlet:** Es un tipo de condición de frontera o contorno, denominado así en honor a Johann Peter Gustav Lejeune Dirichlet (1805-1859), cuando en una ecuación diferencial ordinaria o una en derivadas parciales, se le especifican los valores de la solución que necesita la frontera del dominio. La cuestión de hallar las soluciones a esas ecuaciones con esta condición se le conoce como problema de Dirichlet.

**Condición de frontera de Neumann:** Es un tipo de condición de frontera o contorno, llamada así en alusión a Carl Neumann. Se presenta cuando a una ecuación diferencial ordinaria o en derivadas parciales, se le especifican los valores de la derivada de una solución tomada sobre la frontera o contorno del dominio.

**Condición de frontera de Cauchy:** En ecuaciones diferenciales ordinarias o en ecuaciones diferenciales parciales imponen valores específicos a la solución de una ecuación diferencial que se toma de la frontera del dominio y de la derivada normal a la frontera.

**Método de las diferencias finitas:** Es un método de carácter general que permite la resolución aproximada de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales definidas en recintos finitos, en el cual la zona de solución es un conjunto de puntos discretos.

**Método de elementos finitos:** Es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. Supone que la zona de solución está compuesta de muchas subzonas interconectadas, las que se denominan "elementos finitos".

## 1.7 Normas aplicadas

Dentro de la biblioteca de normas y estándares que se dedican a la puesta a tierra de sistemas eléctricos, están las del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE), en una de las cuales se basa la investigación. Sin embargo, no está demás conocer otros estándares que también describen metodologías de diseño y medición de estos sistemas, en los que la seguridad del personal y del equipo es prioridad, además del

buen funcionamiento de los sistemas eléctricos ya sea en generación, transmisión y distribución de la energía; y en el uso que se le da en el sector industrial, comercial, gubernamental y residencial. Algunas de estas normas consultadas se listan a continuación:

IEEE STD 81- 2012 "Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System": Presenta las prácticas y técnicas recomendadas para la medición de las características eléctricas de los sistemas de puesta a tierra.

IEEE STD 80-1986 "Guide for Safety in AC Substation Grounding": Es una guía que provee la información pertinente sobre las prácticas de seguridad recomendadas para el diseño de la puesta a tierra de Subestaciones AC.

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

## **CAPÍTULO 2: REDES A TIERRA**

Las redes de tierra se pueden definir como un conjunto de elementos eléctricos y mecánicos que se interrelacionan para proporcionar conexiones a tierra de equipos de potencia. Los sistemas de puesta a tierra son una parte imprescindible de todo sistema eléctrico en cualquiera de sus niveles: generación, transmisión y distribución de la energía, ya que es el que protege al sistema, equipos conectados y seguridad de las personas. Desde su diseño e implementación hasta su mantenimiento se deben seguir las normas correspondientes que garanticen el cumplimiento de los objetivos de las puestas a tierra.

### **2.1 Objetivo de las puestas a tierra**

Según la IEEE Std 80, un diseño seguro de puesta a tierra tiene los siguientes dos objetivos:

- Proporcionar medios para llevar las corrientes eléctricas hacia la tierra, en condiciones normales y de fallo sin exceder los límites de operación y del equipo o que afecten negativamente a la continuidad del servicio.
- Reducir el riesgo de una persona en la proximidad de las instalaciones conectadas a tierra que están expuestas al peligro de choque eléctrico crítico.

### **2.2 Condiciones de peligro**

Durante las condiciones típicas de falla a tierra, el flujo de corriente a tierra producirá gradientes de potencial dentro y alrededor de una subestación. Si no se toman las precauciones apropiadas en el diseño, los gradientes de potencial máximo a lo largo de la superficie del suelo pueden ser de magnitud suficiente, durante las condiciones de falla a tierra, para poner en peligro a una persona en la zona. Por otra parte, los voltajes peligrosos que se pueden desarrollar entre las estructuras puestas a tierra o las masas de los equipos y la tierra cercana.

Las circunstancias que hacen posible los accidentes provocados por choque eléctricos pueden posiblemente incluir los siguientes:

- a) Corriente de falla a tierra relativamente alta en relación con el área de sistema de tierra y su resistencia a la tierra remota.
- b) La resistividad del suelo y la distribución de las corrientes de tierra de tal manera que los altos gradientes de potencial pueden producirse en los puntos en la superficie de la tierra.
- c) La presencia de una persona en un punto tal, en la hora y la posición que el cuerpo está en puente dos puntos de alta diferencia de potencial.
- d) La ausencia de suficiente resistencia de contacto u otra resistencia en serie para limitar la corriente a través del cuerpo a un valor seguro bajo las circunstancias de a) a c).

- e) Duración de la falla y el contacto al cuerpo, por lo tanto, del flujo de corriente a través del cuerpo humano durante un tiempo suficiente para causar daño en la intensidad de corriente dada.

### **2.3 Electrodo de puesta a tierra**

El elemento central de una instalación de puesta a tierra es el electrodo, que es un elemento metálico, por el medio del cual se introduce la corriente a la tierra; los electrodos adoptan formas geométricas bien ensayadas para tal fin. Los componentes importantes en sistema de puesta a tierra son: los conductores de tierras (los que unen al elemento por proteger con el electrodo), conectores de unión (que hacen una factible la unión correcta entre los diversos elementos del sistema de tierra), conductores colectores (líneas conductoras que unen a varios electrodos para la operación en paralelo) y electrodo.

Como objeto de estudio se retomará el modelo de electrodo de puesta a tierra que utiliza la norma IEEE Std 80 que tiene la forma de una cuadrícula de electrodos enterrados horizontalmente, suplementados por un número de varillas de tierra verticales conectados a la cuadrícula. Las razones por las que se utilizan de esta manera son las siguientes:

1. Los conductores horizontales (cuadrícula) son más eficaces en la reducción del peligro de los altos voltajes de paso y de toque en la superficie de la tierra, a condición de que la red se instale a una profundidad superficial, y que varillas de tierra lo suficientemente largas estabilizarán el desempeño de este tipo de sistema combinado.
2. Para muchas instalaciones esto es importante porque la congelación o el secado de las capas superiores del suelo podrían variar la resistividad del suelo con las estaciones, mientras que la resistividad de las capas inferiores del suelo permanece casi constante.
3. Las varillas que penetran en el suelo de baja resistividad son mucho más eficaces en la disipación de corrientes de falla siempre que se encuentren un suelo de dos capas o de múltiples capas y la capa de suelo superior tiene una resistividad más alta que las capas inferiores.

### **2.4 Rango de corriente tolerable**

Los efectos de una corriente eléctrica que pasa a través de las partes vitales del cuerpo humano  $I_B$  dependen de la duración, la magnitud y frecuencia de esta corriente. Para este estudio se enfocara en la magnitud de la corriente debido a que la frecuencia estará alrededor de los 60 Hz y la duración estará limitada a una buena coordinación de protecciones. La consecuencia más peligrosa de tal exposición es una condición cardíaca conocida como fibrilación ventricular.

Los efectos fisiológicos más comunes de la corriente eléctrica en el cuerpo, establecido en orden con el aumento de la magnitud de corriente, son la percepción en el valor umbral de la corriente, la contracción muscular, pérdida del conocimiento, la fibrilación del corazón, el bloqueo nervioso de la respiración, y quemaduras (Geddes y Baker; IEC 60479 -1 (1994-1909)).

La corriente de 1 mA se reconoce generalmente como el umbral de percepción; es decir, la magnitud de la corriente a la que una persona es capaz de detectar una ligera sensación de hormigueo en las manos o dedos causados por el paso de la corriente (Dalziel).

Las corrientes de 1 mA a 6 mA, aunque desagradables para sostener, en general, no ponen en peligro la capacidad de una persona de sostener un objeto con energía para controlar sus músculos y soltarlo.

En el rango de 9 mA a 25 mA, las corrientes pueden ser dolorosas y pueden que sea difícil o imposible de soltar los objetos energizados agarrados con la mano. Para corrientes aún mayores las contracciones musculares podrían dificultar la respiración.

En el rango de 60 mA a 100 mA se alcanza la fibrilación ventricular, paro del corazón, o la inhibición de la respiración lo cual puede causar lesiones o la muerte. Una persona capacitada en resucitación cardiopulmonar (RCP) debe administrar RCP después de retirar la fuente de corriente y sea seguro hacerlo, hasta que la víctima pueda ser tratada en un centro médico. Hoy en día las empresas exigen un curso de calificación eléctrica, para que el trabajador sepa reconocer las fuentes eléctricas, aplicar EPP adecuado, respetar distancias de seguridad y aplicar primeros auxilios incluyendo RCP.

## 2.5 Criterios de voltajes tolerables

La seguridad de una persona depende de la prevención de la cantidad crítica de energía de choque que sea absorbida antes de que la falla se despeje y el sistema se desenergiza por la acción del esquema de protección. El voltaje máximo de conducción de cualquier circuito accidental no debe exceder los límites definidos de la siguiente manera. Para el voltaje de paso el límite es:

$$E_{step} = (R_B + 2R_f)I_B \quad (2.1)$$

Para el límite de voltaje de toque:

$$E_{touch} = \left( R_B + \frac{R_f}{2} \right) I_B \quad (2.2)$$

Para establecer los criterios de voltaje tolerable primero hay que definir la resistencia del cuerpo humano: Para corrientes de DC y AC de 60 Hz, el cuerpo humano se puede aproximar por una resistencia. La trayectoria de la corriente típicamente considerada es de la mano a ambos pies, o de un pie a otro. La resistencia interna del cuerpo es de

aproximadamente 300  $\Omega$ , mientras que los valores de resistencia del cuerpo incluyendo el rango de piel es de 500  $\Omega$  a 3,000  $\Omega$ . La resistencia del cuerpo humano se reduce por el daño o punción de la piel en el punto de contacto.

Un valor de 1000  $\Omega$ , representa la resistencia de un cuerpo humano  $R_B$  de la mano-a-pies y también de la mano-a-mano o de un pie al otro pie.

A efectos del análisis de la ecuación de criterio de voltajes tolerables, el valor de  $R_f$  es del pie humano se suele representar como un disco conductor metálico y la resistencia de contacto de zapatos, calcetines, etc., se desprecia. La resistencia de tierra en ohmios de un disco metálico de radio  $b$  (m) en la superficie de un suelo homogéneo de resistividad  $\rho$  ( $\Omega$ -m) viene dada por Laurent.

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (2.3)$$

Tradicionalmente, el disco metálico que representa el pie se toma como una placa circular con un radio de 0.08 m. Con sólo una ligera aproximación, ecuaciones para  $R_f$  se pueden obtener en forma numérica y se expresan en términos de  $\rho$  como sigue.

Para el circuito accidental del voltaje de toque:

$$Z_{th} = 1.5\rho \quad (2.4)$$

Y para el circuito accidental del voltaje de paso

$$Z_{th} = 6.0\rho \quad (2.5)$$

Para esta investigación solo se tomó el valor  $R_f$  aplicada a suelo homogéneo y sin capa de material superficial.

## 2.6 Acerca de la geo eléctrica electrotécnica

La manera más usual de traspasar la corriente al suelo es por medio de los llamados electrodos (artificiales o naturales), que son elementos metálicos que, por lo tanto, poseen una conductividad muy alta en comparación con la del terreno, los cuales pueden adoptar diferentes formas geométricas, tales como: esfera, semiesfera, pica, banda, anillo, placa. Para la ingeniería de puesta a tierra lo esencial es indagar el comportamiento (eléctrico, magnético y térmico) de electrodos de las diferentes formas geométricas en terrenos con diversas condiciones geoelectricas y/o geotécnicas al traspasar a ella, por medio de aquellos, corrientes de diferente naturaleza (estacionaria, casi estacionaria etc.), así como también todos los efectos derivados de tal hecho, como por ejemplo, campos de corriente, calentamiento, potenciales, gradientes de potencial, voltajes de contacto y de paso, corrientes de cuerpo peligrosas (tanto de personas, como de animales), potencia eléctrica y zonas peligrosas dentro y fuera (en las proximidades) del ámbito de los electrodos.

Para conseguirlo, además de los conocimientos de la geología aplicada, se requiere involucrar a una disciplina de geofísica aplicada: la geoelectrica. Esta disciplina tiene que ver con el conocimiento de las corrientes telúricas, naturales o artificiales, así como de los diversos fenómenos que se verifican dentro de la tierra y de sus posibles efectos. La geoelectrica es una disciplina científica profunda y densa, pues incluye elementos de

diversas ciencias, tales como: geología aplicada, geofísica aplicada, geoquímica y matemática aplicadas; es una teoría representacional, formulada matemáticamente por lo que se beneficia de la limpieza y el poder deductivo de la matemática.

Los conocimientos de la geoelectrica se utilizan dentro del sistema problemático de la puesta a tierra, para la determinación de los conocimientos tecnológicos de la acción, así como de reglas tecnológicas para la resolución de los problemas de la práctica.

## 2.7 Definiciones físico-matemáticas fundamentales del campo eléctrico estacionario terrestre

La corriente estacionaria es aquella que excita campos de corriente eléctrica que no presentan variaciones en el tiempo de las magnitudes del campo ni tampoco inducción de tensión alguna; estas corrientes son cerradas (de corriente continua) y tienen igual intensidad de todas las secciones de las porciones no derivadas del circuito; la intensidad de campo no es función del tiempo y el campo eléctrico es excitado únicamente por las cargas estacionarias. Por lo tanto, la deducción de las expresiones matemáticas, tanto de naturaleza científica como tecnológica y de acción, es un problema relativamente sencillo, dado que en el interviene solamente la conductividad óhmica y no entra el fenómeno de la inducción.

Se acepta que el campo eléctrico terrestre es estacionario cuando los vectores de su intensidad de campo  $\mathbf{E}$  y de su densidad de corriente  $\mathbf{J}$  son invariables en el tiempo.

La intensidad de campo eléctrico es de dirección igual a la de la fuerza ejercida por una carga  $Q$  según la ley de Coulomb. La intensidad de campo eléctrico en un punto  $\mathbf{r}$  debida a una carga puntual localizada en  $\mathbf{r}'$  se presenta de la manera siguiente:

$$\mathbf{E} = \frac{Q(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{4\pi\epsilon|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (2.6)$$

Se dice que un campo vectorial  $\mathbf{A}$  es irrotacional (o potencial) si  $\nabla \times \mathbf{A} = 0$ .

Esto es, un vector sin rotacional. Con base en el teorema de Stokes:

$$\int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S} = \oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (2.7)$$

Así, un campo irrotacional  $\mathbf{A}$ , la circulación de  $\mathbf{A}$  alrededor de una trayectoria cerrada es idéntica a cero. Esto implica que la integral de línea de  $\mathbf{A}$  es independiente de la trayectoria elegida. Ejemplos de campos irrotacionales son el campo electrostático y el campo gravitacional.

Por lo tanto se puede expresar a la intensidad de campo eléctrico  $\mathbf{E}$  en términos de un campo escalar  $V$ ; esto es si:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (2.8)$$

Entonces

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad \text{y} \quad \mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.9)$$

Lo cual quiere decir que la intensidad de campo eléctrico es el gradiente de  $V$ . El signo negativo indica que la dirección de  $\mathbf{E}$  es la opuesta a la dirección del incremento de  $V$ ;  $\mathbf{E}$  se dirige de niveles superiores a niveles inferiores de  $V$ .

Supongamos que se desea mover una carga puntual  $Q$  del punto  $A$  al punto  $B$  en el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  que aparece en la Fig. 1. Con base en la ley de Coulomb, la fuerza sobre  $Q$  es  $\mathbf{F} = Q\mathbf{E}$ , de modo que el trabajo total, o la energía potencial requerida para mover  $Q$  de  $A$  a  $B$  es:

$$W = -Q \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.10)$$

El signo negativo indica que el trabajo es realizado por un agente externo. La división de  $W$  entre  $Q$  da como resultado la energía potencial por unidad de carga. Esta cantidad denotada como  $V_{AB}$  se conoce como diferencia de potencial entre los puntos  $A$  y  $B$ . Así:

$$V_{AB} = \frac{W}{Q} = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.11)$$

Si  $V_{AB}$  es negativo, hay una pérdida de energía potencial en el desplazamiento de  $Q$  de  $A$  a  $B$ ; esto implica que el trabajo es realizado por el campo. Si en cambio,  $V_{AB}$  es positivo, hay una ganancia de energía potencial en el desplazamiento; un agente externo realiza el trabajo.

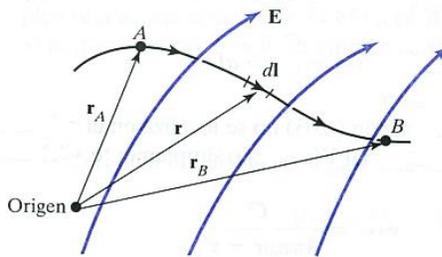


Fig. 1: Desplazamiento de una carga puntual  $Q$  en un campo electrostático  $E$

De lo anterior se infiere que la tensión depende solo de la posición de los puntos  $A$  y  $B$ , así que entonces la expresión:

$$V_{AB} = V_B - V_A \quad (2.12)$$

Donde  $V_B$  y  $V_A$  son los potenciales (o potenciales absolutos) en  $B$  y  $A$ , respectivamente. De este modo la diferencia de potencial  $V_{AB}$  puede considerarse como el potencial en  $B$  en referencia a  $A$ . En problemas que implican cargas puntuales se acostumbra a elegir

el infinito como referencia; es decir, se parte del supuesto de que el potencial en el infinito es cero. Por tanto, si  $V_A = 0$  cuando  $r_A \rightarrow \infty$  en la ecuación (2.12) el potencial el potencial en cualquier punto ( $r_B \rightarrow r$ ) debido a una carga puntual  $Q$  situada en el origen es:

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon r} \quad (2.13)$$

La ecuación anterior define a una función  $V$  independiente del tiempo, la cual quedara determinada de manera univoca para todo punto de referencia, en el momento de adicionar una cierta constante, en principio arbitraria, para cada punto de partida (determinada después con base en condiciones de frontera, etc.). A esta función se le denomina “potencial eléctrico escalar”.

A un conductor se le llama cuerpo equipotencial, lo que implica que en cualquiera de sus puntos el potencial es el mismo. Esto se basa en el hecho de que  $\mathbf{E} = -\nabla V = 0$ .

La ley de Ohm,  $\mathbf{J} = \gamma\mathbf{E}$ , permite entender este fenómeno de otra manera. Para mantener una densidad de corriente finita  $\mathbf{J}$  en un conductor perfecto ( $\gamma \rightarrow \infty$ ) es necesario que el campo eléctrico dentro del conductor tienda a cero, en otras palabras,  $\mathbf{E} \rightarrow 0$ .

Desacuerdo con la ley de Gauss, si  $\mathbf{E} = 0$ , la densidad de carga  $\rho_v$  debe ser de cero. En consecuencia, esto nos lleva a la conclusión de que un conductor perfecto no puede contener un campo electrostático.

Así que el potencial  $V$  satisface la ecuación de Laplace al ser  $\rho_v = 0$  (región sin carga):

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.14)$$

Así pues, en el proceso de la determinación de las expresiones matemáticas finales que permitan calcular las propiedades y el comportamiento de los electrodos de puesta a tierra, deben ser consideradas aquellas definiciones fundamentales del campo terrestre estacionario.

## 2.8 Las condiciones límites de las corrientes de tierra estacionaria

En el estudio del corte geoelectrica es de suma importancia el comportamiento de las corrientes estacionarias en la frontera de dos medios diferentes, para lo cual es necesario, primero, revisar las condiciones limites que debe satisfacer el vector de campo eléctrico en las superficies de discontinuidad, es decir, las condiciones físicas que ligan a los potenciales escalares eléctricos  $V_1$  y  $V_2$  de la corriente estacionaria en el límite de dos diferentes regiones de campo 1 y 2 correspondientes a dos escalares homogéneos con la conductividad  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$  respectivamente.

Considérese el campo  $\mathbf{E}$  existente en una región compuesta por 2 medios conductores caracterizados por  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$  como se muestra en la Fig. 2(a).  $\mathbf{E}_1$  y  $\mathbf{E}_2$  en los medios 1 y 2, respectivamente pueden descomponerse así:

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_{1t} + \mathbf{E}_{1n} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_{2t} + \mathbf{E}_{2n} \quad (2.16)$$

Aplicando la ecuación (2.7.2) a la trayectoria cerrada abcd de la Fig. 2.2 (a), partiendo del supuesto de que tal trayectoria es muy reducida respecto a la variación de  $\mathbf{E}$ . De ello se obtiene:

$$0 = E_{1t}\Delta w - E_{1n}\frac{\Delta h}{2} - E_{2n}\frac{\Delta h}{2} - E_{2t}\Delta w + E_{2n}\frac{\Delta h}{2} + E_{1n}\frac{\Delta h}{2} \quad (2.17)$$

Donde  $E_t = |\mathbf{E}_t|$  y  $E_n = |\mathbf{E}_n|$ . Cuando  $\Delta h \rightarrow 0$ , la ecuación anterior se convierte en:

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (2.18)$$

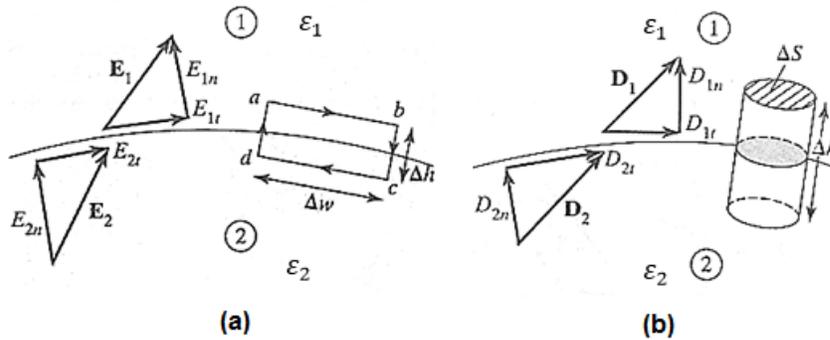


Fig. 2: Frontera entre dos medios de conductividad  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$

En forma similar, se aplica la ecuación de la ley de Gauss:

$$Q = \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.19)$$

Al objeto (superficie gaussiana) de la Fig. 2 (b). Si concedemos que  $\Delta h \rightarrow 0$ , entonces:

$$\Delta Q = \rho_s \Delta S = D_{1n} \Delta S - D_{2n} \Delta S$$

O

$$D_{1n} - D_{2n} = \rho_s \quad (2.20)$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad de carga libre deliberadamente colocada en la frontera. Téngase presente que la ecuación anterior se basa en el supuesto de que  $\mathbf{D}$  se dirige de la región 2 a la región 1, de modo que esta ecuación debe aplicarse en consecuencia. Si en la interfaz no existe ninguna carga libre,  $\rho_s = 0$  y la ecuación anterior se convierte en:

$$D_{1n} = D_{2n} \quad (2.21)$$

De esta manera, la componente normal de  $\mathbf{D}$  es continua de un lado a otro de la interfaz, esto es,  $D_n$  no sufre ningún cambio en la frontera. Puesto que  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ , la ecuación (2.21) puede expresarse como:

$$\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n} \quad (2.22)$$

Lo que indica que la componente normal de  $\mathbf{E}$  es discontinua en la frontera.

Con la ayuda de la Fig. 3 se puede visualizar la relación de las componentes tangenciales a las componentes normales de la intensidad de campo eléctrico, por medio de la tangente de los ángulos  $\alpha$  de las líneas de corrientes contra la normal  $n$ . Con ayuda de las expresiones (2.18) y (2.22), se llega a la siguiente relación:

$$\operatorname{tag} \alpha_1 : \operatorname{tag} \alpha_2 = E_{t,1} / E_{n,1} : E_{t,2} / E_{n,2} = \gamma_1 : \gamma_2 \quad (2.23)$$

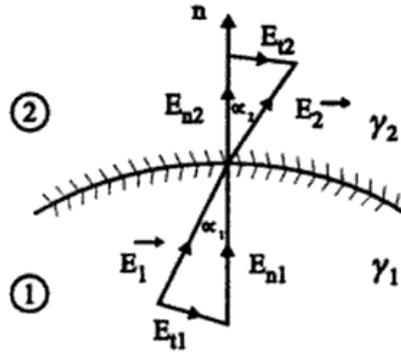


Fig. 3: Relación de las componentes tangenciales a las componentes normales de la intensidad de campo eléctrico

Se utiliza la conductividad  $\gamma$  la cual no es igual que  $\varepsilon$  pero son proporcionales, además es preferente usar la conductividad en estudios de puesta a tierra para mostrar los siguientes casos:

1. En relación con la Fig. 3, considérese que el medio 1 es materia completamente conductora, es decir, que tiene la condición:

$$\gamma_1 \rightarrow \infty \quad (2.24)$$

Mientras que el medio 2 tiene una conductividad  $\gamma_2$  finita; así que considerando la expresión (2.23) se deduce la relación [11]:

$$\lim \alpha_2 = 0 ; \text{ cuando } \gamma_1 \rightarrow \infty \quad (2.25)$$

De lo cual se infiere que en tales condiciones las líneas de corriente entran en dirección normal a la superficie frontera en el medio 2.

2. En este segundo caso, se considera que el medio 2 tiene la condición de un completo aislador, es decir:

$$\gamma_2 \rightarrow 0 \quad (2.26)$$

En tanto que ahora la conductividad del medio 1 permanece finita, entonces, con base en la expresión (2.23) se deduce la relación:

$$\lim \alpha_1 = \pi/2 ; \text{ cuando } \gamma_2 \rightarrow 0 \quad (2.27)$$

Se observa que en estas condiciones las líneas de corriente en la frontera circulan sobre la superficie  $S$ , las condiciones de este caso corresponden prácticamente a la tierra (medio 1) y a la atmosfera (medio 2), y la superficie  $S$  corresponde a la superficie del suelo. En cambio, en el caso 1, las condiciones son las que se presentan en la frontera

entre los electrodos (medio 1) y el terreno (medio 2), es decir que las líneas de corriente entran normal a la superficie frontera entre el electrodo y el terreno [6].

## 2.9 Efectos de la superficie del suelo

Las instalaciones de puesta a tierra dentro de cualquier instalación eléctrica se realizan en el suelo tanto en su superficie como en su proximidad siendo, además, sus dimensiones pequeñísimas en comparación con la esfera terrestre. En vista de ello, para el análisis de los sistemas de puesta a tierra es válido sustituir al globo terráqueo por un espacio semicircular, el cual queda limitado por medio de un plano contra la atmósfera, como se bosqueja en la Fig. 4.

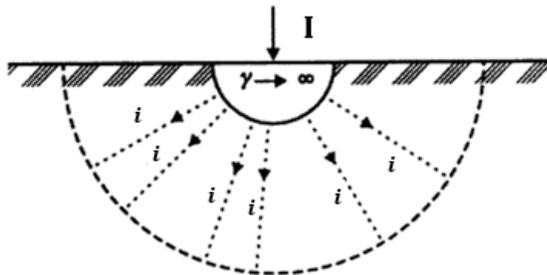


Fig. 4: Distribución de corriente normal del electrodo-tierra

Se acepta en principio, que todo el volumen de terreno comprendido dentro de tal semiesfera es totalmente homogéneo, es decir, de una misma naturaleza geológica y, por ende, con una conductividad ( $\gamma$ ) constante.

En rigor, el aire atmosférico presenta una cierta conductividad eléctrica en virtud de los iones móviles contenidos en él, pero en comparación con la conductividad de la tierra es tan pequeña que durante el análisis de los electrodos es válido despreciarla y, por lo tanto, considerar al aire atmosférico como un aislador, es decir, con la propiedad  $(\gamma)_{at} \cong 0$ .

Para tratar de resolver el problema fundamental del campo de corriente estacionario, se puede sustituir al sistema de electrodos  $n$  por una provisional esfera de radio  $a$ , cuyo punto central  $M$  se encuentra situado a la profundidad  $t > a$  bajo la superficie, según se muestra en la Fig. 5.

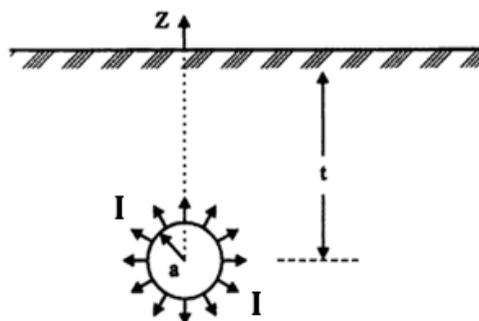


Fig. 5: Esfera enterrada a una profundidad  $t$

En la Figura anterior hay una corriente  $I$ , por lo tanto, las condiciones:  $J = \text{constante}$ ;  $t = \text{constante}$ ;  $a \rightarrow 0$ , conducen hacia el concepto fundamental de una fuente “puntual”, contenida en el punto  $M$  y de productividad  $I$ . El establecimiento del concepto de potencial facilita bastante la resolución de esa clase de problemas, en virtud de que la determinación del campo vectorial de intensidad eléctrica  $\vec{E}$ , se reduce entonces a solo encontrar el campo escalar  $V$ ; sin embargo, el hallazgo de la solución presenta aun considerables dificultades matemáticas. Mas el análisis de tales problemas se facilita bastante aplicando el método heurístico para la resolución de problemas especiales dentro del ámbito de la electrostática, denominado “método de la imagen reflejada”.

Durante el cálculo del campo de una fuente puntual con la presencia de una superficie de separación de dos medios con distinta conductividad (o resistividad), la influencia perturbadora de dicha superficie se suple por medio de la influencia del campo de unas fuentes puntuales complementarias (ficticias) situadas en un medio homogéneo (se sustituye la heterogeneidad existente). La intensidad de estas fuentes ficticias y también su disposición, son elegidas de tal forma que satisfagan las condiciones exigidas en la superficie separadora de los medios de diferente conductividad como se muestra en la figura 6(b). Por tanto, el campo de la fuente puntual originalmente en un medio heterogéneo se calcula ahora como si se encontrase en un medio homogéneo, pero para el conjunto de la fuente real y de la fuente ficticia. La fuente ficticia se sitúa en un punto “reflejado” de la fuente real (simétrico) respecto a la superficie de separación.

Considérese una carga puntual  $Q$  colocada a una distancia  $h$  del plano conductor perfecto de extensión infinita, como se observa en la Fig. 6 (a). La configuración de imágenes aparece en la Fig. 6(b). El campo eléctrico en el punto  $P(x, y, z)$  está dado por [11]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- = \frac{Q\mathbf{r}_1}{4\pi\epsilon_1 r_1^3} + \frac{-Q\mathbf{r}_2}{4\pi\epsilon_2 r_2^3} \quad (2.28)$$

Cabe señalar que cuando  $z=0$ ,  $\mathbf{E}$  solo cuenta con la componente  $z$ , lo que confirma  $\mathbf{E}$  es normal a la superficie conductora.

El potencial en  $P$  se obtiene fácilmente de la ecuación anterior usando  $V = -\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ . Así:

$$V = V_+ + V_- = \frac{Q}{4\pi\epsilon_1 r_1} + \frac{-Q}{4\pi\epsilon_2 r_2} \quad (2.29)$$

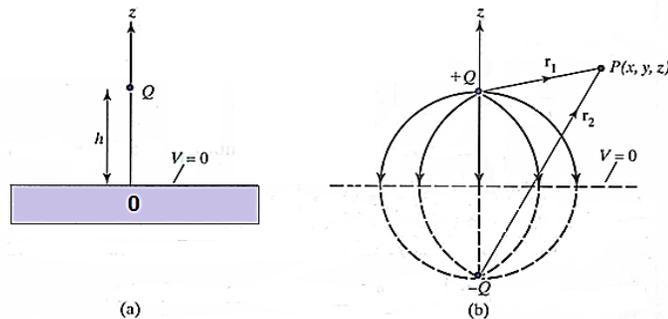


Fig. 6: (a) Carga puntual y plano conductor a tierra; (b) Configuración de imágenes y líneas de campo

A manera de ejemplo se nos muestra a continuación una forma relativamente sencilla de determinar los potenciales en el terreno homogéneo con una carga puntual situada en la superficie del suelo de la Fig. 7. [14].

El potencial " $V_1$ " a la distancia " $r_1$ " de electrodo será [6],

$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi r_1} \quad (2.30)$$

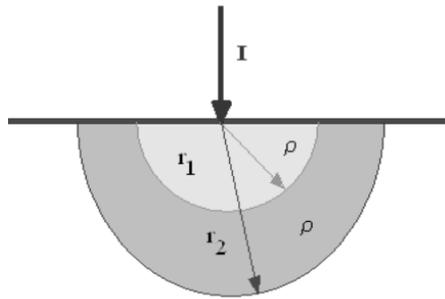


Fig. 7: Electrodo puntual de corriente en la superficie de un terreno

Donde:

" $\rho$ ": La resistividad del suelo.

" $I$ ": La corriente inyectada al suelo.

" $r_1$ ": Distancia a la que se calcula el potencial.

De igual forma para la distancia " $r_2$ " el potencial será,

$$V_2 = \frac{\rho I}{2\pi r_2} \quad (2.31)$$

La resistencia de la capa semiesférica comprendida entre las distancias " $r_1$ " y " $r_2$ ", según la ley de Ohm será:

$$R = \frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.32)$$

Si se tiene que las distancias " $r_1$ " y " $r_2$ " difieren entre si una cantidad pequeña " $dr$ ":

$$R \cong \frac{\rho}{2\pi r^2} dr \quad (2.33)$$

La corriente " $I$ " va atravesando sucesivamente capas semiesféricas cuyas resistencias respectivas decrecen con el cuadrado de la distancia. Por lo tanto, las capas de mayor radio influyen poco en la resistencia de contacto, concentrándose esta en la inmediata proximidad del electrodo [14].

## **CAPITULO 3: MÉTODO ELEMENTO FINITO APLICADO A REDES DE TIERRA**

### **3.1 Aplicación del Método de Elementos Finitos (MEF) en ingeniería eléctrica**

La solución de los campos electrostáticos se obtiene al resolver la ecuación de Laplace. La ecuación es definida por las condiciones de frontera que pueden ser del tipo de Dirichlet, Neumann o Cauchy. En la solución de problemas electrostáticos aparecen las condiciones de Dirichlet, que en el caso de electrodos y una distribución de campo homogéneo en los límites del dieléctrico de condensador.

El solucionar la ecuación de Laplace por métodos analíticos es posible para geometrías muy sencillas. Cuando la complejidad que exige el diseño se hace presente, es necesario recurrir a métodos analógicos o numéricos para su solución.

Sin embargo, debido al incremento de la velocidad y capacidad de almacenamiento de las computadoras y al desarrollo de nuevas técnicas de ordenamiento óptimo, se ha incrementado el uso de los métodos numéricos para diseño ya que permiten simular y resolver sistemas altamente complicados. Estas técnicas de ordenamiento permiten:

- Reducir la necesidad de experiencias con modelos y prototipos (costosos y lentos).
- Comparar fácilmente distintas alternativas de diseño para llegar al óptimo ingenieril.

Los principales métodos numéricos son los siguientes:

- El método de las diferencias finitas.
- El método de simulación de cargas.
- El método de elementos finitos.

La utilización de cada uno de estos métodos se acomoda al tipo de problema por resolver, existiendo la posibilidad de un empleo combinado de los métodos. Las diferencias finitas y elementos finitos se emplean para geometrías cerradas en las que sus condiciones de frontera son conocidas; casos típicos son los cables y maquinas eléctricas.

Para el diseño de geometrías abiertas, tales como líneas de transmisión, es aconsejable el método de simulación de cargas, el cual no exige un conocimiento previo de las condiciones de frontera del dieléctrico.

#### **3.1.1 El método de elementos finitos**

Este es un método de aproximación para la solución de modelos matemáticos representados por ecuaciones diferenciales y definidos en una región (continuo) por sus condiciones de frontera. El continuo se divide en partes físicas, llamadas elementos finitos, que poseen las características del medio. Mediante la adición de las soluciones para los elementos se resuelve toda la región.

Los tipos de elementos más empleados son el triángulo y el cuadrilátero. Los triángulos tienen ventaja por su adaptación a la representación de cualquier tipo de contorno en un plano.

Para la investigación se utilizó el método de computación de voltajes superficiales asumiendo una distribución de corriente no uniforme desarrollado por: Robert J. Heppe, Senior Member, IEEE.

Este método utiliza el MEF para asumir la corriente de distribución no uniforme, debido a que en la mayoría de la información sobre voltajes y gradientes de voltajes en la norma IEEE Std 80, se asume que la densidad de corriente de fuga es la misma en todos los puntos del cable.

En una red de tierra debajo de una subestación, cuando ocurre una condición de falla esta produce una elevación de alto voltaje, aunque usualmente los cables se encuentran dentro del mismo potencial en toda la red. En una cuadrícula uniformemente espaciada, la densidad de corriente de fuga es más pequeña cerca del centro de la cuadrícula y el más alto en los bordes y las esquinas. Produciendo en la cuadrícula diferentes niveles de potencial, los cuales se hacen necesario graficar para observar si no existen condiciones de peligro dentro de la red [5].

El problema se divide en dos partes: determinación de los valores de corrientes de fuga en segmentos de los conductores, y utilizando estas corrientes de fuga se utilizan para calcular la tensión en cualquier punto deseado dentro del área de malla.

### **3.2 Corriente de fuga**

Para encontrar la densidad de corriente de fuga, se divide conceptualmente el electrodo en varios segmentos, cada segmento de una sola pieza de alambre recto. Dentro de cada segmento, se supondrá que la densidad de corriente de fuga deberá ser constante, pero se le permitirá ser diferente de segmento a segmento [5].

Después de dividir conceptualmente la cuadrícula en segmentos, el siguiente paso es numerar los segmentos, números consecutivos para segmentos que pueden ser vistos por simetría para tener la misma corriente de fuga.

Para enumerar los segmentos que poseen la misma densidad de corriente, siendo un máximo de 8 segmentos que comparten el mismo tipo de densidad de corriente 4 horizontales y 4 verticales, se empiezan a enumerar desde la esquina inferior izquierda para ambos casos (segmentos horizontales y verticales) siguiendo por los segmentos ubicados en los extremos de la malla y siendo los segmentos del centro los últimos que se deben enumerar. Se muestra un ejemplo de numeración en la Fig. 8.

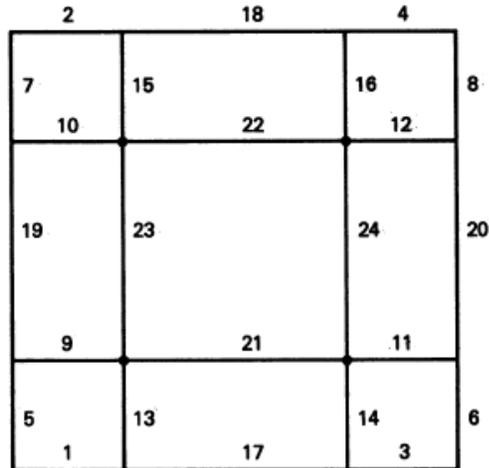


Fig. 8: Ejemplo de numeración de segmentos en una malla S9 asimétrica.

Los valores de corriente de fuga se pueden encontrar resolviendo el siguiente conjunto de ecuaciones lineales:

$$\begin{aligned}
 r_{11}i_1 + r_{12}i_2 + r_{13}i_3 + r_{14}i_4 &= v_1 \\
 r_{21}i_1 + r_{22}i_2 + r_{23}i_3 + r_{24}i_4 &= v_2 \\
 r_{31}i_1 + r_{32}i_2 + r_{33}i_3 + r_{34}i_4 &= v_3 \\
 r_{41}i_1 + r_{42}i_2 + r_{43}i_3 + r_{44}i_4 &= v_4
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

En este conjunto de ecuaciones  $r_{jj}$  es la suma de resistencias mutuas que comparten el mismo tipo de densidad de corriente de fuga, y  $r_{jk}$  es la suma de la resistencia mutua entre una corriente de un segmento  $j$  y una corriente de segmentos  $k$ . Las ecuaciones indican que la suma de los voltajes inducidos en un segmento por su propia corriente de fuga y la corriente de fuga de todos los demás segmentos debe ser igual a la elevación máxima de voltaje dentro de la malla (GPR). Expresado de forma más compacta, en una cuadrícula con  $n$  tipos de segmentos que tenemos:

$$\sum_{k=1}^n r_{jk}i_k = v_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, n
 \tag{3.2}$$

En su forma más compacta se aplica la ley de ohm,  $RI = V$ . Donde  $R$  es la matriz de valores de resistencia mutua y auto resistencia,  $I$  es la columna de corrientes de fuga en la  $n$  tipos de segmentos, y  $V$  es el vector de voltajes dentro de los  $n$  segmentos. Para estos tipos de problemas se asumirá que todos los segmentos se encuentran al mismo potencial.

El orden de generación de los coeficientes de  $r$  en la ecuación (3.2), se debe relacionar los términos de cuáles son los de mismo tipo de segmento por lo tanto se usarán las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
r_{ij} &= \sum_{k=1}^8 r'_{8(i-1)+1, 8(j-1)+k} \quad i = 1,2 \text{ y } j = 1,2 \\
r_{ij} &= \sum_{k=1}^8 r'_{4(i-1)+9, 8(j-1)+k} \quad i = 3,4 \text{ y } j = 1,2 \\
r_{ij} &= \sum_{k=17}^{20} r'_{8(i-1)+1, 4(j-3)+k} \quad i = 1,2 \text{ y } j = 3,4 \\
r_{ij} &= \sum_{k=17}^{20} r'_{4(i-1)+9, 4(j-3)+k} \quad i = 3,4 \text{ y } j = 3,4
\end{aligned} \tag{3.3}$$

### 3.3 Resistencia mutua en suelo uniforme

Ahora el problema se resume en cómo encontrar las resistencias mutuas que son producidas en los diferentes segmentos por lo tanto partiremos de la ecuación para encontrar el voltaje en cualquier segmento.

La ecuación para el voltaje producido por un punto P en la tierra debido a una fuente puntual de I Amp es [7]:

$$V = \frac{I\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \tag{3.4}$$

Donde  $\rho$  es la resistividad del suelo,  $r$  es la distancia entre P y la fuente de corriente, además  $r'$  es la distancia entre el punto P y la imagen de la fuente de corriente. Esta imagen es una segunda fuente de corriente imaginaria, localizada directamente encima de la fuente de corriente. Cambiando los sistemas de coordenadas en el eje X, Y y Z. y poniéndola fuente de corriente en el origen.

$$V = \frac{I\rho}{4\pi} \left( \sqrt{x^2 + y^2 + (D - z)^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + (D + z)^2} \right) \tag{3.5}$$

Donde  $x$ ,  $y$ ,  $z$  son las coordenadas del punto P y  $D$  es la profundidad de la fuente de corriente.

El voltaje producido en el punto P es debido a una fuente lineal, un segmento de cable de  $L_1$  metros teniendo una densidad de corriente de fuga constante a lo largo de la línea esta dado por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{I\rho}{4\pi L_1} \left[ \int \frac{ds}{r} + \int \frac{ds}{r'} \right] \tag{3.6}$$

Otra vez, la primera integral es causada por la fuente, y la segunda integral es causada por la imagen.

En orden para encontrar el voltaje promedio producido en un segmento línea de longitud  $L_2$ , por una línea de fuente de longitud  $L_1$ . Una integración desde la longitud de  $L_2$  y dividido por  $L_2$  se puede obtener el valor promedio [7]:

$$V = \frac{I\rho M}{4\pi L_1 L_2} \quad (3.7)$$

Donde:

$$M = \int \int \frac{dS ds}{r} \quad (3.8)$$

La resistencia mutua entre el segmento 1 y 2 es el voltaje producido en el segmento 2 por un amperio fuga desde el segmento 1. La simetría de ecuación (3.7) muestra que esta también será la tensión producida en segmento 1 por un amperio de fuga en el segmento 2. Entonces  $R_{1,2} = R_{2,1}$ , donde R es la resistencia mutua.

En ecuación (3.8) r es la distancia entre una fuente elemento de longitud ds y un elemento receptor de longitud dS. En el proceso de calcular resistencias mutuas M entre segmentos de alambre, una solución es con la fórmula de Neumann.

Para encontrar la resistencia mutua se deben encontrar dos valores de R, para permitir el efecto de la superficie: el valor para los dos cables en sí, y la mutua resistencia entre un cable y la imagen del otro. Para el caso de cables coplanares se encuentra R utilizando la ecuación (3.9) con  $z = 0$ , y otra vez con  $Z = 2D$ , donde D es la profundidad donde se encuentra enterrado el conductor, haciendo uso del método de las imágenes [11]:

$$R = \frac{M\rho}{4\pi L_1 L_2} \quad (3.9)$$

### 3.4 Integral de Neumann

La aplicación de la fórmula de Neumann no es sencilla en muchos casos porque la geometría de los circuitos dificulta el cálculo de las integrales correspondiente. La ecuación (3.10) muestra que N depende de la geometría del sistema es decir que es un parámetro que depende únicamente de la geometría.

$$N = \cos \theta \int \int \frac{dS ds}{r} \quad (3.10)$$

Donde  $\Theta$  es el ángulo entre los dos segmentos de línea, S y s se miden a lo largo de los segmentos de su intersección con su perpendicular común. Modificando su resultado (y notación) para eliminar la expresión matemática  $\cos \Theta$ .

$$N = \int \int \frac{dS ds}{r} = \int_a^b \int_A^B P(R) \cos \epsilon + Q_{(A-B)(a-b)} \quad (3.11)$$

Donde  $Q_{(A-B)(a-b)} = Q(Aa) - Q(Ab) + Q(Bb) - Q(Ba)$

Y la función Q(x) es para la función de densidad de carga y en cual Aa, Ab, Bb y Ba son distancias r entre las 4 terminales de los conductores como se muestra en la siguiente figura:

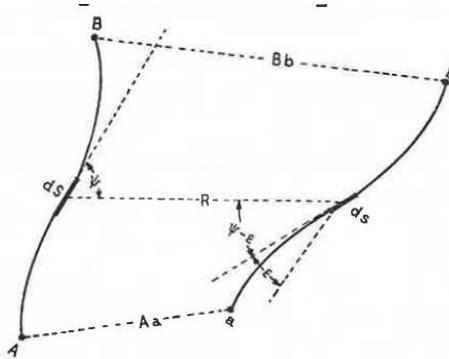


Fig. 9: Resistencia mutua entre dos segmentos

Basándose en la Fig. 9, los segmentos de línea AB y EF se muestran proyectados en planos perpendiculares entre la recta CG. E' y F' son las proyecciones de E y F en AB. A' y B' son las proyecciones de A y B en EF. CG y todas las demás distancias se toman como positivas excepto aquella que son medidas a lo largo de AB y EF.

Obtenemos la siguiente ecuación:

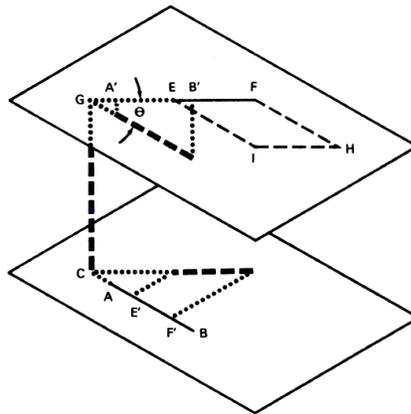


Fig. 10: Relación de las resistencias mutuas de dos segmentos cada una en su plano y las proyecciones del segmento opuesto

$$M = \iint \frac{dSds}{r} = CB \ln \frac{BF + B'F}{BE + B'E} - CA \ln \frac{AF + A'F}{AE + A'E} + GF \ln \frac{BF + F'B}{AF + F'A} - GE \ln \frac{BE + E'B}{AE + E'A} - \frac{CG \Omega}{\sin \theta} \quad (3.12)$$

Donde:

$$\Omega = \tan^{-1} \left( \frac{CG}{BF \tan \theta} + \frac{CB}{CG} * \frac{GF \sin \theta}{BF} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{CG}{BE \tan \theta} + \frac{CB}{CG} * \frac{GE \sin \theta}{BE} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{CG}{AF \tan \theta} + \frac{CA}{CG} * \frac{GF \sin \theta}{AF} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{CG}{AE \tan \theta} + \frac{CA}{AE} * \frac{GF \sin \theta}{BF} \right) \quad (3.13)$$

De la ecuación (3.13),  $\Omega$  es el ángulo solido suspendido en B por el paralelogramo formado EFHI construido en EF, con FH y EI paralelo e igual al segmento AB mostrado en la Fig. 10.

Sustituyendo las trayectorias de líneas por su valor en un plano x, y, z asumiendo que el eje x se encuentra a lo largo del segmento teniendo una longitud  $L_1$ , que se extiende a la derecha desde el origen en un punto A, como se muestra en la Fig. 11.

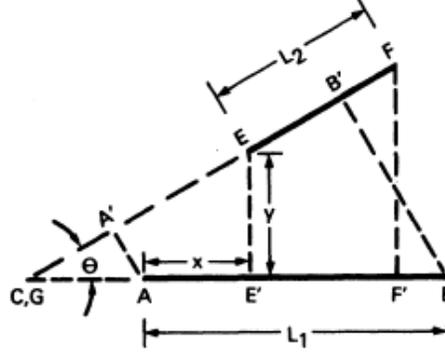


Fig. 11: Relación de resistencias mutuas en un plano donde existen ambos cables y las proyecciones de los segmentos de cable

Con lo anterior se define que la resistencia mutua es calculada a partir de los valores de  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , el ángulo  $\Theta$ ,  $L_1$  y  $L_2$ :

$$W^2 = y^2 + z^2; \quad x_F = x + L_2 \cos(\theta); \quad y_F = y + L_2 \sin(\theta) \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} BF &= \sqrt{(x_F - L_1)^2 + y_F^2 + z^2}; & GE &= \frac{y}{\sin \theta}; & GF &= \frac{y_F}{\sin \theta} \\ CE' &= \frac{y}{\tan \theta}; & CF' &= \frac{y_F}{\tan \theta}; & CA &= CE' - x \\ CB &= CA + L_1; & GA' &= CA \cos \theta; & GB' &= CB \cos \theta \\ BE &= \sqrt{(x - L_1)^2 + W^2}; & B'E &= GE - GB'; & B'F &= GF - GB' \\ AE &= \sqrt{x^2 + W^2}; & AF &= \sqrt{x_F^2 + y_F^2 + z^2}; & A'E &= GE - GA' \\ A'F &= GF - GA'; & E'A &= CA - CE'; & F'A &= CA - CF' \\ E'B &= CB - CE'; & F'B &= CB - CF'; & CG &= z \end{aligned} \quad (3.15)$$

Ahora se muestran los casos de diferentes aplicaciones de la ecuación (3.12) de resistencias mutuas según la posición de los segmentos.

### 3.5 Segmentos paralelos no colineales

Si AB y EF son paralelos, pero no colineales, las ecuaciones son mucho más simples. Tenemos  $\Theta = 0$  y  $CG = 0$ . Cuando  $\Theta$  disminuye hacia 0, la ecuación se enfoca en  $\Omega = \Theta (BE + AF - BF - AE) / CG$ , y por lo tanto  $CG * \Omega / \sin \theta = BE + AF - BF - AE$ .

Nuevamente dejando que el eje x se encuentre a lo largo del segmento AB con el origen en el punto A, y dejando  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ser las coordenadas del punto E, obtenemos la geometría mostrada en la siguiente Fig.. Aquí  $CG = y$ , los puntos CA y CB cambian según las ecuaciones anteriores, en la Fig. 12, CA es igual al punto x y CB es igual a  $L_1$ , por lo tanto, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
M = & L_1 \ln \frac{\sqrt{(x + L_2 - L_1)^2 + W^2} + x + L_2 - L_1}{\sqrt{(x + L_2)^2 + W^2} - (x + L_2)} \\
& + (x + L_2) \ln \frac{\sqrt{(x + L_2 - L_1)^2 + W^2} - (x + L_2 - L_1)}{\sqrt{(x + L_2)^2 + W^2} - (x + L_2)} \\
& - x \ln \frac{\sqrt{(x - L_1)^2 + W^2} - (x - L_1)}{\sqrt{(x)^2 + W^2} - x} - \sqrt{(x - L_1)^2 + W^2} \\
& - \sqrt{(x + L_2)^2 + W^2} + \sqrt{(x + L_2 - L_1)^2 + W^2} + \sqrt{x^2 + W^2}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Donde:  $W^2 = y^2 + z^2$

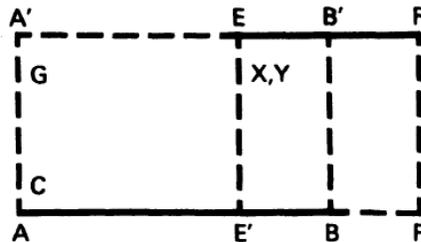


Fig. 12: Resistencia mutua entre dos segmentos paralelos no colineales.

### 3.6 Segmentos de líneas colineales paralelas

Aunque la ecuación (3.16) se derivó sobre la base de que  $CG \neq 0$ , se puede utilizar para segmentos colineales estableciendo que el punto “y” sea igual al radio del alambre. Esto evita que las expresiones se vuelvan indeterminadas mientras no se cambia la situación física lo suficiente como para ser significativo. Por ejemplo, si el valor del punto y e del punto z son 0, y la tercera expresión de la ecuación se convierte en  $0 * \ln (0/0)$ .

### 3.7 Segmentos colineales perpendiculares

Si los segmentos de línea son horizontales, perpendiculares (coplanar o sesgada), la situación es como la mostrada en la Fig. 13. De nuevo asumiremos que el eje x se encuentra a lo largo del segmento AB y las coordenadas del punto E son x, y, z.

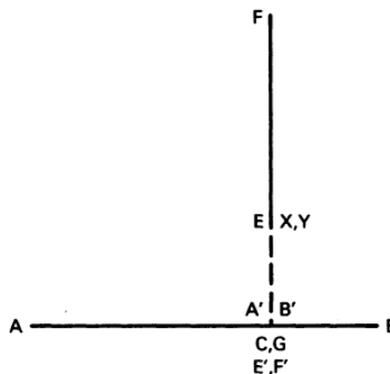


Fig. 13: Resistencia mutua entre dos segmentos colineales perpendiculares

La ecuación queda definida de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 M = & (L_1 - x) \ln \frac{\sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} + L_2 + y}{\sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2} + y} \\
 & + x \ln \frac{\sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} + L_2 + y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + y} \\
 & + (L_2 + y) \ln \frac{\sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} + L_1 - x}{\sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} - x} \\
 & - y \ln \frac{\sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2} + L_1 - x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - x} - |U|
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Donde  $U = 0$ , si  $z=0$  y si  $z \neq 0$  la expresión de  $U$  queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 U = z \left[ \tan^{-1} \left( \frac{(L_1 - x)(L_2 + y)}{z\sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{(L_1 - x)y}{z\sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2}} \right) \right. \\
 \left. - \tan^{-1} \left( \frac{-x(L_2 + y)}{z\sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{-xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

### 3.8 Auto Resistencia

La auto resistencia de un segmento, es la relación de voltaje y corriente sin tener en cuenta los efectos de otros segmentos. Alternativamente, puede considerarse como el producido en el segmento como resultado de la corriente que fluye fuera de ella, así como la resistencia mutua es el voltaje producido en él por la corriente fluyendo fuera de otro segmento. Calcular la auto resistencia de un hilo desnudo de longitud  $L$ , se utiliza la ecuación de segmento paralelos no colineales con  $L_1 = L_2 = L$ ,  $x = 0$ ,  $y = a$ , donde  $a$  es el radio de el alambre. Haciendo esto, encontramos que la ecuación (3.16) se simplifica a las siguientes ecuaciones y CAB para el  $M$  del propio alambre y el  $M$  de su imagen, respectivamente:

$$M = 2L \ln \left( \frac{a}{\sqrt{L^2 + a^2} - L} \right) + 2 \left( a - \sqrt{L^2 + a^2} \right) \tag{3.19}$$

$$M = 2L \ln \left( \frac{\sqrt{a^2 + 4D^2}}{\sqrt{L^2 + a^2 + 4D^2} - L} \right) + 2 \left( \sqrt{a^2 + 4D^2} - \sqrt{L^2 + a^2 + 4D^2} \right) \tag{3.20}$$

Sumando las ecuaciones (3.19) y (3.20), para obtener el total de  $M$  incluyendo el efecto de la imagen, sustituyendo  $\sqrt{L^2 + a^2} - L = \frac{a^2}{\sqrt{L^2 + a^2} + L}$ , simplificando obtenemos para la auto-resistencia (Incluyendo el efecto de la imagen) [7]:

$$\begin{aligned}
 R_{jj} = \frac{\rho}{2\pi L^2} \left[ L \ln \left( \frac{\sqrt{L^2 + a^2} + L}{a} * \frac{\sqrt{L^2 + a^2 + 4D^2} + L}{\sqrt{a^2 + 4D^2}} \right) + a + 2\sqrt{a^2 + 4D^2} \right. \\
 \left. - \sqrt{L^2 + a^2 + 4D^2} - \sqrt{L^2 + a^2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

### 3.10 Cálculo del voltaje superficial

Una vez obtenidas las corrientes de fuga en los diversos tipos de los segmentos, el voltaje de superficie en cualquier punto deseado se puede encontrar por superposición. Sumando las contribuciones de todos los segmentos, la ecuación a utilizar:

$$dV(x, y, D) = \frac{dI(u)}{du} * \frac{\rho}{4\pi} (\sqrt{(x-u)^2 + y^2 + z^2}) du \quad (3.22)$$

Donde el término  $\frac{dI(u)}{du} du$  es la resistencia mutua en medio de dos puntos en un medio de extensión infinita. En esta expresión, se asume que el potencial debido a la corriente del conductor es igual al del punto fuente en el mismo eje del conductor. El potencial debido a una corriente de segmento a lo largo del conductor queda de la siguiente forma:

$$V(x, y, D) = \frac{\rho}{4\pi} \int_0^L \sqrt{(x-u)^2 + y^2 + D^2} \frac{dI(u)}{du} du \quad (3.23)$$

Si la resistencia del conductor se asume que es despreciable, así que la caída de voltaje lo largo del conductor puede ser ignorado, la condición limite que se debe cumplir en la superficie del conductor es  $y = a$  esto hace que  $\frac{dV(x,y,D)}{dx} = 0$

$$0 = \frac{d}{dx} \int_0^L \sqrt{(x-u)^2 + y^2 + D^2} \frac{dI(u)}{du} du \quad (3.24)$$

Para encontrar la densidad de corriente de fuga se asume que va ser igual en todo el segmento y la ecuación (3.24) queda de la siguiente forma:

$$\frac{dI(u)}{du} = \frac{2I}{L} \quad (3.25)$$

Evaluando la integral y sustituyendo la ecuación anterior nos queda que el potencial superficial es igual:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + D^2} + x}{\sqrt{(x-L)^2 + y^2 + D^2} + x - L} \quad (3.26)$$

Donde  $\rho$  es la resistividad del suelo (asumiendo suelo homogéneo) y  $D$  es la profundidad. Un sistema de coordenadas en la que el eje  $x$  se encuentra sobre la superficie por encima y paralelo al segmento, con el origen sobre el extremo izquierdo del segmento, y el eje  $y$  es horizontal y perpendicular al eje  $x$ . Las cantidades  $x$  e  $y$  son las coordenadas de la superficie punto en este sistema.

La ecuación anterior se aplica para todos los segmentos horizontales, ahora para el cálculo del voltaje superficial aplicado a una varilla de longitud  $L$ , se utiliza la ecuación anterior unas pequeñas modificaciones.

$$V(y) = \frac{I\rho}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{L^2 + y^2 + D^2} + L}{\sqrt{y^2 + D^2}} \quad (3.27)$$

Donde se sustituye el valor de  $x$  por el valor de longitud  $L$  y el único que varía es la distancia  $Y$  alrededor de la varilla.

### 3.11 Análisis matemático de gradiente de potencial según IEEE 80- 86

Las siguientes ecuaciones son dadas para determinar el valor de voltajes de malla (en voltios) en la superficie de la tierra, asumiendo espaciamiento rectangular igual, la cual está enterrada a una profundidad  $h$  en un suelo homogéneo. Esta malla puede contener  $N$  conductores paralelos espaciados  $D$ , y un número indefinido de secciones de interconexión. Todos los conductores son de diámetro  $d$ , el espacio  $D$ , como  $d$  y  $h$  están en metros, ver Fig. 15.

Para la determinación del potencial de malla se utiliza la ecuación (3.31) la cual toma en cuenta únicamente un conductor para el cálculo de la componente vertical de la tensión de malla ( $E_y$ ) Fig.16, pero  $N$  conductores para el cálculo de la componente horizontal ( $E_x$ ) Fig 14.

$$E_{mesh} = E_y + E_x \quad (3.28)$$

Por lo general, en un medio homogéneo de resistividad  $\rho$ , la diferencia de voltaje entre dos puntos  $X_1$  y  $X_2$  a la distancia  $r_1$  y  $r_2$  respectivamente, de una fuente de línea que disipa corriente  $i$  por unidad de longitud es:

$$E_{12} = \frac{\rho i}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} (1/r) dr = \frac{\rho i}{2\pi} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (3.29)$$

Si la fuente de línea está enterrada a una profundidad  $h$  de una superficie plana, y los puntos  $X_1$  y  $X_2$  están ubicados en la superficie, la diferencia de voltaje entre ellos puede ser calculada como si este fuese causado por un conductor (1) en la profundidad  $h$ , y por una imagen reflejada (1\*) ubicada simétricamente a una distancia  $-h$  por encima del plano de tierra, asumiendo ahora, otra vez, el medio  $\rho$  llenando ambos planos.

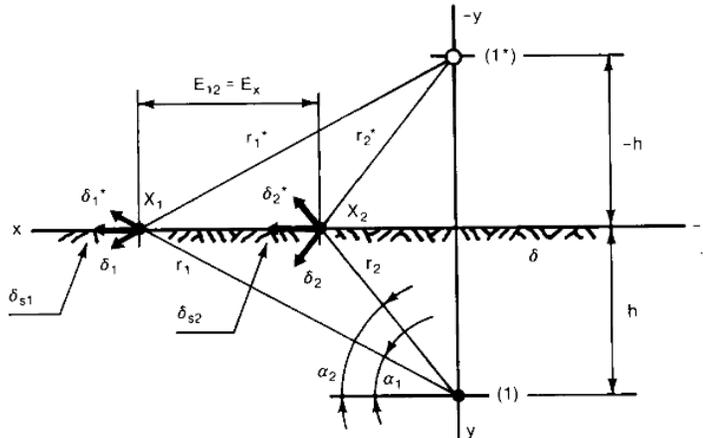


Fig. 14: Geometría para la derivación de  $E_x(1)$

De la geometría de la Fig. 14, se muestra que cualquier punto  $X(x,0)$  en la superficie (Aquí  $X = X_i, i = 1,2$ ), la densidad de corriente superficial por unidad de área  $\delta_s$  debido a la corriente  $i$  fluyendo del conductor (1) y el conductor (1\*) es, como un vector en el espacio,

$$\delta_s = \frac{i}{2\pi r} (\cos \alpha + j \sin \alpha) + \frac{i}{2\pi r^*} (\cos \alpha - j \sin \alpha) \quad (3.30)$$

Donde

$\alpha$  = Angulo entre la dirección de los vectores de corriente  $\delta$  y  $\delta^*$ , y el plano horizontal, Fig. 14.

$$abst(r) = abst(r^*) = (x^2 + h^2)^{1/2}, \quad y \cos \alpha = x/r, \sin \alpha = y/r,$$

La ecuación (3.30) puede escribirse como:

$$\delta_s = \frac{i}{2\pi r} (2\cos \alpha) = \frac{i}{\pi} \frac{x}{x^2 + h^2} \quad (3.31)$$

En consecuencia, la diferencia de voltaje entre los puntos  $X_1$  y  $X_2$ , como un escalar, es:

$$E_x(1) = \rho \int_{X_1}^{X_2} \delta_s ds = \frac{\rho i}{\pi} \int_{X_1}^{X_2} \frac{x dx}{x^2 + h^2} = \frac{1}{2\pi} \rho i \ln \left[ \frac{x_2^2 + h^2}{x_1^2 + h^2} \right] \quad (3.32)$$

Considerando ahora un conjunto de N conductores paralelos ubicados a la misma distancia y sus imágenes, como se muestra en la Fig. 15. Aquí la distancia entre los dos puntos dados en la superficie de la tierra,  $0(0,0)$  y  $X(-0.5D, 0)$  es  $0.5D$  y la distancia entre dos fuentes de línea es  $D$ . Con dicha geometría, la diferencia de potencial en la superficie del punto 0 a X, producido por  $k^{\text{th}}$  conductor y su imagen, puede ser expresado como:

$$E_x(1) = \frac{\rho i}{\pi} \int_{X_1}^{X_2} \frac{x(k) dx}{x(k)^2 + h^2}; \quad x(k) = (k-1)D + x; \quad k = 1, 2, \dots \quad (3.33)$$

Si se asume que el campo eléctrico de un conductor individual no es afectado por la presencia de otros conductores, entonces el efecto de N fuentes de línea y sus N imágenes en el resultado del voltaje entre 0 y X es la suma de cada contribución determinada por superposición, conductor por conductor:

$$E_x = \sum_1^N E_x(k) = \rho i \sum_1^N \frac{1}{2\pi} \ln \left[ \frac{[(k-1.5)D]^2 + h^2}{[(k-1)D]^2 + h^2} \right] \quad (3.34)$$

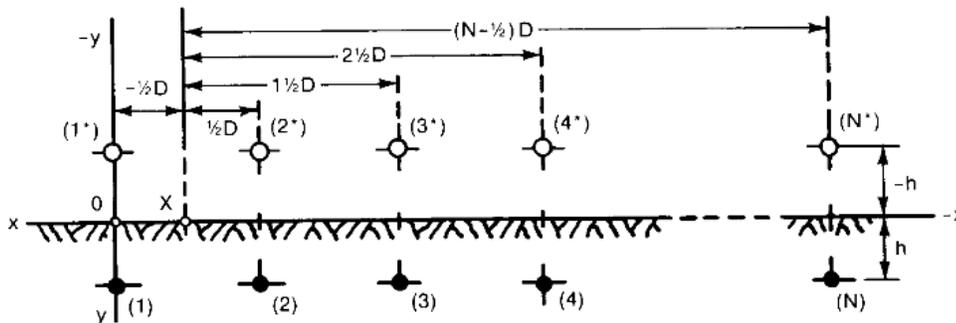


Fig. 15: Distancias entre la línea central de la esquina de malla y conductores paralelos con sus imágenes

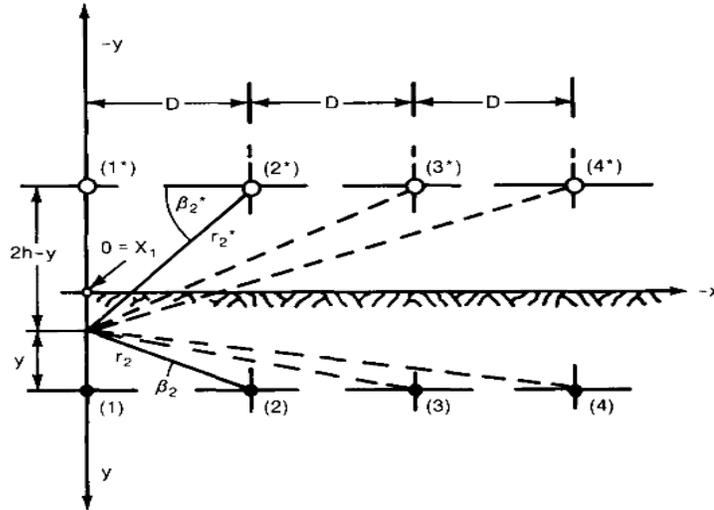


Fig. 16: Geometría para la derivación de  $E_y(k)$

Para obtener la potencia respecto a una tierra remota, asumimos que los N conductores y sus imágenes están al potencial  $E_o$  durante una falla a tierra, entonces:

$$E_o = R_g I_g \quad (3.35)$$

Donde:

$R_g$  = La resistencia del sistema de puesta a tierra.

$I_g$  = La corriente total que se introduce a la tierra, eso es,  $I_g = i \cdot L$ , siendo L la longitud total de los conductores enterrados.

El voltaje en el punto 0 de la Fig. 16, producido por el primer conductor y su imagen, es:

$$V_o(1) = E_o - E_y(1) \quad (3.36)$$

Ahora utilizando la Fig. 16 y la ecuación (3.28) e integrando desde la superficie de la fuente de línea real y de la imagen para el punto 0 en el límite aire-tierra,  $E_y(1)$  es calculado así:

$$E_y(1) = \frac{1}{2\pi} \rho i \left[ \int_{0.5d}^h \frac{1}{y} dy + \int_{2h-0.5d}^h \frac{1}{y^*} dy^* \right] \quad (3.37)$$

La ecuación anterior puede ser representada por una sola integral así:

$$E_y(1) = \frac{1}{2\pi} \rho i \int_{0.5d}^h \left( \frac{1}{y} - \frac{1}{2h-y} \right) dy$$

$$E_y(1) = \frac{1}{2\pi} \rho i \ln \left[ \frac{4h^2}{4hd - d^2} \right] \quad (3.38)$$

Se toma en cuenta lo presentado al inicio del tema que solo se calcula  $E_y(1)$ , habiendo comprobado que solo el conductor (1) y su imagen (1\*) aportan el potencial en el origen el cual es el punto donde se calcula todo  $E_y$ .

Ahora, el voltaje en el punto X de la Fig. 15 puede ser determinado de la siguiente forma:

$$V_x = E_0 - (E_x + E_y) \quad (3.39)$$

### 3.12 Potencial de toque

Dado que el potencial de toda la estructura de puesta a tierra es  $E_0$ , el voltaje de toque  $E_t$  entre las estructuras y cualquier otro punto en la superficie de la tierra que está a lo largo de la línea central dibujada entre el primer y segundo conductor periférico de un conjunto de N conductores paralelos de la Fig. 15, es:

$$V_{touch} = E_0 - V_x = E_x + E_y \quad (3.40)$$

### 3.13 Potencial de paso (1 metro)

Se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo del potencial de paso, el cual es calculado para una distancia de 1 metro entre dos puntos del potencial de toque:

$$V_{step} = |V_{touch_1} - V_{touch_2}| \quad (3.41)$$

### 3.14 Análisis gráfico de cuadrículas cuadradas sin varillas de tierra en suelo uniforme

La norma IEEE 80-1986 presenta una serie de gráficas para el cálculo del potencial en la esquina de mallas cuadradas para los parámetros  $R_g$ ,  $E_{step}$  y  $E_{malla}$ , siendo estos dos últimos los de mayor importancia y a quienes se aplica una corrección en el cálculo del potencial en la esquina:

**Potencial de malla en la esquina:** Es calculado al multiplicar el GPR por el porcentaje de voltaje de malla obtenido de la Fig. 17:

$$E_m = GPR \cdot \frac{\text{porcentaje del valor de potencial de malla graficado}}{100} \quad (3.42)$$

La Fig. 17 muestra el porcentaje de potencial de malla en la esquina del GPR para una profundidad de 0.5 m y diámetro de conductor de 0.01 m.

**Potencial de paso en la esquina:** Es calculado usando el RPR y el porcentaje de potencial de paso en la esquina obtenido de la Fig. 18:

$$E_s = GPR \cdot \frac{\text{porcentaje del valor de potencial de paso graficado}}{100} \quad (3.43)$$

La Fig. 18 muestra el porcentaje de potencial de paso en la esquina del GPR para una profundidad de 0.5 m y diámetro de conductor de 0.01 m.

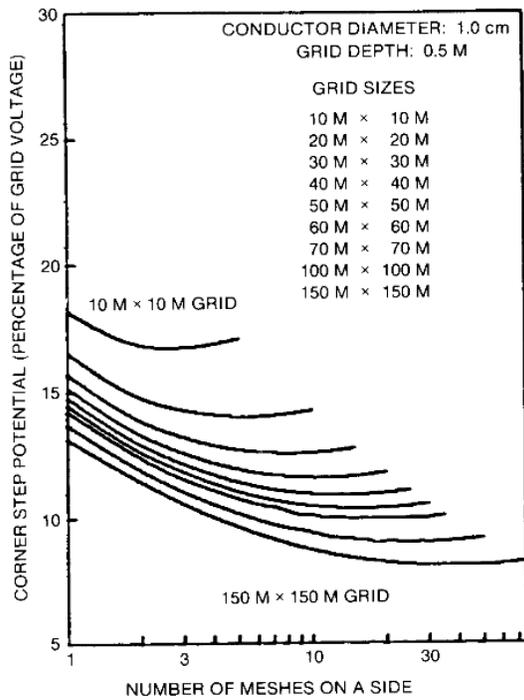


Fig. 18: Porcentaje de potencial de paso

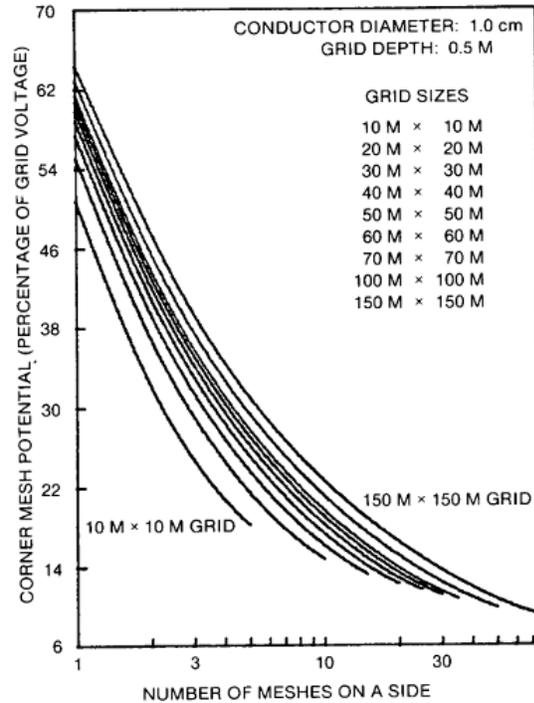


Fig. 17: Porcentaje de potencial de malla

### 3.15 Cálculo de resistencia de puesta a tierra

$$R_g(h) = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} + \left( 1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (3.44)$$

Donde:

$h$  = Profundidad de entierro de la malla en metros

$A$  = Area de la malla en  $m^2$

$L$  = Longitud total de conductor en m

### 3.16 Ejemplo de la aplicación del método presentado por la IEEE 80-1986

Al utilizar las ecuaciones anteriores, se aplican para una malla S4 de 10 metros de largo por 10 metros de ancho, resistividad de 75.7 ohm, corriente de falla de 100 Amp, profundidad de 0.5 m, diámetro de conductor de 10 mm.

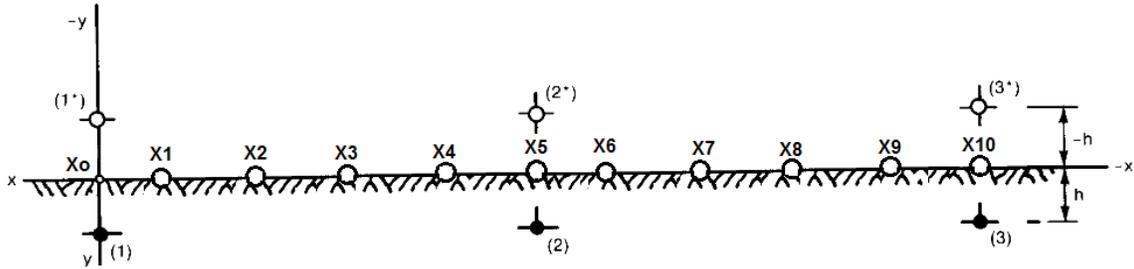


Fig. 19: Conductores paralelos (formando malla S4), cálculo de 10 puntos superficiales.

En donde para una longitud de 10 metros se toman 10 puntos (Xo hasta X10), en donde se presentan 3 conductores con sus imágenes (malla S4).

- Se calcula de la diferencia de potencial de los 10 puntos con respecto al origen (punto Xo), utilizando la ecuación (3.34) para el cálculo de Ex:

Nº Punto	K=1	K=2	K=3	Ex (V)
Xo-x1	1.6094	-0.4407	-2.2101	19.24
Xo-x2	2.8332	-1.0042	-0.4448	27.7941
Xo-x3	3.6109	-1.7819	-0.7107	22.4552
Xo-x4	4.1743	-3.0056	-1.0172	3.0417
Xo-x5	4.6151	-4.6151	-1.3788	-27.6880
Xo-x6	4.9767	-3.0056	-1.8195	3.0417
Xo-x7	5.2832	-1.7819	-2.3830	22.4552
Xo-x8	5.5490	-1.0042	-3.1607	27.7941
Xo-x9	5.7838	-0.4407	-4.3845	19.2486
Xo-x10	5.9939	0	-5.9939	0

Tabla 1: Cálculo de diferencia de potencial en la superficie

- Cálculo de  $E_y$  en el origen con el efecto de un solo conductor (1) y (1\*) ya que los demás conductores paralelos no hacen efecto y se desprecian, usando la ecuación (3.38).

$$E_y(1) = 71.94041 (V)$$

- Calculando la resistencia de puesta a tierra con la ecuación (3.44).

$$R_g = 4.3377 \text{ Ohm}$$

- Para el cálculo del GRP utilizamos la ecuación (3.35).

$$GPR = 433.774 (V)$$

- Cálculo del potencial absoluto de malla usando ecuación (3.39).

- Cálculo del potencial de malla en la esquina utilizando la Fig. 17 y la ecuación (3.42):

$$E_m = 294.97 (V)$$

Vx (V)	Dist (m)
294.97	0
342.585141	1
334.039684	2
339.378571	3
358.792054	4
389.521818	5
358.792054	6
339.378571	7
334.039684	8
342.585141	9
294.97	10

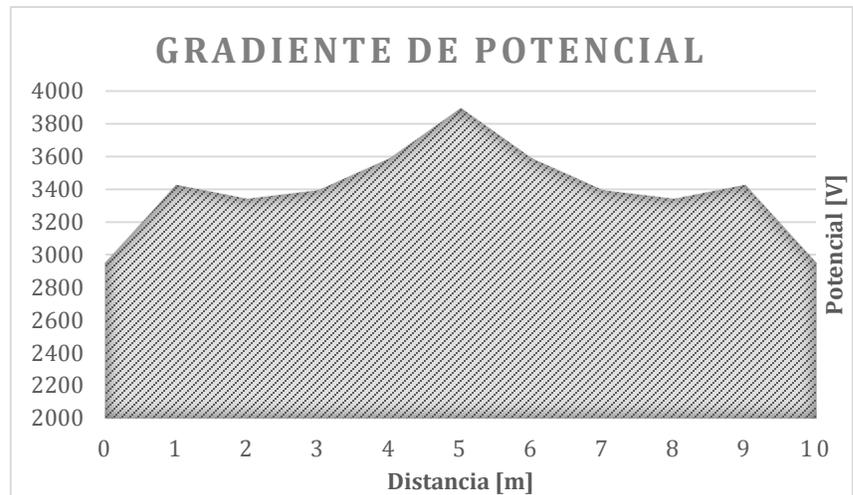


Tabla 2: Datos para graficar el gradiente de potencial

Fig. 20: Perfil de gradiente de potencial IEEE Std 80-1986

- Cálculo del potencial de toque utilizando la ecuación (3.40).

Vt (V)	Dist (m)
138.804219	0
91.1890779	1
99.7345348	2
94.3956475	3
74.9821646	4
44.2524006	5
74.9821646	6
94.3956475	7
99.7345348	8
91.1890779	9
138.804219	10

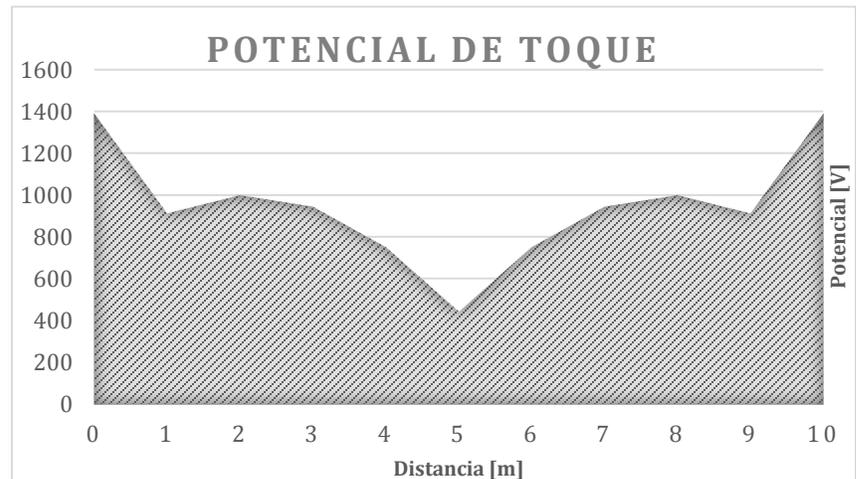


Tabla 4: Datos para graficar el gradiente de potencial

Fig. 21: Perfil de potencial de toque IEEE Std 80-1986

- Cálculo del potencial de paso usando ecuación (3.41), tomando la diferencia entre dos puntos de la gráfica de toque espaciados 1 metro:

Cálculo del potencial de paso en la esquina utilizando la Fig. 3.18 y la ecuación (3.43):

$$E_s = 73.57 (V)$$

Vs (V)	Dist. (m)
73.57	0
47.6151408	1
8.54545683	2
5.3388873	3
19.4134829	4
30.729764	5
19.4134829	6
5.3388873	7
8.54545683	8
47.6151408	9
73.57	10

Tabla 5: Datos para graficar el potencial de paso

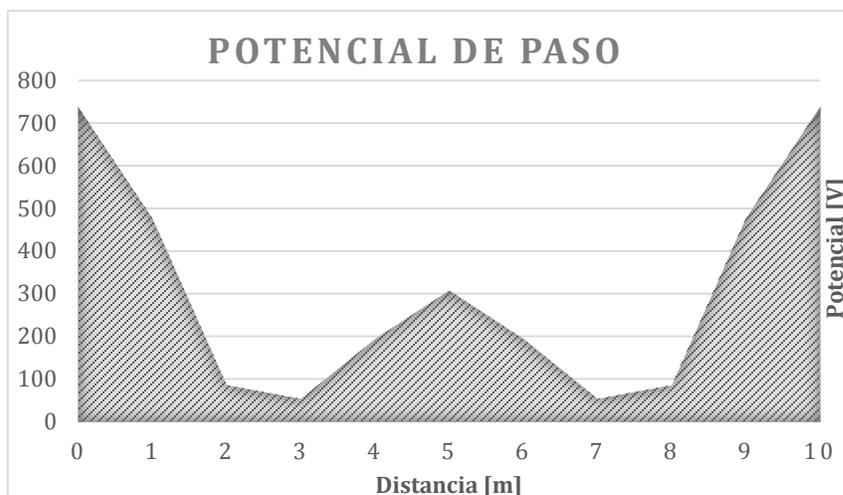


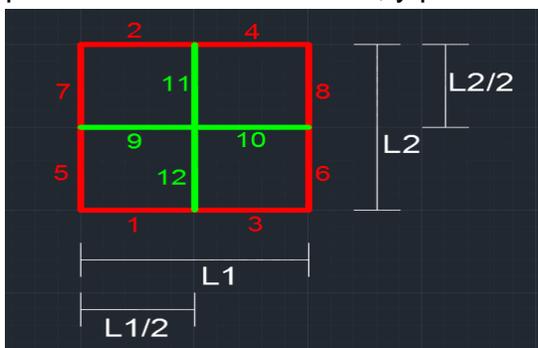
Fig. 22: Perfil de potencial de paso IEEE Std 80-1986

La implementación del análisis matemático de la norma IEEE 80-1986, presenta solamente el perfil de la diagonal de la malla, cabe destacar que es un método muy fácil de implementar para cualquier configuración de malla.

### 3.17 Cálculo de Malla S4

Aplicando el método de las imágenes, se modeló la configuración S4 sin varillas para los datos siguientes:

Resistividad del suelo de 75.7 Ohm, conductor #4/0, longitud de la malla 10x10 metros, profundidad de 0.5 metros, y para una corriente  $I_{sc}$  de falla de 1000 Amperios.



#### Datos a introducir:

L1(m)= E-W espaciado=	10
L2 (m)= N-S espaciado=	10
D (m)= profundidad de entierro=	0.5
$\rho$ (Ohm - m) = Resistividad del suelo =	75.7
a (m)=Radio del conductor (Cable 4/0)=	0.007
Isc=Corrientes de falla [Amp] =	1000
L1/2=	5
L2/2=	5

Fig. 23: Malla S4 calculada y valores introducidos en la hoja de cálculo

En la Fig. 23 se presenta la configuración de malla S4, en donde observamos dos tipos de segmentos, el tipo de segmento 1 está compuesto por los segmentos de color rojo y el tipo de segmento 2 está compuesto por los segmentos de color verde, en ese caso se tendrán dos tipos de corrientes por segmento.

- Cálculo de resistencias mutuas.

Derivamos de la ecuacion (3.3), la siguiente ecuacion para encontrar las resistencias mutuas:

$$r_{i,j} = \sum_{k=8(j-1)+1}^{n=8+(j-1)4} r'_{8(i-1)+1,k} \quad \begin{matrix} i=1,2 \\ j=1,2 \end{matrix} \quad (3.45)$$

Resolviendo la sumatoria para los diferentes valores de j e i se obtuvo las siguientes ecuaciones de resistencia entre tipos de segmentos:

$$\begin{aligned} r_{1,1} &= r_{1,1} + r_{1,2} + r_{1,3} + r_{1,4} + r_{1,5} + r_{1,6} + r_{1,7} + r_{1,8} \\ r_{1,2} &= r_{1,9} + r_{1,10} + r_{1,11} + r_{1,12} \\ r_{2,1} &= r_{9,1} + r_{9,2} + r_{9,3} + r_{9,4} + r_{9,5} + r_{9,6} + r_{9,7} + r_{9,8} \\ r_{2,2} &= r_{9,9} + r_{9,10} + r_{9,11} + r_{9,12} \end{aligned} \quad (3.46)$$

En donde  $r_{1,1}$ ,  $r_{1,2}$ ,  $r_{2,1}$ ,  $r_{2,2}$ , son las resistencias mutuas entre los tipos de segmentos, las cuales estan compuestas por las sumatorias de resistencias mutuas entre el total de segmentos que componen cada tipo.

$r_{1,1} =$	31.33550222	$r_{2,1} =$	20.40724303
$r_{1,2} =$	10.20405732	$r_{2,2} =$	28.26024163

- Cálculo de corrientes por tipo de segmento

Se obtuvo dos tipos de corrientes debido a que la malla S4 tiene dos tipos de segmento, aunque siempre se asume que todos los segmentos están al mismo potencial GPR.

Calculando la  $R_g$  con la ecuacion (3.44), y GPR:

$R_g [\text{Ohm}] =$	4.337742188	$GPR [V] =$	4337.742188
----------------------	-------------	-------------	-------------

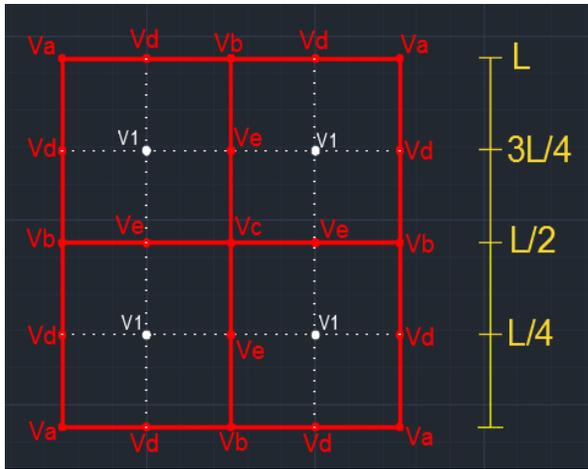
Usando la ecuación (3.1) se obtiene el siguiente sistema de dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} r_{1,1}i_1 + r_{1,2}i_2 &= V_1 \\ r_{2,1}i_1 + r_{2,2}i_2 &= V_2 \end{aligned} \quad (3.47)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior obtenemos la corriente por segmento:

$i_{2\_segm} =$	58.75
$i_{1\_segm} =$	95.625

- Cálculo de potenciales superficiales:



Calculo de Va:

# Segmento	x	y	V
1	0	0	690.84621
2	0	-10	110.751552
3	-5	0	159.283953
4	-5	-10	92.1299337
5	5	0	690.84621
6	5	-10	110.751552
7	10	0	159.283953
8	-10	-10	72.1748276
9	0	-5	124.273673
10	-5	-5	79.4639981
11	10	-5	79.4639981
12	5	5	124.273673
		Va=	2493.54353

Fig. 24: Puntos a calcular (potencial) de la malla, ejemplo de cálculo de un punto  $V_a$

En la Fig. anterior se presenta los diferentes puntos calculados, así como un ejemplo del cálculo del punto  $V_a$  (esquina de la malla).

Se presenta la grafica 3D del potencial superficiales dentro de una malla con una configuración S4:

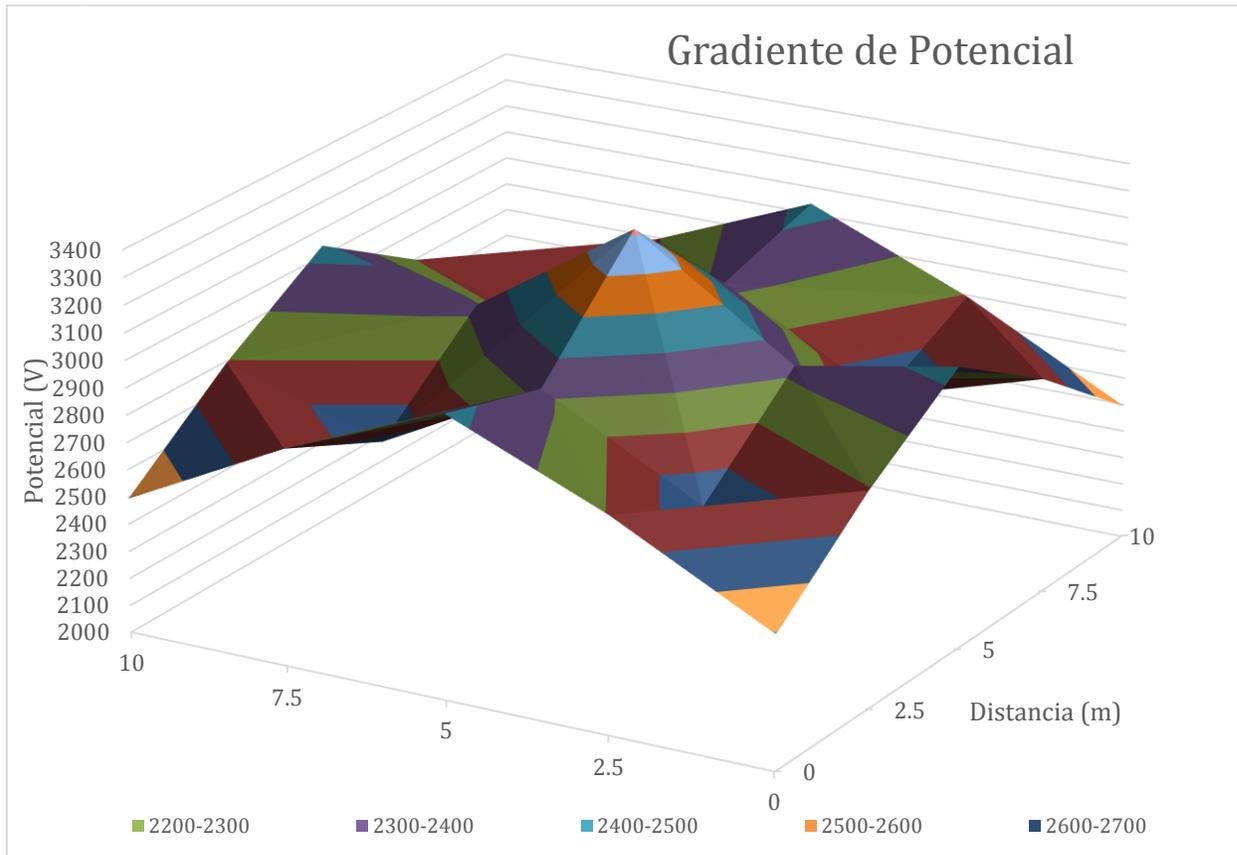


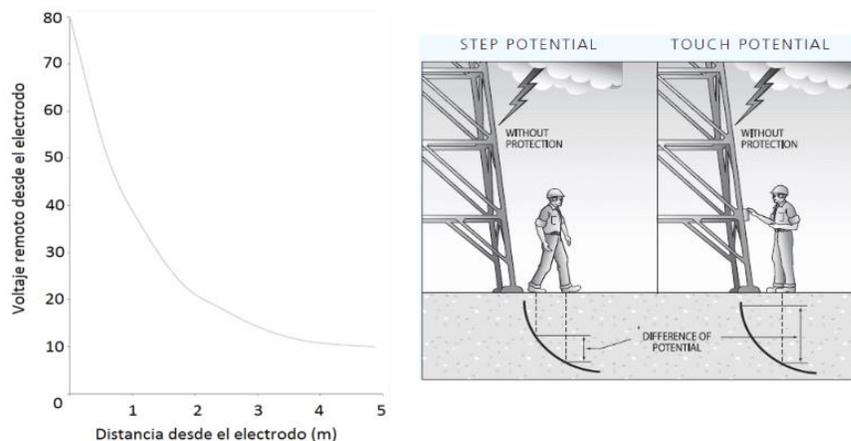
Fig. 25: Grafica 3D del gradiente de potencial de una configuración S4 sin varillas

## CAPITULO 4: MEDICIONES A REDES DE TIERRA

### 4.1 Necesidad de las mediciones de potencial eléctrico

Al ocurrir una falla en una subestación las estructuras metálicas pueden quedar energizadas a una diferencia de potencial peligrosa en caso de no estar aterrizadas correctamente. Aun estando aterrizada, por la ley de Ohm, dada una corriente de falla circulando a través de una resistencia provoca una caída de voltaje en sus extremos, teniendo así el concepto de GPR. A partir de este efecto y la resistencia de tierra circundante en el sistema (IEEE Std. 80, 2013) se tienen dos potenciales importantes a la hora de evaluar la seguridad en una subestación, el potencial de toque y potencial de paso.

Teniéndose una curva de la distribución del gradiente de potencial Fig. 26, se puede observar que, a medida se aleja del electrodo de tierra, el potencial medido entre un punto a una distancia  $x$  y un punto remoto que se asume a potencial de 0V, disminuye rápidamente de forma exponencial. Además, tanto el potencial de toque como el de paso dependen directamente de esta curva y del valor de GPR. En este punto surge la necesidad de comprobar que el valor teórico de diseño se cumpla en la práctica para garantizar que el nivel de aislamiento del equipo de protección personal, con el que se esté trabajando dentro de la subestación, sea superior al del voltaje al que se vería sometida una persona.



### 4.2 Objetivos de las mediciones de potenciales a tierra

- Comprobar el método utilizado para la medición, basado en la utilización de un telurómetro.
- Obtener resultados reales de diferentes configuraciones de puesta a tierra como lo son: malla S1 con cuatro varillas, varilla, malla S4 sin varillas.
- Realizar un mapeo 3D de los potenciales en las diferentes configuraciones de puesta a tierra.
- Comparar resultados de las mediciones de potenciales con resultados teóricos obtenidos mediante programas comerciales y programa realizado en MATLAB basado en el método de elementos finitos.

### 4.3 Métodos de medición

#### 4.3.1 Arreglo de Wenner para medir resistividad del suelo

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

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

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

En el Arreglo de Wenner los electrodos de prueba son espaciados a una misma distancia como se muestra en la Fig. 27.

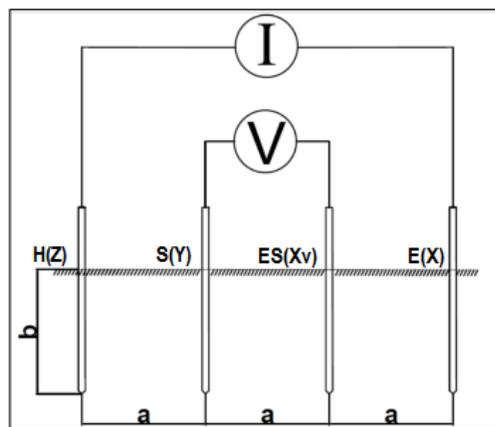


Fig. 27: Arreglo de Wenner

En donde:

H(Z) y E(X): Electrodos de corriente.

S(Y) y ES(Xv): Electrodos de potencial.

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

A partir de la resistencia se puede calcular la resistividad aparente del suelo medida en  $\Omega.m$  para una profundidad "a" igual a la separación entre electrodos con la ecuación (4.1) ya establecida para el arreglo de Wenner:

$$\rho = 2\pi aR \text{ } [\Omega.m] \quad (4.1)$$

### 4.3.2 Caída de potencial (62%) para medir resistencia de puesta a tierra

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

El método consiste en inyectar una corriente constante entre el electrodo en estudio y el electrodo de corriente, seguidamente leer el valor de voltaje entre el electrodo en estudio y el electrodo de corriente, seguidamente leer el valor de voltaje entre el electrodo en estudio y el electrodo de potencial, todo esto utilizando equipo como un voltímetro, un amperímetro y una fuente de corriente como se presenta en la Fig. 28.

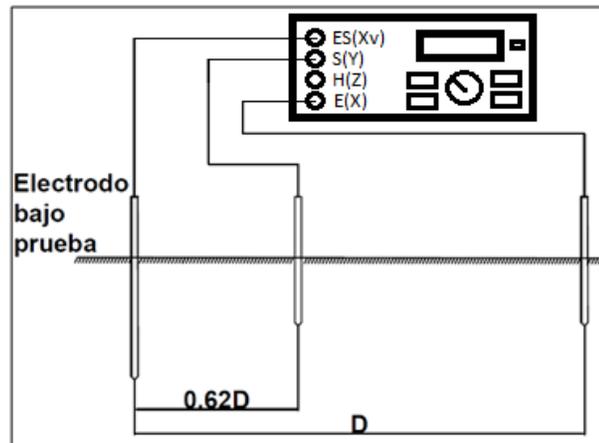


Fig. 28: Método de caída de potencial (62%)

La distancia D, debe de ser 5 veces la longitud más larga del sistema de puesta a tierra en estudio [3], el electrodo de potencial debe de estar a una longitud que sea el 62% de la longitud entre el electrodo o sistema de puesta a tierra en estudio, esta distancia se basa en la posición teóricamente correcta para medir la exacta impedancia de los electrodos para un suelo con resistividad uniforme.

### 4.3.3 Método de medición de potenciales superficiales con telurómetro convencional

El funcionamiento se basa en la medición de la impedancia entre dos puntos y estimación del gradiente de potencial, potenciales de toque y paso, a partir de la corriente de falla esperada. La función principal del equipo es medir un valor de resistencia inyectando una corriente en un electrodo alejado del área de efecto de la red de tierra que circule entre él y una estructura aterrizada midiendo el voltaje inducido entre esta misma y un punto en la superficie de la subestación obteniendo así una impedancia Thévenin entre los puntos de contacto para la determinación del potencial de toque. Utilizando la función manual del telurómetro portátil modelo 6471, la cual inyecta una corriente ascendente y el usuario decidirá cuándo pararla para tomar los datos de voltajes.

Las corrientes a inyectar por parte del equipo están en el rango de los miliamperios, así mismo el voltaje presentado esta en mili voltios. Es necesario realizar una multiplicación por una constante adecuada para obtener valores de una falla real.

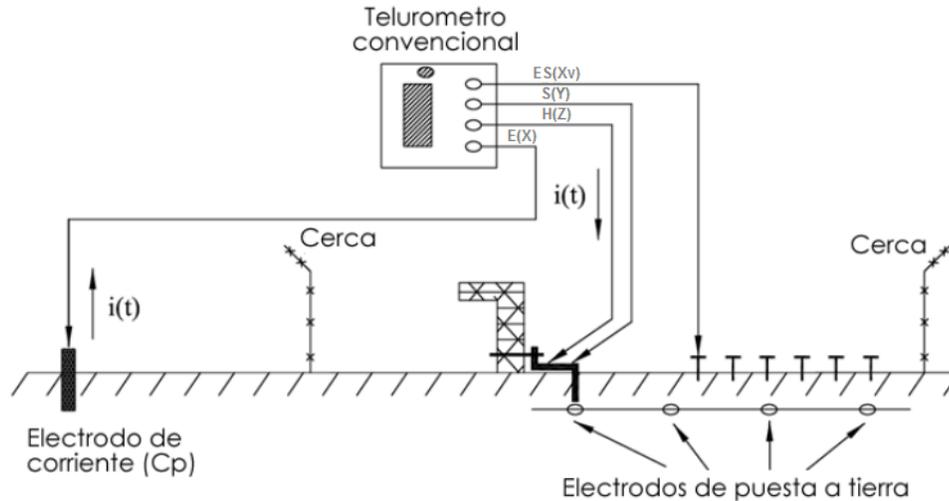


Fig. 29: Ubicación de sondas de medición del Telurómetro para medición gradiente de potencial y potenciales de toque y paso

La Fig. 29 muestra un esquema de las conexiones a realizar utilizando los terminales para los electrodos de corriente del equipo (H(Z) y E(X)), ubicando el primero en un electrodo enterrado fuera del campo de efecto del sistema de tierra bajo medición (Cp) y el segundo en una estructura metálica aterrizada para la cual se determinará el potencial de toque, en este mismo punto se ubica uno de los electrodos de potencial S(Y) y el sobrante ES(Xv) se conecta en un electrodo enterrado unos pocos centímetros de la superficie de la subestación. Para la determinación del potencial de paso se lleva a cabo el mismo procedimiento descrito en el método anterior a partir de las mediciones del potencial de toque.

Otra forma válida para la determinación del potencial de paso es tomar dos mediciones de potencial de toque, una con la punta de medición del suelo separada un metro respecto de la otra, y evaluar la diferencia [13], esto se basa en las ecuaciones 4.2 y 4.3:

$$V_{Step} = V_{touch1} - V_{touch2} = (V_{estr1} - V_{estr2}) \quad (4.2)$$

$$V_{Step} = V_{sup2} - V_{sup1} \quad (4.3)$$

En donde:

$V_{estr1}$  : Voltaje en la superficie de la estructura metálica conectada a tierra.

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

#### 4.3.4 Medición del GPR

Para la medición del GPR en una malla de prueba, solamente es necesario inyectar una corriente de falla controlada ( $I_g$ ) en la malla de prueba, retornando en un punto lejano fuera del área de influencia, así cerrando el circuito de circulación de corriente telúrica. La norma IEEE Std 81 no describe un procedimiento para la medición del GPR, por lo tanto el cálculo se dejara a partir de la ecuación (3.35), tomando como datos principales la impedancia de puesta a tierra calculada por el método de la caída de potencial, y la corriente de falla ya sea real o controlada que circula por tierra.

La medición del potencial generado por una corriente inyectada se realiza entre una tierra remota que se considera a un potencial de 0V y un punto de la subestación. La distancia debe considerarse lejana, tendiendo al infinito idealmente, en el caso de las mediciones físicas realizadas, se tomó como parámetro de longitud infinita el largo del cable disponible por el equipo 6471 el cual fue de 34 metros, los resultados se presentan en las secciones (4.8 a 4.10). El mismo criterio es utilizado para seleccionar la distancia del electrodo de corriente en la medición de los potenciales superficiales mediante el uso de telurómetro.

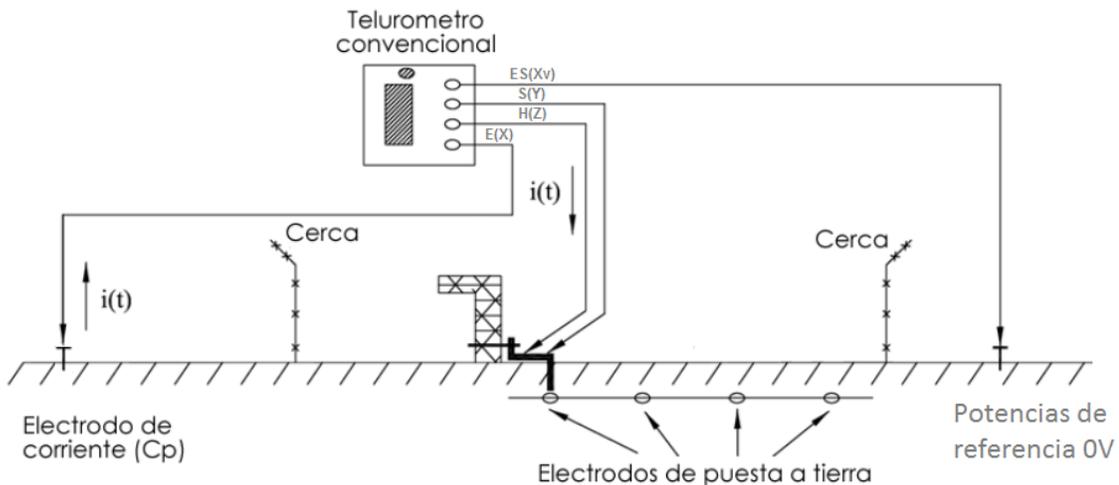


Fig. 30: Ubicación de sondas de medición del Telurómetro para medición de GPR

#### 4.4 Equipo de medición

El equipo utilizado para realizar las diferentes mediciones fue el DIGITAL GROUND RESISTANCE AND SOIL RESISTIVITY TESTER 6471 [23]. Es un instrumento portable diseñado para medir:

- Resistencia de tierra con dos pinzas de corrientes (No necesita electrodos auxiliares).
- Conexión o enlace de Resistencia (sensibilidad de Kelvin 2-polos y 4 polos).
- Resistencia de tierra (3-polos o 4-polos).
- Acoplamiento de resistencia a tierra.
- Resistividad de suelo (Método de Wenner o Schlumberger).

La medición del modelo 6471 es de 0.01 a 99.99kΩ con rango automático, buscando automáticamente el rango óptimo de medición, prueba de frecuencia y prueba de corriente.

Permite la utilización del modo manual, en donde el usuario debe parar la medición, de otra manera continúa midiendo y variando valores de corrientes y voltajes.



Fig. 31: Telurómetro modelo 6471

#### 4.5 Sitios de medición

Configuración	Sitio	Fecha	Mediciones realizadas	Condiciones de terreno
Varilla de 3 pies, a 0.5 m de profundidad.	Universidad de El Salvador, San Salvador	14/12/2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistividad</li> <li>Resistencias PAT</li> <li>Potenciales de toque y paso</li> <li>GPR</li> </ul>	Terreno seco
Malla S1, 3x3m a 0.5m de profundidad	Universidad de El Salvador, San Salvador	14/12/2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistividad</li> <li>Resistencias PAT</li> <li>Potenciales de toque y de paso</li> <li>GPR</li> </ul>	Terreno seco
Malla S4, 5x5m a una profundidad de 0.4m	Universidad de El Salvador, San Salvador	17/01/2018	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistividad</li> <li>Resistencias PAT</li> <li>Potenciales de toque y de paso</li> <li>GPR</li> </ul>	Terreno húmedo

Tabla 7: Sitios de medición

#### 4.8 Resultados de mediciones en una varilla

Se utilizó una varilla de 3 pies de longitud a una profundidad de 0.5m.



Fig. 32: Varilla de 3 pies

Resultado de las mediciones:

Resistividad [ $\Omega.m$ ]	Resistencia PAT [ $\Omega$ ]	GPR [V]	If (A)
83.3	83.1	180.2	2.1

Tabla 8: Resultados de medición de varilla

#### 4.8.1 Datos del gradiente de potencial

Distancia [m]	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Potencial [V]	37.81	23.72	17.08	12.69	10.16	7.97	6.84	5.86	4.97

Tabla 9: Gradiente de potencial de una varilla

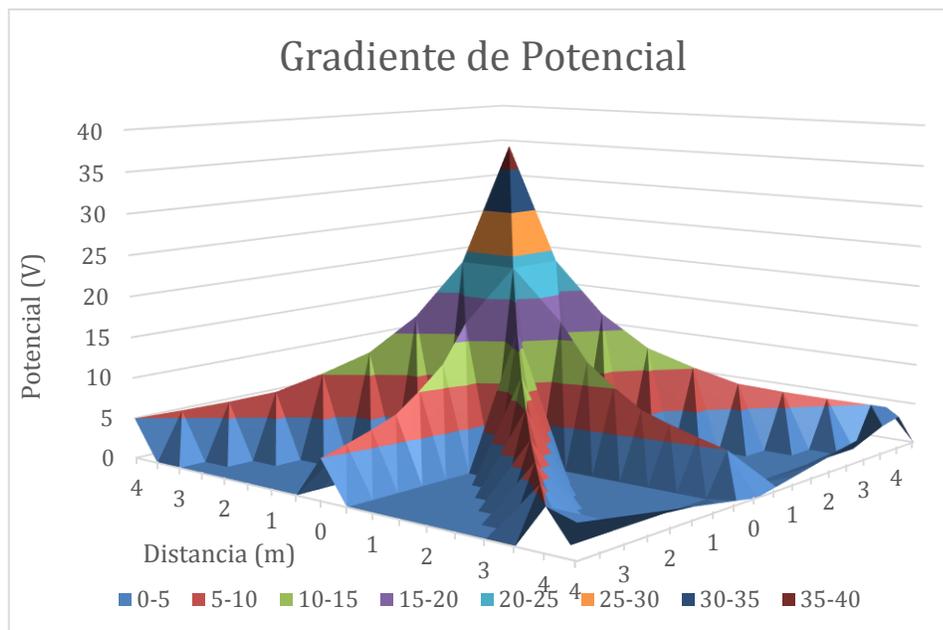


Fig. 33: Mapeo de gradiente de potencial de una varilla

#### 4.8.2 Datos de potencial de toque

Distancia [m]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Potencial [V]	149.53	157.51	161.5	164.16	166.15	166.81	167.48	168.14

Tabla 10: Datos de potencial de toque de varilla

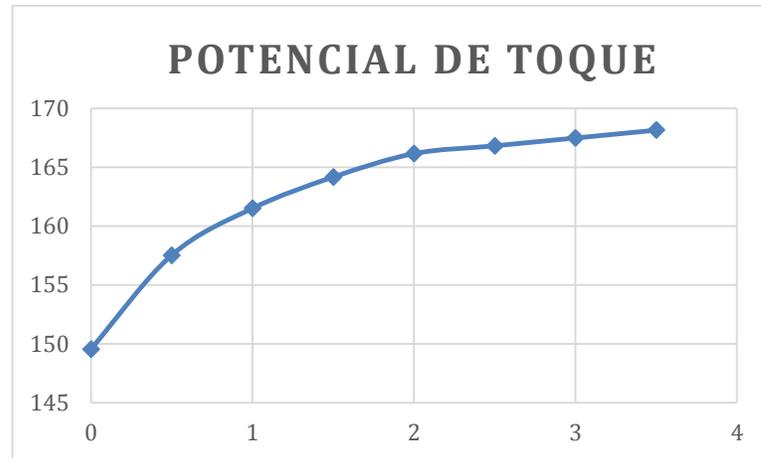


Fig. 34: Grafica de del potencial de toque lineal de una varilla

#### 4.8.3 Datos de potencial de paso

Distancia [m]	0,0.5	0.5,1	1,1.5	1.5,2	2,2.5	2.5,3	3,3.5
Potencial [V]	7.9752	3.9876	2.6584	1.9938	0.6646	0.6646	0.6646

Tabla 11: Datos de potencial de paso de varilla

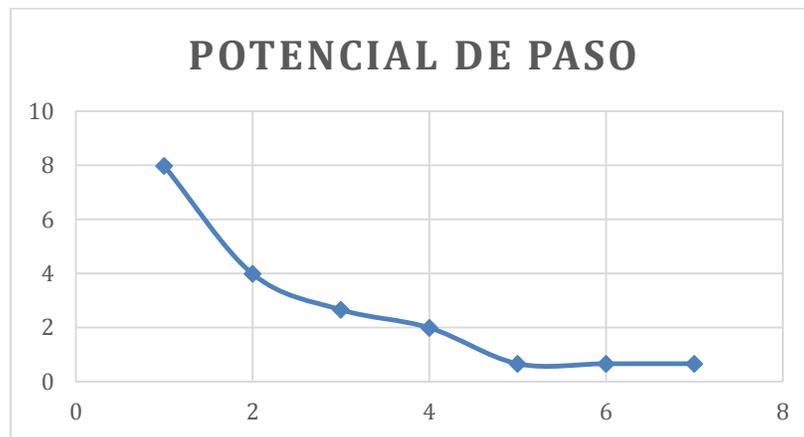


Fig. 35: Grafica del potencial de paso radial de una varilla

#### 4.9 Resultado mediciones malla S1 con varillas

Se presenta una configuración de malla S1 de 3x3m de longitud, con 4 varillas de 3 pies de longitud, ubicadas en las esquinas y a profundidad de 0.5m.



Fig. 36: Malla S1 de 3x3m con varillas

Resultado de las mediciones:

Resistividad [ $\Omega$ .m]	Resistencia PAT [ $\Omega$ ]	GPR [V]	If (A)
83.3	19.9	206	19

Tabla 12: Resultados de medición de malla S1 con varillas

#### 4.9.1 Datos de gradiente de potencial

	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
0	105.77	102.99	101.90	102.25	101.90	102.99	105.77
0.5	102.99	102.63	98.28	96.27	98.28	102.63	102.99
1	101.90	98.28	91.91	89.73	91.91	98.28	101.90
1.5	102.25	96.27	89.73	88.44	89.73	96.27	102.25
2	101.90	98.28	91.91	89.73	91.91	98.28	101.9
2.5	102.99	102.63	98.28	96.27	98.28	102.63	102.99
3	105.77	102.99	101.90	102.2	101.90	102.99	105.77

Tabla 13: Datos de gradiente de potencial de malla S1 con varillas

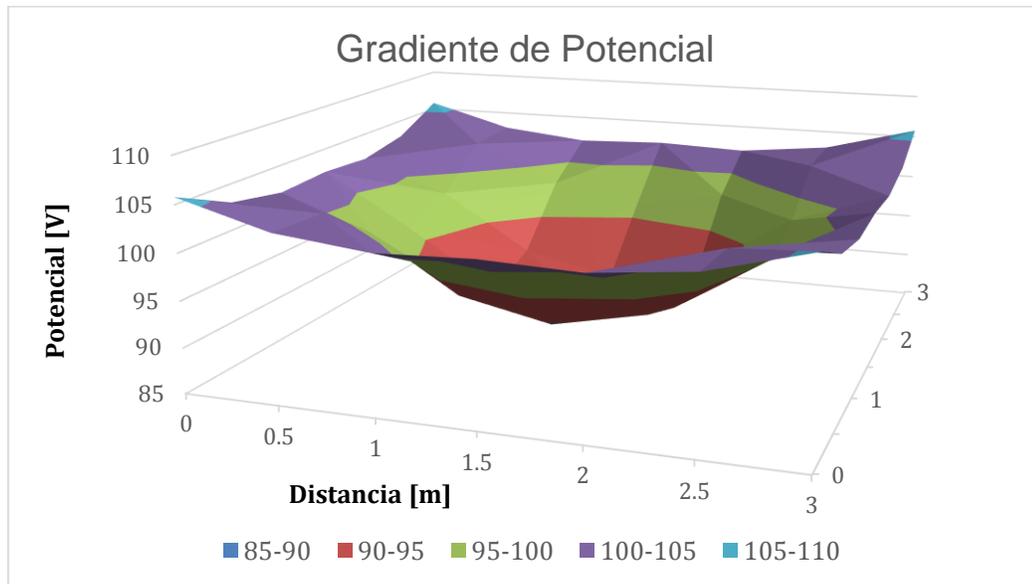


Fig. 37: Mapeo del gradiente de potencial de malla S1 con varillas

#### 4.9.2 Datos de potencial de toque

	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
0	211.22	214.00	215.09	214.74	215.09	214.00	211.22
0.5	214.00	214.36	218.71	220.72	218.71	214.36	214.00
1	215.09	218.71	225.08	227.26	225.084	218.71	215.09
1.5	214.74	220.72	227.26	228.56	227.26	220.72	214.74
2	215.09	218.71	225.08	227.26	225.08	218.71	215.09
2.5	214.00	214.36	218.71	220.72	218.71	214.36	214.00
3	211.22	214.00	215.09	214.74	215.09	214.00	211.22

Tabla 14: Datos el potencial de toque de malla S1 con varillas

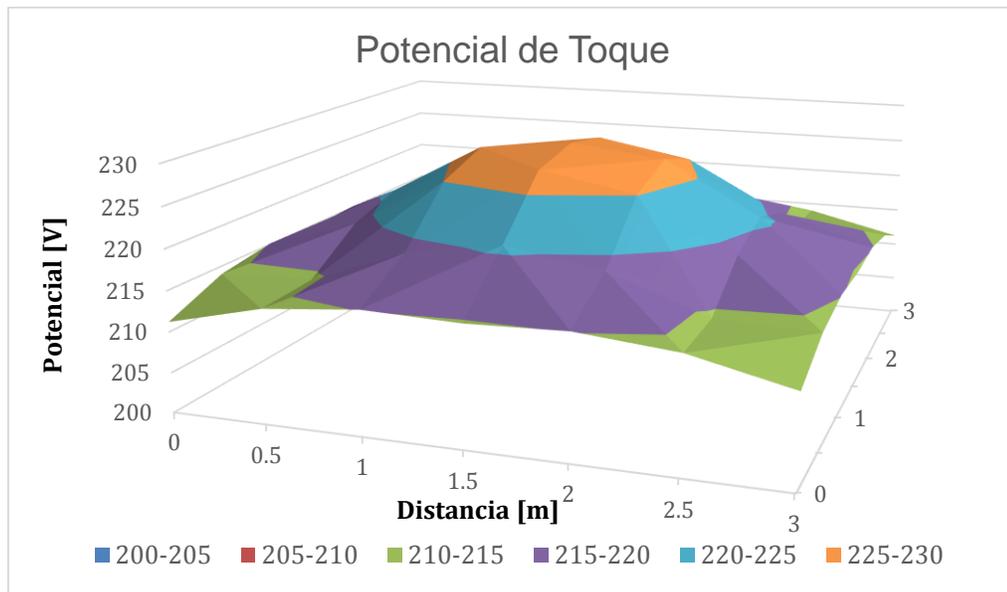


Fig. 38: Mapeo de potencial de toque de malla S1 con varillas

#### 4.9.3 Datos de potencial de paso

	0,1	1,2	2,3
0,1	41	29.8	41
1,2	30	0	30
2,3	41	29.8	41

Tabla 15: Datos de potencial de paso de malla S1 con varillas

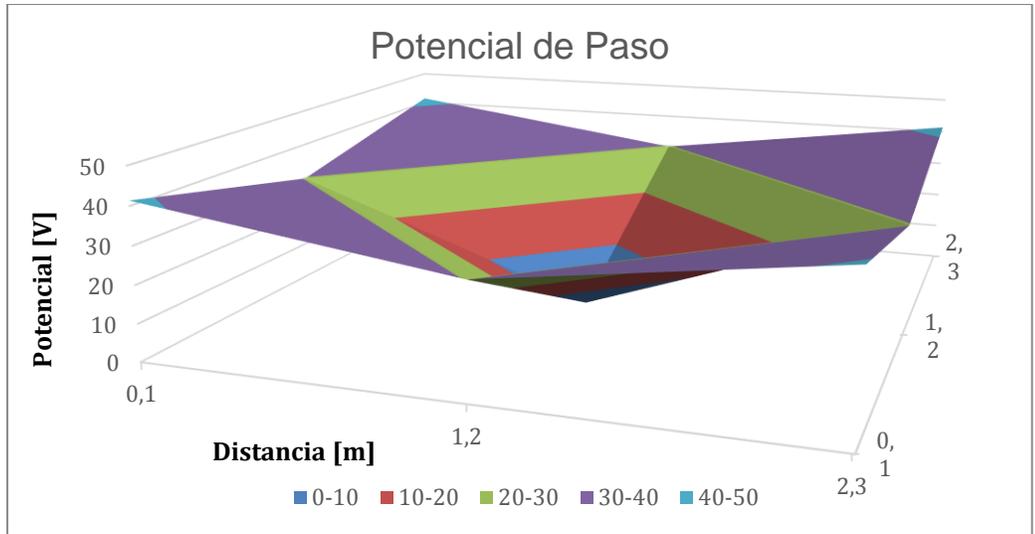


Fig. 39: Mapeo de potencial de paso de malla S1 con varillas

#### 4.10 Resultado de mediciones malla S4

La malla S4 de 5x5m de longitud, sin varillas y a una profundidad de 0.4m.



Fig. 40: Malla S4 de 5x5m

Resultado de las mediciones:

Resistividad [ $\Omega \cdot m$ ]	Resistencia PAT [ $\Omega$ ]	GPR [V]	If (A)
50	16.3	1005	62

Tabla 16: Resultados de medición de malla S4

##### 4.10.1 Datos del gradiente de potencial

	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0	230.1	262.2	264.4	268.8	280.6	287.99	285.8	275.46	260.7	254.8	230.1
0.5	254.81	262.6	255.5	256.3	271	299.43	286.9	265.87	255.9	262.6	262.2
1	260.71	255.9	246	250.4	264.4	292.79	273.2	254.07	246	255.5	264.4
1.5	275.46	265.9	254.1	256.3	272.9	288.73	271.8	256.28	250.4	256.3	268.8
2	285.78	286.9	273.2	271.8	287.3	302.38	287.3	272.88	264.4	271	280.6

<b>2.5</b>	287.99	299.4	292.8	288.7	302.4	331.88	302.4	288.73	292.8	299.4	288
<b>3</b>	280.62	271	264.4	272.9	287.3	302.38	287.3	271.77	273.2	286.9	285.8
<b>3.5</b>	268.82	256.3	250.4	256.3	271.8	288.73	272.9	256.28	254.1	265.9	275.5
<b>4</b>	264.39	255.5	246	254.1	273.2	292.79	264.4	250.38	246	255.9	260.7
<b>4.5</b>	262.18	262.6	255.9	265.9	286.9	299.43	271	256.28	255.5	262.6	254.8
<b>5</b>	230.1	254.8	260.7	275.5	285.8	287.99	280.6	268.82	264.4	262.2	230.1

Tabla 17: Datos de gradiente de potencial medido en malla S4

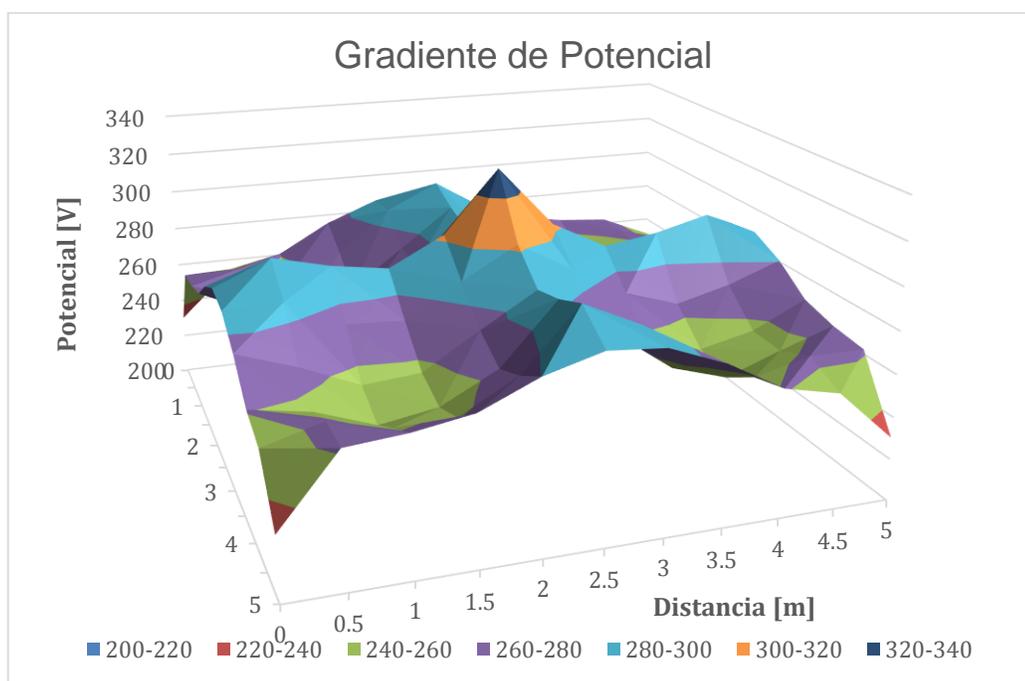


Fig. 41: Mapeo de gradiente de potencial de malla S4

#### 4.10.2 Datos del potencial de toque

	<b>0</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>	<b>2.5</b>	<b>3</b>	<b>3.5</b>	<b>4</b>	<b>4.5</b>	<b>5</b>
<b>0</b>	774.88	742.8	740.6	736.2	724.4	716.98	719.2	729.52	744.3	750.2	774.9
<b>0.5</b>	750.17	742.4	749.4	748.7	733.9	705.55	718.1	739.11	749.1	742.4	742.8
<b>1</b>	744.27	749.1	759	754.6	740.6	712.19	731.7	750.91	759	749.4	740.6
<b>1.5</b>	729.52	739.1	750.9	748.7	732.1	716.25	733.2	748.7	754.6	748.7	736.2
<b>2</b>	719.2	718.1	731.7	733.2	717.7	702.6	717.7	732.1	740.6	733.9	724.4
<b>2.5</b>	716.98	705.6	712.2	716.2	702.6	673.1	702.6	716.25	712.2	705.6	717
<b>3</b>	724.36	733.9	740.6	732.1	717.7	702.6	717.7	733.21	731.7	718.1	719.2
<b>3.5</b>	736.16	748.7	754.6	748.7	733.2	716.25	732.1	748.7	750.9	739.1	729.5
<b>4</b>	740.58	749.4	759	750.9	731.7	712.19	740.6	754.6	759	749.1	744.3
<b>4.5</b>	742.8	742.4	749.1	739.1	718.1	705.55	733.9	748.7	749.4	742.4	750.2
<b>5</b>	774.88	750.2	744.3	729.5	719.2	716.98	724.4	736.16	740.6	742.8	774.9

Tabla 18: Datos de potencial de toque de malla S4

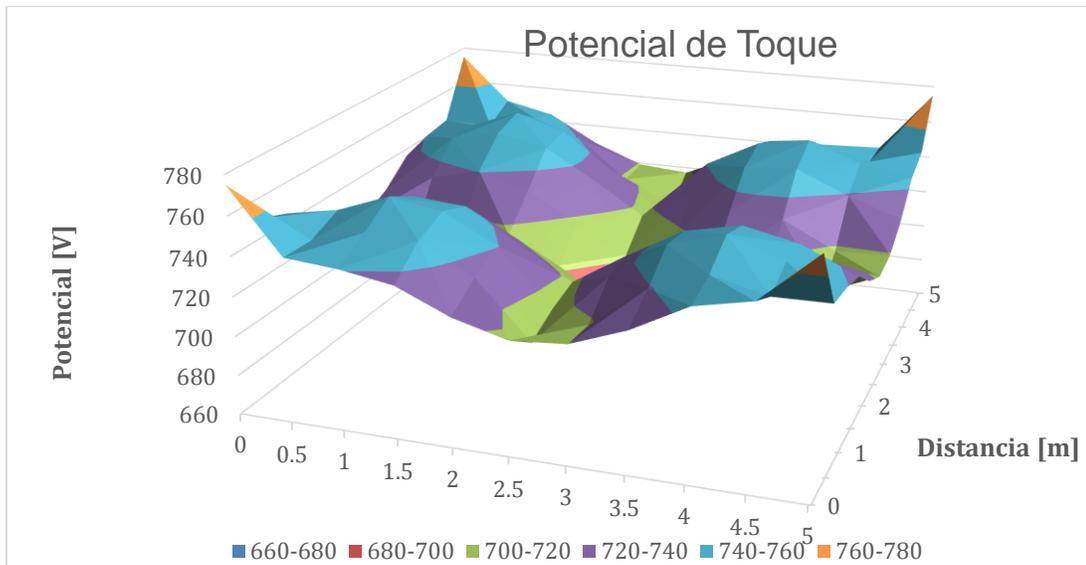


Fig. 42: Mapeo de potencial de toque de malla S4

#### 4.10.3 Datos de potencial de paso

	0,1	1,2	2,3	3,4	4,5
0,1	32.45	17.7	10.08	21.63	32.45
1,2	19.91	22.86	15.86	20.65	17.7
2,3	11.31	15.24	0	12.29	12.538
3,4	16.96	22.86	7.621	18.44	18.192
4,5	32.45	18.93	8.85	16.96	32.45

Tabla 19: Datos de potencial de paso de malla S4

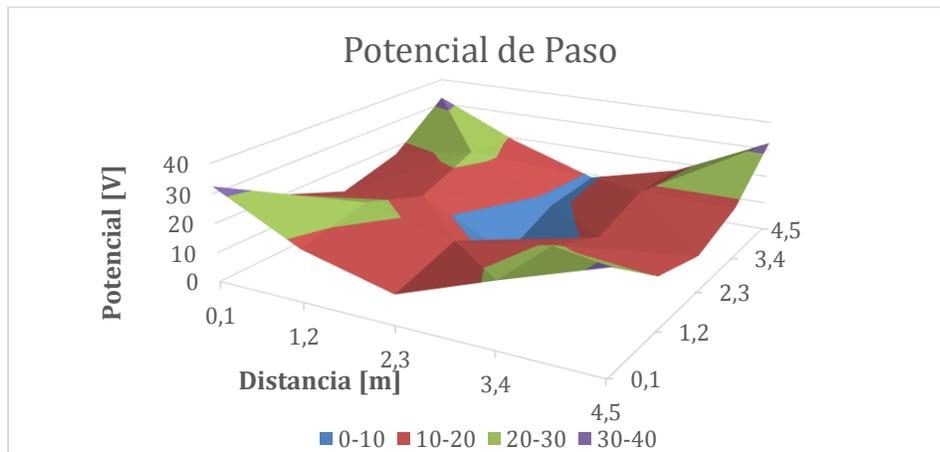


Fig. 43: Mapeo de potencial de paso de malla S4

## **CAPITULO 5: ESTUDIO DE CASOS**

En este capítulo se analiza una serie de casos específicos de redes a tierras haciendo uso de simulaciones en el programa ETAP, en el programa R-PAT y un programa desarrollado en el entorno de MATLAB con una interfaz de usuario realizada con la herramienta GUIDE con el método expuesto en el capítulo 3, además de comparar dichos resultados con las redes realizadas y medidas en el capítulo 4. Los casos a exponer son los siguientes: una varilla de 3 metros enterrada a 0.5 metros de profundidad, una malla S1 de 3 metros de largo con 3 metros de ancho con 4 varillas de 3 pies de longitud colocadas en las esquinas de dicha malla y una malla S4 de 5 metros de largo por 5 metros de ancho colocada a una profundidad de 0.4 m de profundidad y un análisis a una malla S25 de 25 metros de largo por 25 metros de ancho. A continuación, se presenta la metodología de los programas usados en la simulación.

### **5.1 Método de simulación en ETAP**

ETAP ha sido diseñado y desarrollado por ingenieros que manejan la diversa disciplina de sistemas de potencia para un amplio espectro de industrias en un paquete integrado con múltiples vistas de interfaz tales como redes de CA y CC, canales de cable, red de tierra, SIG, paneles, arco flash, WTG, coordinación / selectividad del dispositivo de protección y diagramas del sistema de control de CA y CC.

Enfocándose en las redes de tierras el programa ETAP posee el siguiente módulo Ground Grid Systems utiliza los siguientes cuatro métodos de cálculo:

- FEM - Finite Element Method.
- IEEE 80-1986.
- IEEE 80-2000.
- IEEE 665-1995.

Algunas principales características de este programa se resumen a continuación:

- Calcular los potenciales tolerables  $E_{Step}$  y  $E_{Touch}$ .
- Comparar los potenciales calculados de paso y de toque contra los potenciales reales.
- Optimizar el número de conductores con varillas fijas en función del costo y la seguridad.
- Calcular la corriente máxima permitida para conductores especificados.
- Compara corrientes permitidas contra corrientes de falla.
- Calcular la resistencia del sistema de tierra.
- Calcular aumento de potencial de tierra.
- Permitir una configuración de suelo de dos capas además del material de superficie.
- Visualizar graficas de voltaje de toque en 3D.
- Visualizar graficas de voltaje de paso en 3D.
- Visualizar graficas de tensión absoluta en 3D.
- Calcular los potenciales absolutos, potenciales de paso y potenciales de toque en cualquier punto de la configuración.

- El conductor se puede orientar en cualquier dirección 3D posible.
- Manejar configuraciones irregulares de cualquier forma.

Para el caso del presente trabajo, solo se utiliza el módulo FEM método de elemento finito que está basado en el método de las imágenes y asume que sistema de tierras es una estructura equipotencial.

A continuación, se explica el procedimiento para diseñar y simular una malla de red de puesta a tierra.

En la ventana de one-line diagrams en la configuración de editar se debe colocar un ground grid como se muestra en la siguiente Fig. 44:

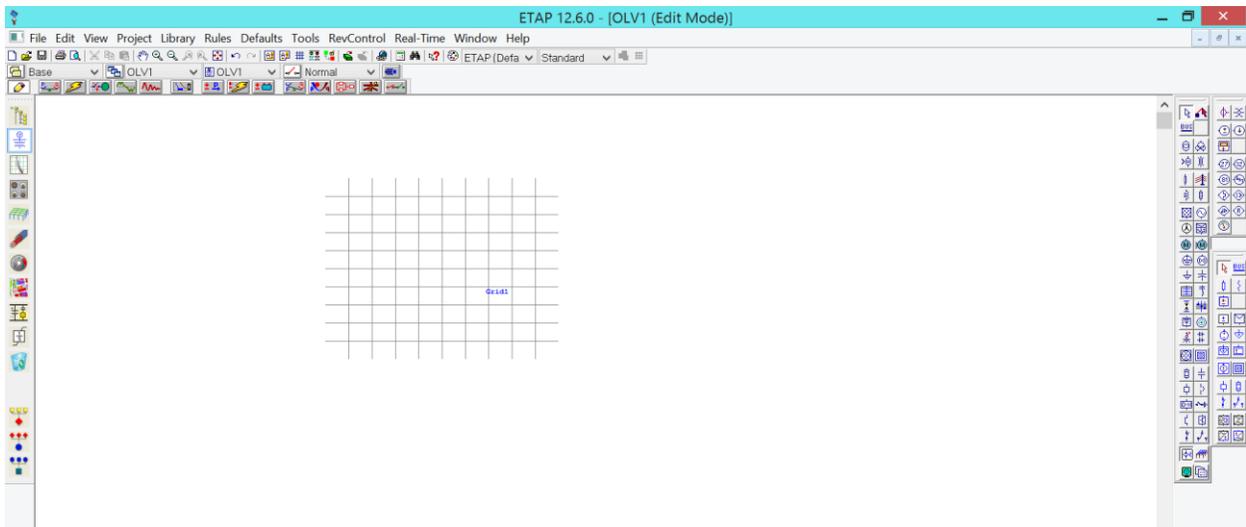


Fig. 44: Ventana one-line con un Ground Grid

Ahora se le da doble clic al ground grid, se despliega una ventana con las opciones para elegir un módulo de cálculo, para los estudios de este capítulo se escoge la primera opción FEM – Finite Element Module.

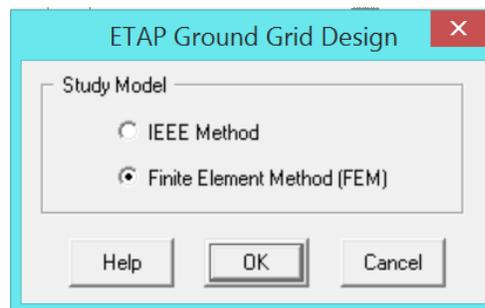


Fig. 45: Ventana de selección del modelo

En la ventana dentro del modelo se puede observar en la Fig. 46 esta posee dos modos para operar el actual que se presenta es el modo de edición, donde se diseñan las mallas, en esta ventana se puede observar dos recuadros uno da la visualización de la

maña en un modelo 3D y en la ventana derecha podemos observar las características del suelo en las que se encuentra las mallas más adelante se va explicar cómo con Fig. r los datos de resistividad del suelo, la barra de herramientas consta de las opciones de dibujo de barras horizontales, varillas, cuadrículas cuadradas y rectangulares, cuadrículas con formas comunes como son forma en L, en forma de T y triangulares.

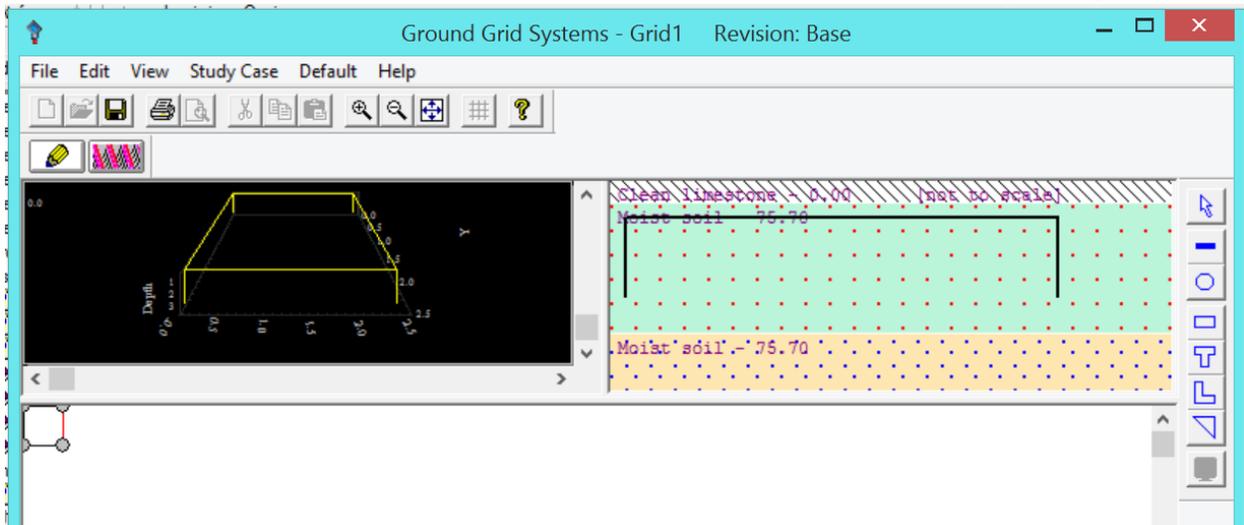


Fig. 46: Ventana de trabajo del Ground Grid Systems

Ahora para diseñar se presentan las siguientes dos formas dentro de este modo de edición para hacer realizar mallas cuadradas o rectangulares, la primera es colocando varillas en forma horizontal y ordenarlas de la forma que se desea diseñar la maña, dando clic a una de las varillas horizontales se desplegará una ventana para editar los conductores se puede modificar la longitud del conductor, los puntos (x y z) de los del punto inicial y final del segmento tipo de conductor el diámetro y el costo.

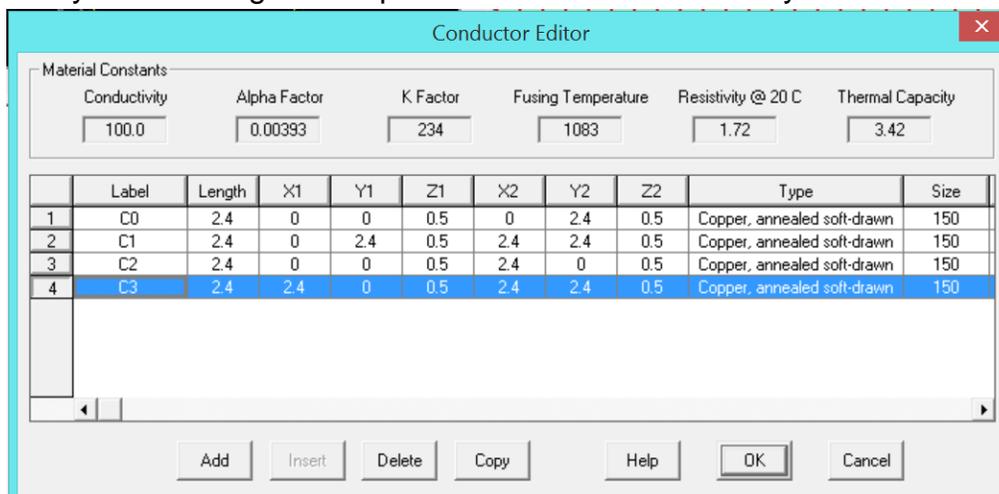


Fig. 47: Ventana editor de conductores

La segunda forma para diseñar una red de puesta a tierra es con unas formas predeterminadas que posee el programa específicamente la cuadrícula esta se coloca en la parte de trabajo y se le da doble clic con lo que desplegará la ventana presentada

en la Fig. 48, en la cual se puede modificar el largo y ancho, el número de conductores en paralelo tanto en el eje x como en el eje y además de opciones como el diámetro del conductor, el tipo y el costo [17].

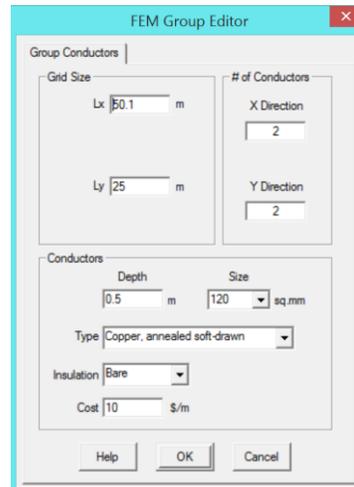


Fig. 48: Ventana FEM Group Editor

Ahora para modificar la resistividad del suelo se le debe dar doble clic a la ventana derecha en la Fig. 46 y se desplegará la siguiente ventana en la cual se permite modificar la capa superficial, la resistividad del primer tipo de suelo y de un segundo tipo de suelo además de cambiar el punto donde se encuentra el corte de ambos terrenos, se pueden elegir entre varios tipos de terrenos predefinidos o simplemente cambiar los valores de terreno. En el presente trabajo solo se trata suelo homogéneo por lo tanto ambas capas tendrán el mismo valor de resistividad y sin capa superficial.

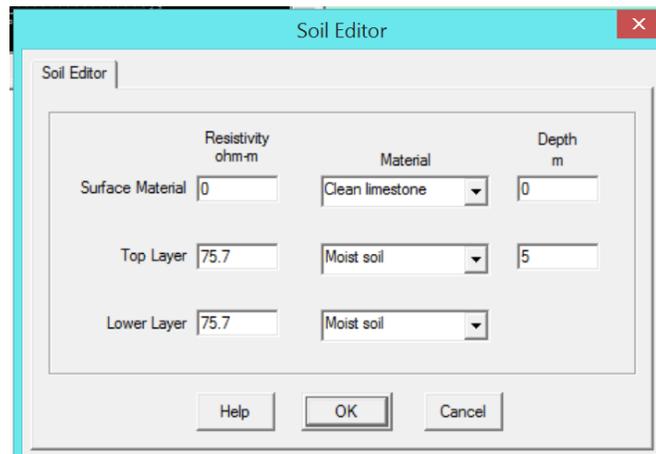


Fig. 49: Ventana de Soil Editor

Ahora en el modo Ground-Grid Study como se muestra en la Fig. 50 posee las opciones de calcular, una ventana para notificar alertas o posibles errores de simulación, una opción para generar las gráficas de gradiente de potencial (llamado en el programa como potencial absoluto), potencial de toque y potencial de paso. Además de la opción de generar un reporte de resultados.

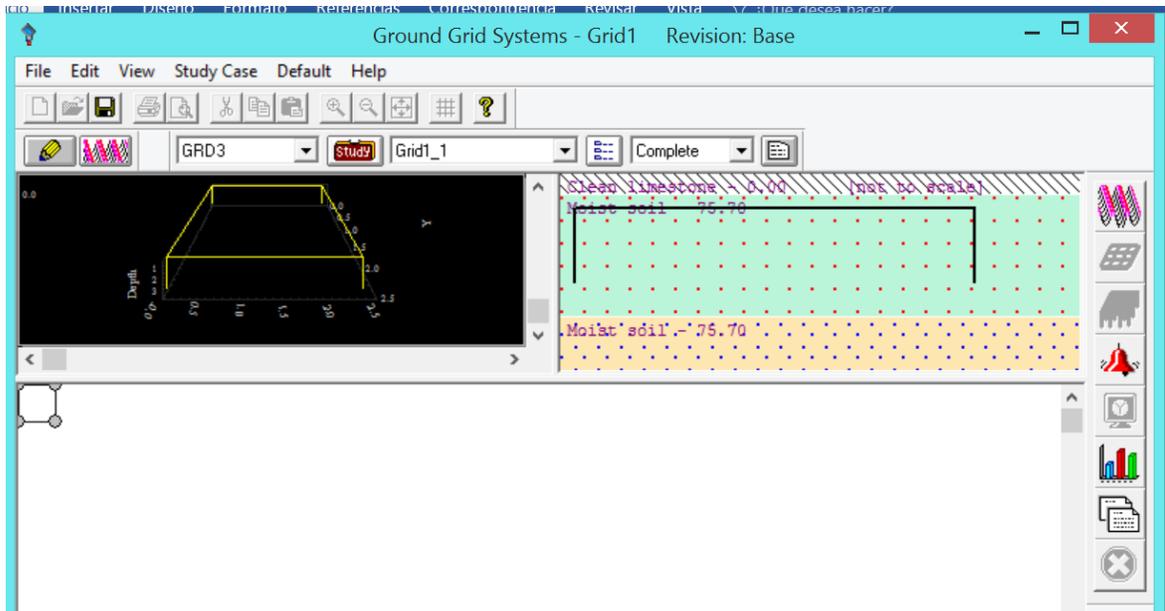


Fig. 50: Modo Ground-Grid Study

En la parte superior el botón de study se conFig. todos los parámetros que son necesarios dentro del estudio de la red de puesta a tierra, donde se puede modificar si se realizar un reporte de resultados, cuanto es el intervalo para tomar puntos, cuantos metros fuera de la red de puesta a tierra se desean realizar, tiempos de duración de la falla (que para los estudios de casos realizados se dejaran los valores predeterminados), el método de simulación, opciones para el criterio de seguridad de voltaje de toque y de pasos máximos tolerables, corriente de cortocircuito y los factores a tomar en cuenta dentro de la corriente.

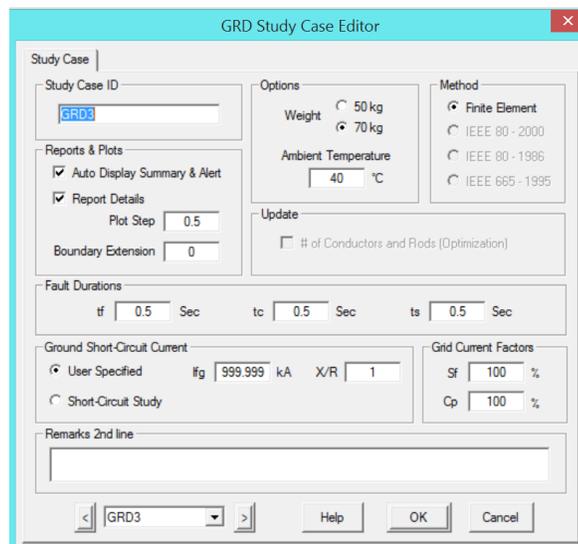


Fig. 51: Ventana GRD Study Case Editor

Una vez hecha la simulación se puede entrar a las opciones de simulación como se presenta en la siguiente Fig. 52 en la cual se pueden seleccionar las gráficas para el potencial absoluto (gradiente de potencial), potencial de toque y el potencial de paso.

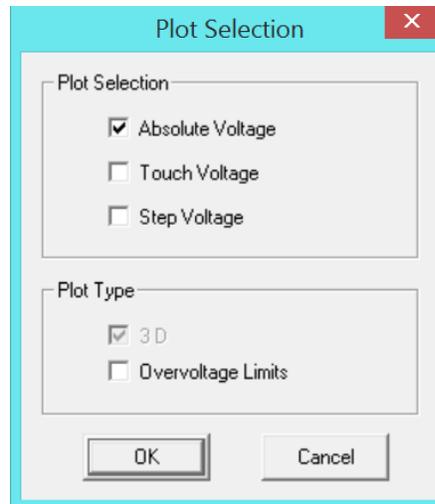


Fig. 52: Ventana Plot Selection

## 5.2 Método de simulación en MATLAB

Matlab es un entorno desarrollado donde se puede trabajar código de programación de una manera sencilla y fácil, posee herramientas que son muy útiles en la ingeniería, entre ellas está el diseño y construcción de procesos matemáticos que se pueden representar mediante vectores, matrices e interfaces creadas por el usuario, además, procesos de propósito general. En él se puede encontrar documentación sobre sus elementos de programación el cual facilita el uso y entendimiento.

Algunos usos y aplicaciones son:

- Matemáticas y cálculo.
- Desarrollo de algoritmos.
- Adquisición de datos.
- Modelado, simulación y prototipado.
- Análisis y procesado de datos.
- Gráficos científicos y de ingeniería.
- Desarrollo de aplicaciones.

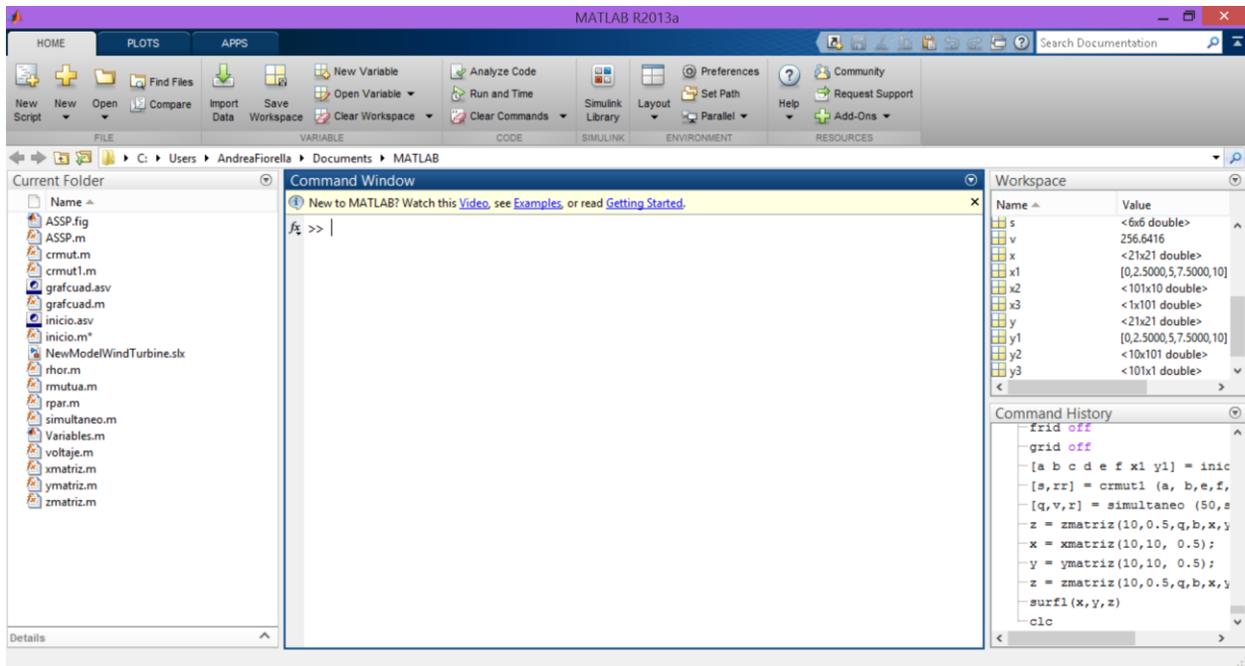


Fig. 53: Interfaz de MATLAB

El programa se puede dividir en 4 bloques:

1. **Entorno de desarrollo:** Es el escritorio de trabajo del software, en él se encuentra un conjunto de herramientas que facilitan el uso de funciones en Matlab, así como ficheros. Muchas de estas utilidades son interfaces graficas de usuario. Incluye el espacio de trabajo Matlab y la ventana de comandos.
2. **La librería de funciones matemáticas MATLAB:** Se trata de un amplio conjunto de algoritmos de cálculo, comprendiendo las funciones más elementales como la suma, senos y cosenos o la aritmética de números complejos, hasta funciones más sofisticadas como la inversión de matrices, funciones de Bessel y transformadas rápidas de Fourier.
3. **Gráficos:** MATLAB dispone de un conjunto de utilidades destinadas a visualizar vectores y matrices en forma de gráficos. Existe una gran cantidad de posibilidades para ajustar el aspecto de los gráficos, destacando la visualización 3-D con opciones de iluminación y sombreado, y la posibilidad de crear animaciones.
4. **El Interfaz de Aplicación de MATLAB (API):** Consiste en una librería que permite escribir programas ejecutables independientes en C y otros lenguajes, accediendo, mediante DLLs, a las utilidades de cálculo matricial de MATLAB.

### 5.2.1 Introducción a GUIDE

Las GUI (también conocidas como interfaces gráficas de usuario o interfaces de usuario) permiten un control sencillo (con uso de ratón) de las aplicaciones de software, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos a fin de ejecutar una aplicación.

Las Apps de MATLAB son programas autónomos de MATLAB con un frontal gráfico de usuario GUI que automatizan una tarea o un cálculo. Por lo general, la GUI incluye controles tales como menús, barras de herramientas, botones y controles deslizantes. Muchos productos de MATLAB, como Curve Fitting Toolbox, Signal Processing Toolbox y Control System Toolbox, incluyen Apps con interfaces de usuario personalizadas. También es posible crear Apps personalizadas propias, incluidas las interfaces de usuario correspondientes, para que otras personas las utilicen.

GUIDE (entorno de desarrollo de GUI) proporciona herramientas para diseñar interfaces de usuario para Apps personalizadas. Mediante el editor de diseño de GUIDE, es posible diseñar gráficamente la interfaz de usuario. GUIDE genera entonces de manera automática el código de MATLAB para construir la interfaz, el cual se puede modificar para programar el comportamiento de la App.

A fin de ejercer un mayor control sobre el diseño y el desarrollo, también se puede crear código de MATLAB que defina las propiedades y los comportamientos de todos los componentes. MATLAB contiene funcionalidad integrada que le ayudará a crear la GUI para su App de forma programática. Cabe la posibilidad de agregar cuadros de diálogo, controles de interfaz de usuario (como botones y controles deslizantes) y contenedores (como paneles y grupos de botones).

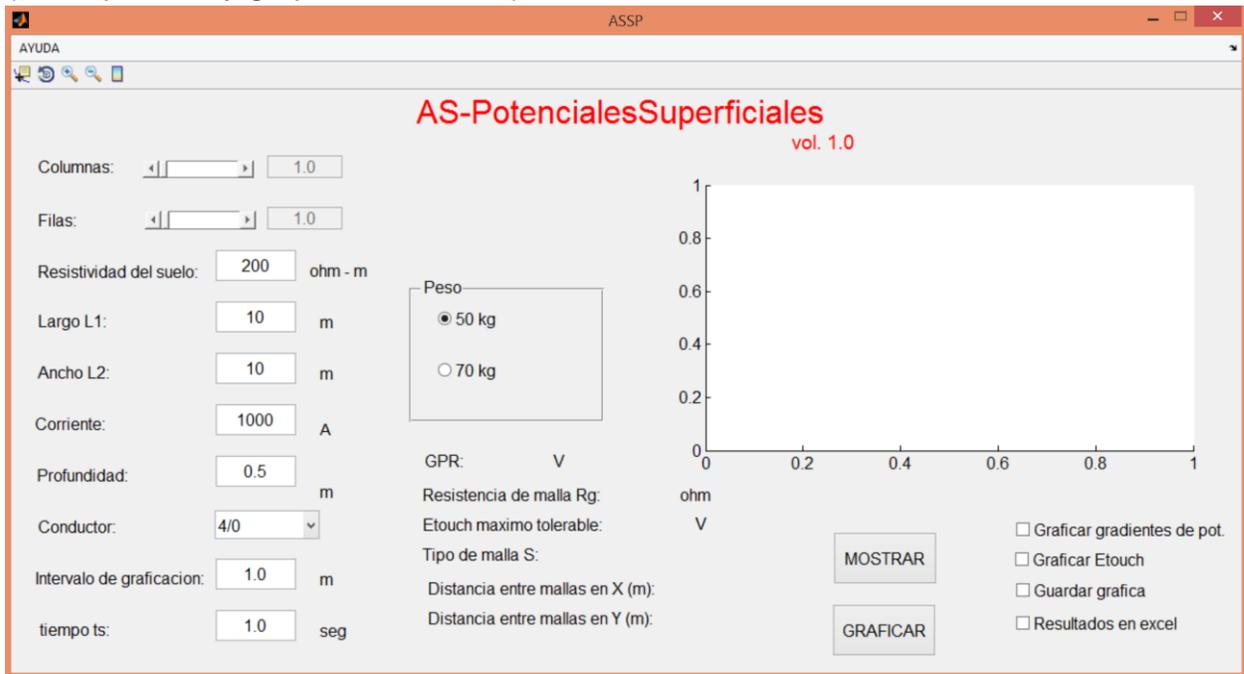


Fig. 54: Interfaz de la aplicación GUIDE en MATLAB

En la Fig. 54 se muestra la interfaz desarrollada en el entorno de MATLAB con el programa GUIDE en esta se encuentran las funciones para realizar el cálculo de potenciales superficiales de cualquier red de puesta a tierra que se ingrese, para mayor información del uso del programa véase ANEXOS con una guía de usuario y las funciones implementadas dentro del programa.

### 5.3 Método de simulación en R-PAT

R-PAT ha sido diseñado como un trabajo de graduación de la Universidad de El Salvador, por alumnos de la carrera de Ingeniería Eléctrica [24]. Con el fin de tener una herramienta desarrollada en el entorno de JAVA, tomando como base de diseño la norma IEEE Std 80-2000 y el acuerdo SIGET 29 E-2000 para el cálculo de parámetros básicos de configuraciones de redes de tierra como lo son:

- Voltaje de Malla ( $E_m$ ).
- Voltaje de Paso ( $E_s$ ).
- Resistencia de Puesta a Tierra.
- Voltaje Tolerable de toque ( $E_{touch}$ ).
- Voltaje Tolerable de paso ( $E_{step}$ ).
- GPR.

Así como comparar los resultados con los estándares mínimos de seguridad para obtener una malla segura y confiable para el personal de trabajo y del equipo instalado. A continuación, se presentan los parámetros de diseño a modificar por el usuario, para una malla S4 de 5x5m.

En la Fig. 55 se muestra los datos de la resistividad del terreno en donde se puede realizar el cálculo para suelo homogéneo o de dos capas.

Fig. 55: Modificación de resistividad del terreno

Se modifican los valores de datos de falla en la siguiente Fig. 56:

Fig. 56: Modificación de Datos de falla

También está la opción de combinar mallas con electrodos, para ello se debe modificar el número de electrodos presentes como se muestra en la Fig. 57:

Fig. 57: Modificación de datos de electrodos

Para modificar los datos de cuadrícula como la profundidad de enterramiento, el número de filas y columnas y el tipo de material conductor, precedemos a la Fig. 58:

Fig. 58: Datos de cuadrícula a modificar

La geometría de del terreno como el área de aplicación de la malla, y la forma geométrica se presenta en la Fig. 59:

Fig. 59: Geometría del terreno a modificar

El programa tiene la opción de agregar una capara superficial de material aislante para aumentar la resistividad de contacto y disminuir los potenciales de toque y paso.

Fig. 60: Capa de material superficial

Adicional se puede modificar el factor de decremento  $D_f$ , y el factor que representa la relación de falla simétrica a la porción de la corriente que fluye entre la red de tierra y el suelo circulante  $S_f$  como se muestra en la Fig. 61.

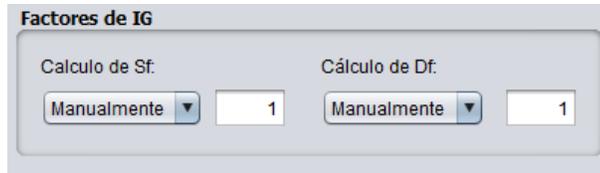


Fig. 61: Factores de IG

## 5.4 Configuración electrodo (Varilla)

Retomando la instalación de varilla explicada en la sección 4.8, para el estudio de casos reales, en donde se analiza tanto físicamente (datos medidos) como datos obtenidos mediante la simulación de sus parámetros de diseño en el programa comercial ETAP y el programa realizado en el entorno de MATLAB utilizando el método de elementos finitos.

### 5.4.1 Cálculo de potenciales mediante ETAP

Utilizando los parámetros de diseño planteados en la sección 4.8 para la instalación de una varilla de 3 pies de longitud, como se muestra en la Fig. 62.

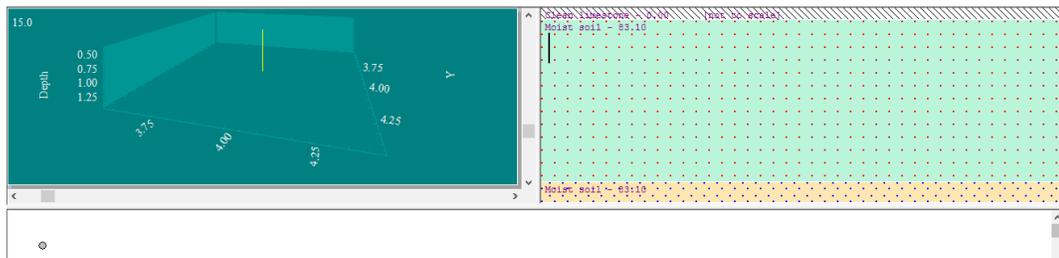


Fig. 62: Diseño de electrodo (varilla) en el entorno de ETAP, y tipo de suelo homogéneo de  $83.1 \Omega\text{-m}$

Estableciendo una corriente de falla ( $I_g$ ) de 2.1 A como se muestra en la Fig. 63.

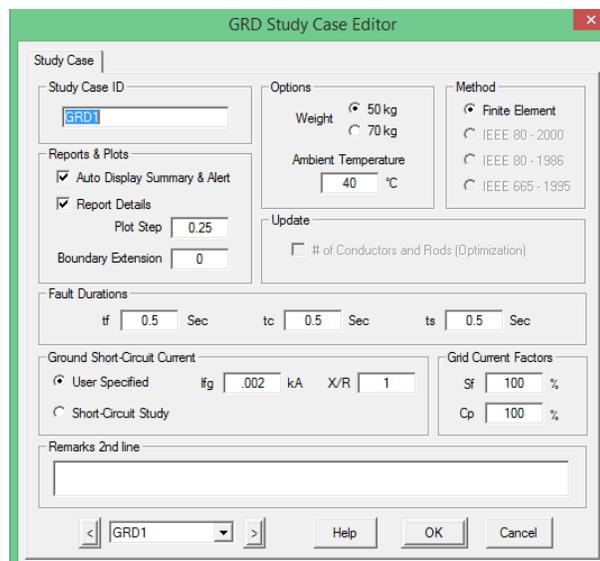


Fig. 63: Parámetros de corriente para simulación en ETAP

Ahora se obtienen los datos básicos proporcionado por ETAP como se muestra en la Fig. 64.

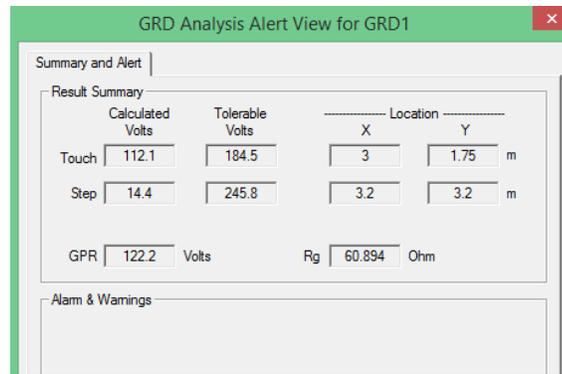


Fig. 64: Respuesta de simulación en ETAP para una varilla

Utilizando la herramienta de mapeo de potenciales superficiales de ETAP para la configuración de varilla, se obtuvo los siguientes resultados del gradiente de potencial Fig. 65, potencial de toque Fig. 66 y potencial de paso Fig. 67:

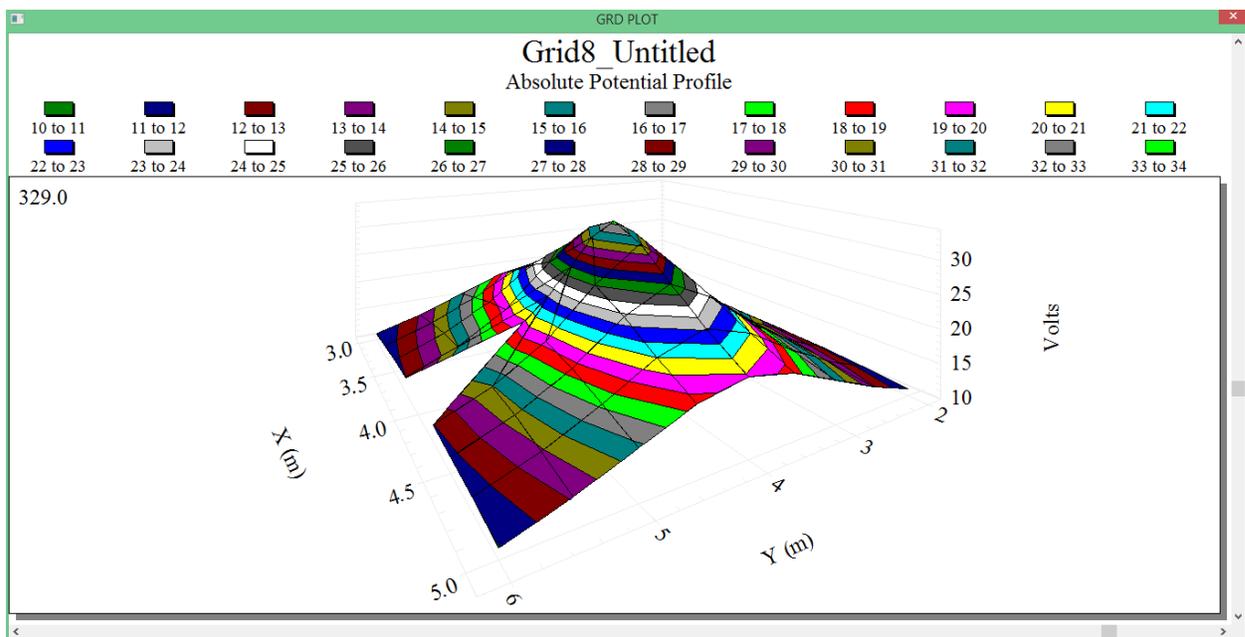


Fig. 65: Simulación en ETAP del gradiente de potencial de una varilla

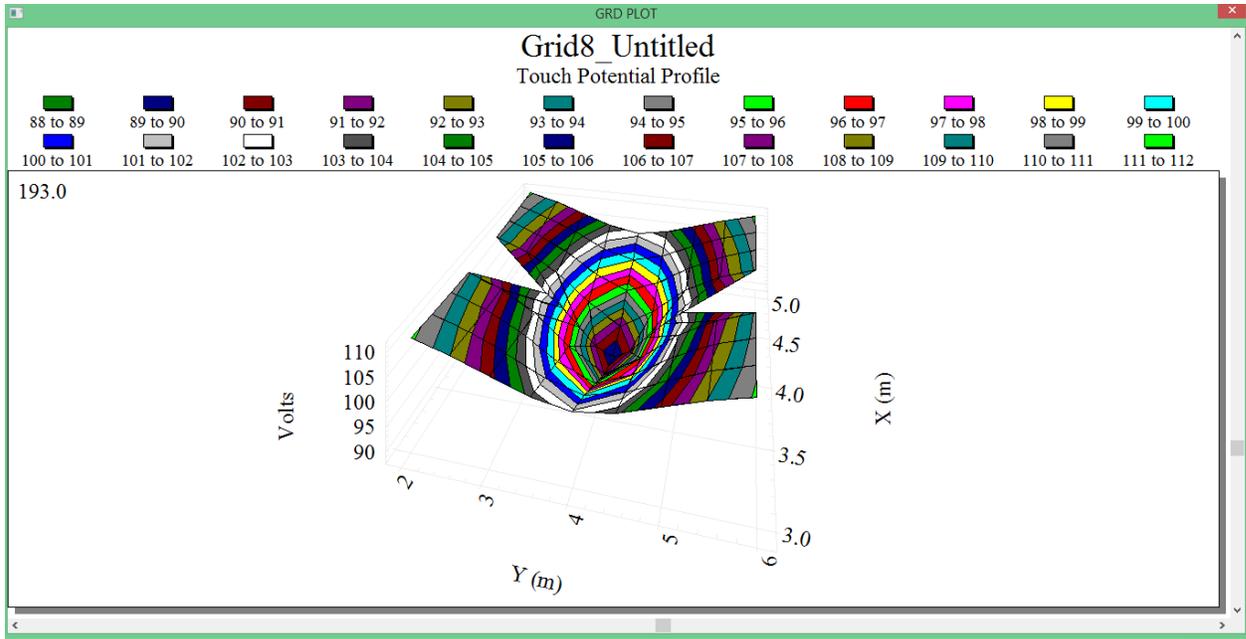


Fig. 66: Simulación en ETAP de potencial de toque en una varilla

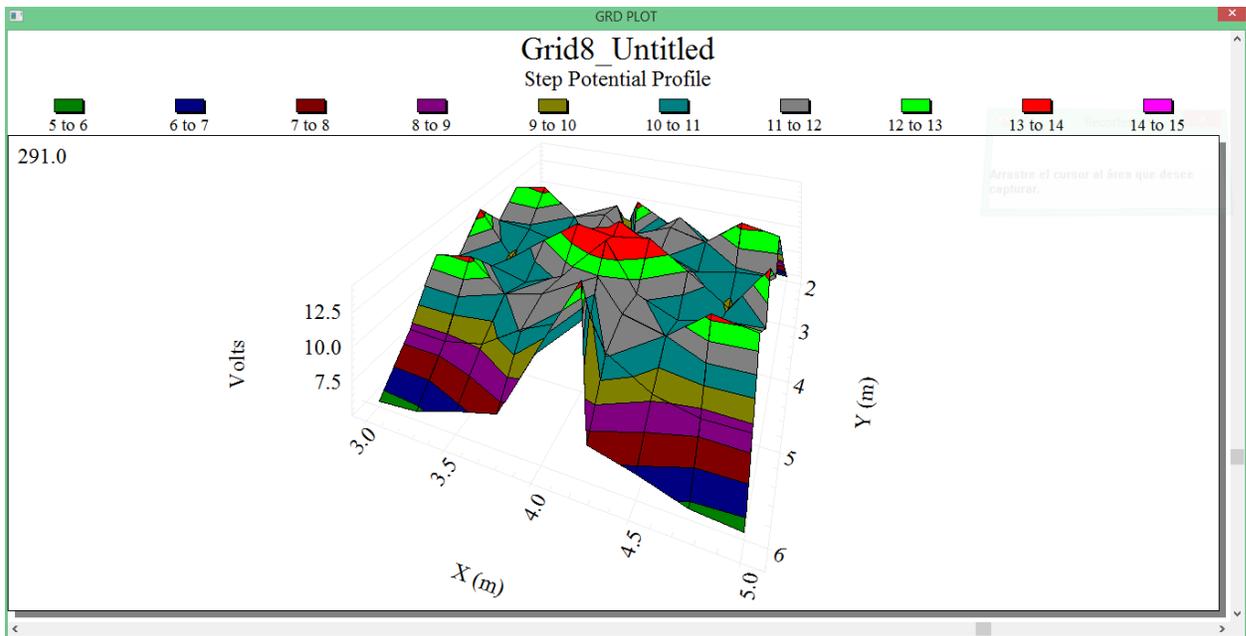


Fig. 67: Simulación en ETAP de potencial de paso en una varilla

#### 5.4.2 Cálculo de potenciales mediante MATLAB

Utilizando los parámetros de diseño planteados en la sección 4.8 para la instalación de una varilla de 3 pies, utilizando la herramienta computacional basada en el método de elementos finitos, como se muestra en la Fig. 68.

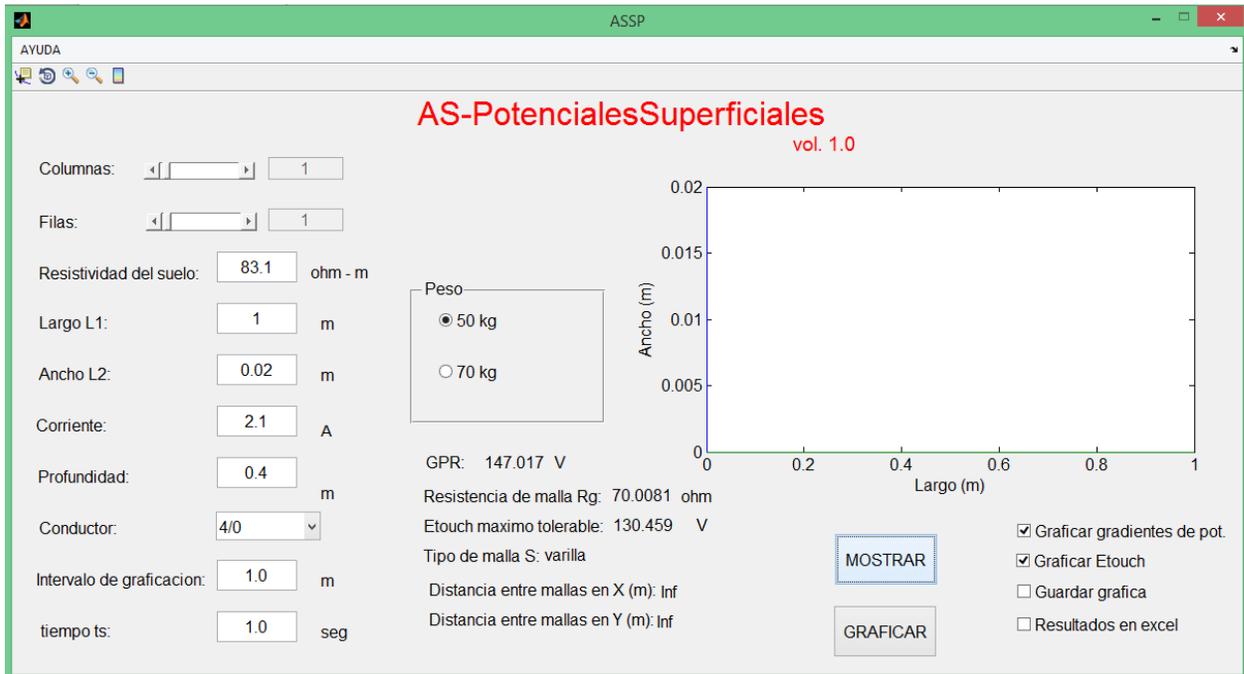


Fig. 68: Resultados obtenidos mediante Matlab utilizando modelo de elementos finitos para una varilla de 3 pies

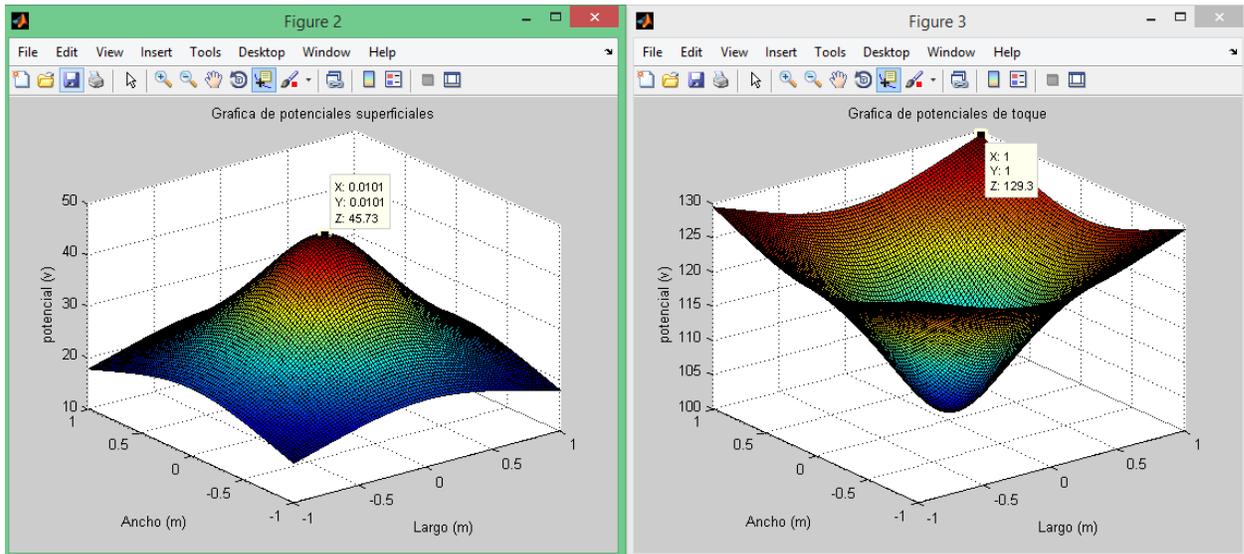


Fig. 69: Mapeo de potenciales en MATLAB (2) Gradiente de potencial, (3) Potencial de toque

### 5.4.3 Análisis de resultados

A continuación, se presenta un cuadro comparativo de resultados, en donde se observa los parámetros más importantes de la configuración de varilla (electrodo simple). Cada parámetro ha sido medido primeramente en la sección 4.8, previamente simulado con el programa comercial ETAP y por último con la herramienta computacional desarrollada en Matlab utilizando el Método de Elementos Finitos (AS-PotencialesSuperficiales).

Para una corriente de falla ( $I_g$ ) de 2.1 A:

Parámetros	Medición	ETAP	AS-Potenciales Superficiales
Rg	83.3 $\Omega$	60.894 $\Omega$	70.0081 $\Omega$
GPR	180.2 V	122.2 V	147.017 V
Gradiente de potencial máximo	37.81 V	33.57 V	45.73 V
Potencial de toque Tolerable (50kg)	-	184.5 V	130.45 V
Potencial de toque máximo	168.14 V	112.1 V	129.3 V
Potencial de paso máximo	7.97 V	14.4 V	-

Tabla 20: Comparación de resultados obtenidos entre medición y simulaciones para una varilla de 3 pies

- El valor de Rg no cumple con el acuerdo 29 E-2000 de la SIGET, el cual debe ser como máximo 25 $\Omega$ .
- El valor de GPR es menor a 5000V por lo tanto es segura.
- Para el valor de 2.1 A de corriente de falla, tanto en ETAP como AS-PotencialesSuperficiales el potencial máximo de toque está por debajo del máximo tolerables establecido por la IEEE Std 80-2013.

#### 5.4 Configuración malla S1 con y sin varillas

Retomando la malla S1 real con varillas, explicada en la sección 4.9, para el estudio de casos reales, en donde se analiza tanto físicamente (datos medidos) como datos obtenidos mediante la simulación de sus parámetros de diseño en el programa comercial ETAP, simulando en el programa R-PAT y el programa realizado en el entorno de MATLAB utilizando el método de elementos finitos.

##### 5.4.1 Cálculo de potenciales mediante ETAP

Utilizando los parámetros de diseño planteados en la sección 4.9 para la instalación de una malla S1 con 4 varillas en las esquinas, como se muestra en la Fig. 70.

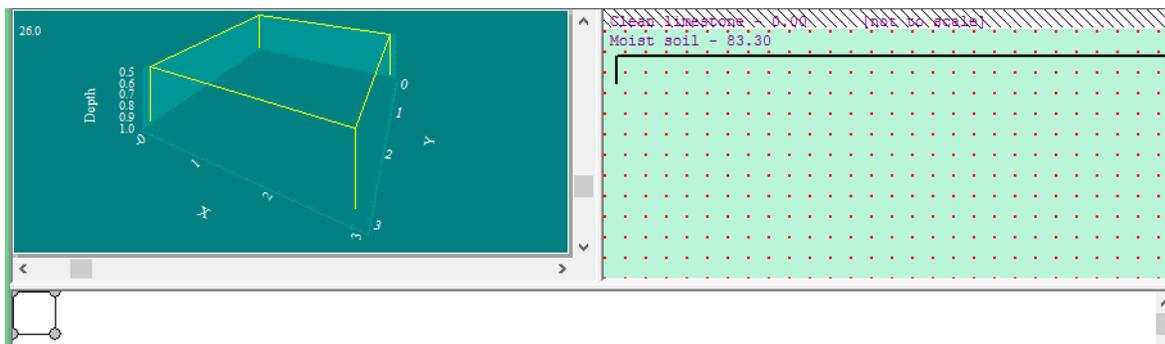


Fig. 70: Diseño de la malla S1 con varillas en el entorno de ETAP, y tipo de suelo homogéneo de 83.3  $\Omega$ -m

Estableciendo una corriente de falla ( $I_f$ ) de 19 A como se muestra en la Fig. 71.

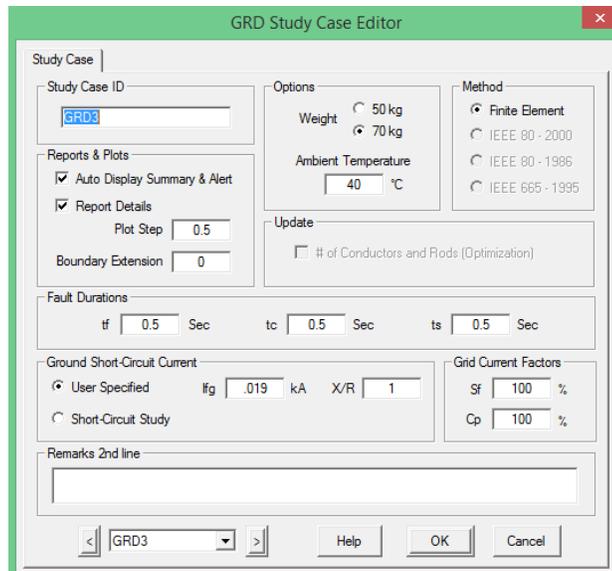


Fig. 71: Parámetros de corriente para simulación en ETAP

Ahora se obtienen los datos básicos proporcionado por ETAP como se muestra en la Fig. 72:

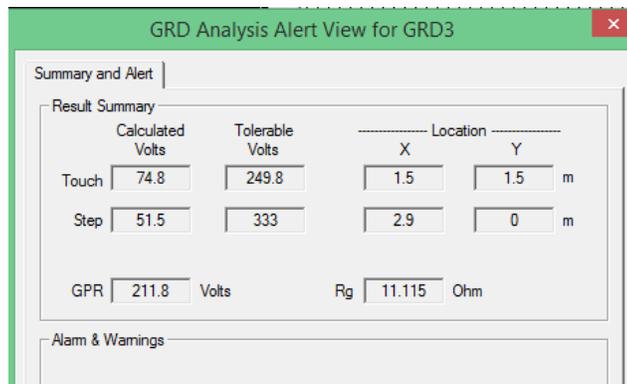


Fig. 72: Respuesta de simulación en ETAP para una malla S1 con varillas

Utilizando la herramienta de ploteo de potenciales superficiales de ETAP para una malla S1 con varillas, se obtuvo los siguientes resultados del gradiente de potencial Fig. 73, potencial de toque Fig. 74 y potencial de paso Fig. 75:

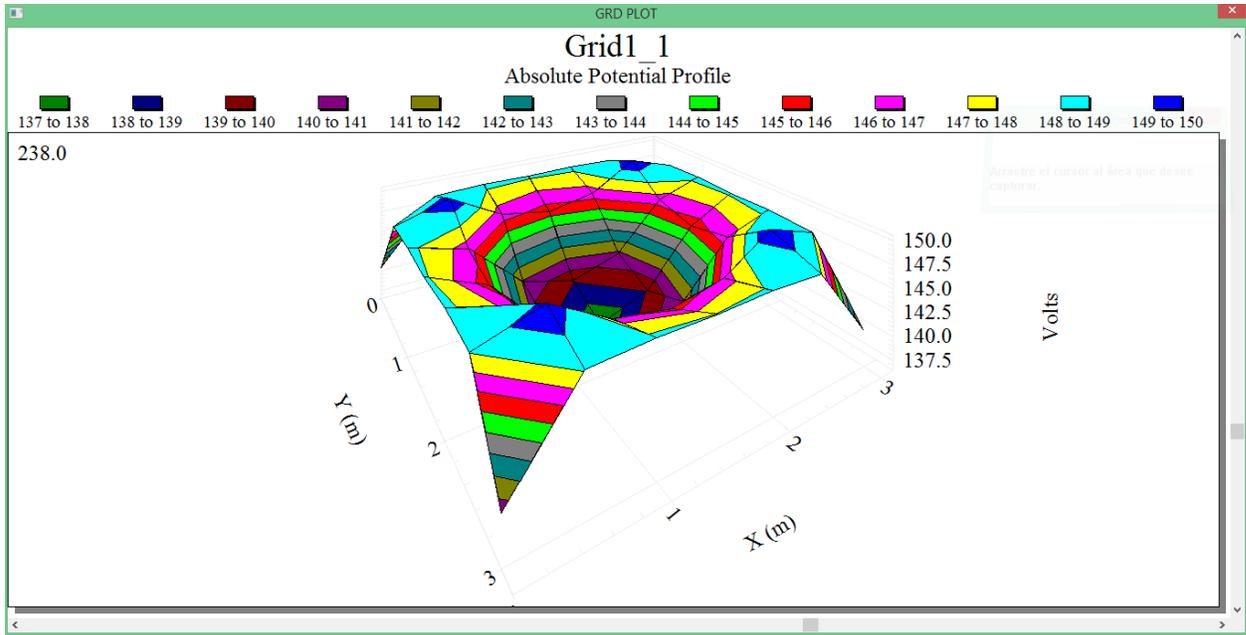


Fig. 73: Simulación en ETAP del gradiente de potencial de una malla S1 con varillas

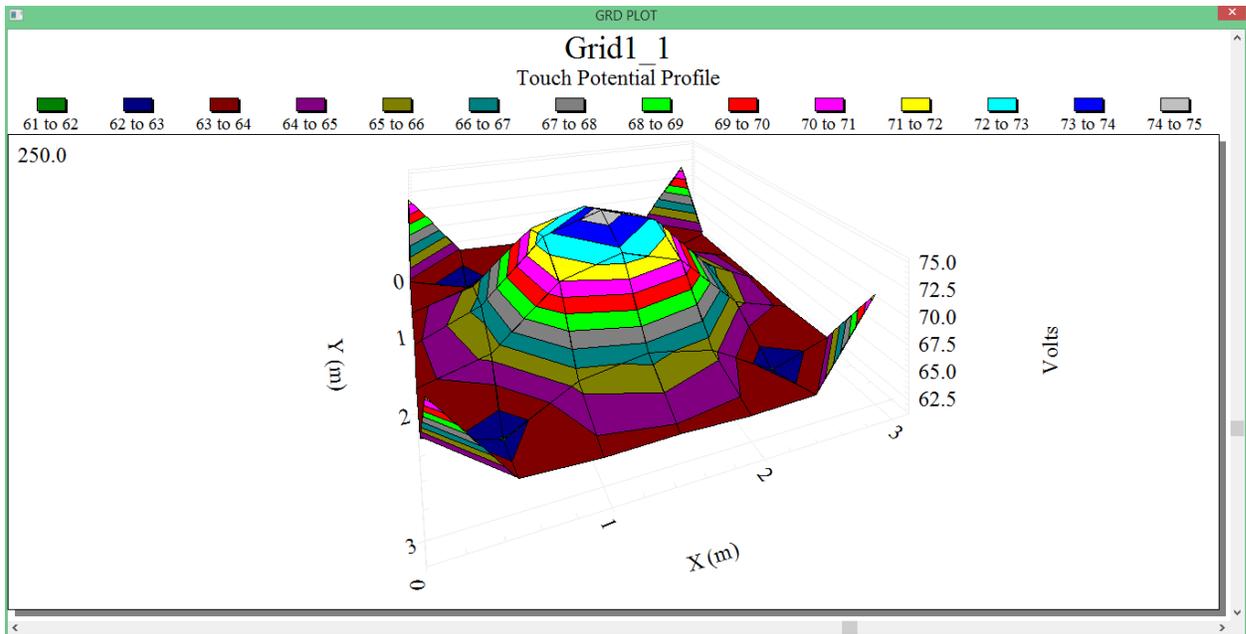


Fig. 74: Simulación en ETAP de potencial de toque para una malla S1 con varillas

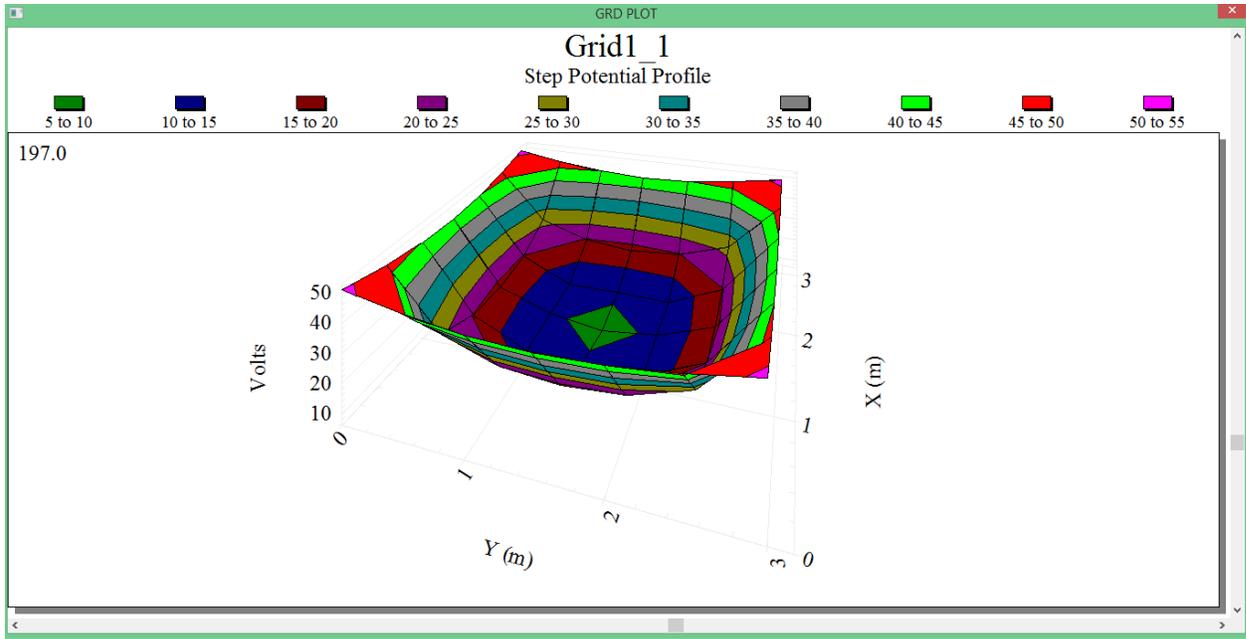


Fig. 75: Simulación en ETAP de potencial de toque para una malla S1 con varillas

### 5.4.2 Cálculo de potenciales mediante MATLAB

Utilizando los parámetros de diseño planteados en la sección 4.9 para la instalación de una malla S1 sin varillas, ya que una de las limitantes de la herramienta computacional AS-PotencialesSuperficiales es la no implementación de mallas combinadas con electrodos, entonces utilizando la herramienta computacional basada en el método de elementos finitos, como se muestra en la Fig. 76.

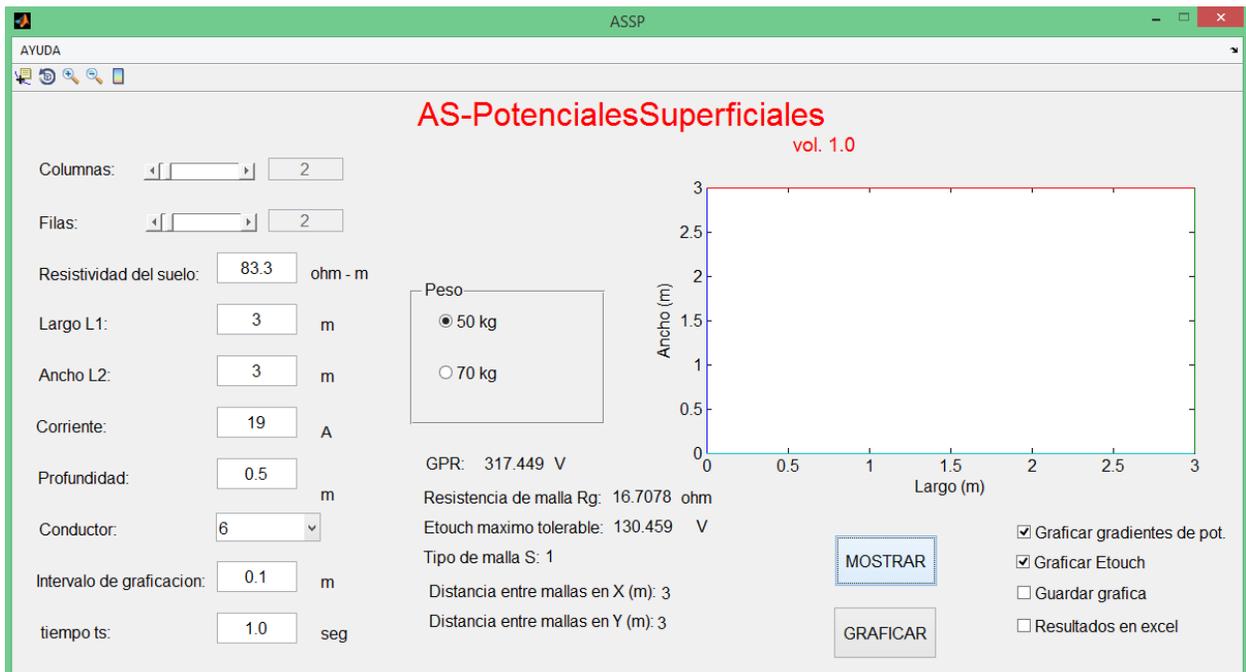


Fig. 76 Resultados obtenido mediante Matlab utilizando modelo de elementos finitos para una malla S1 sin varillas de 3x3m

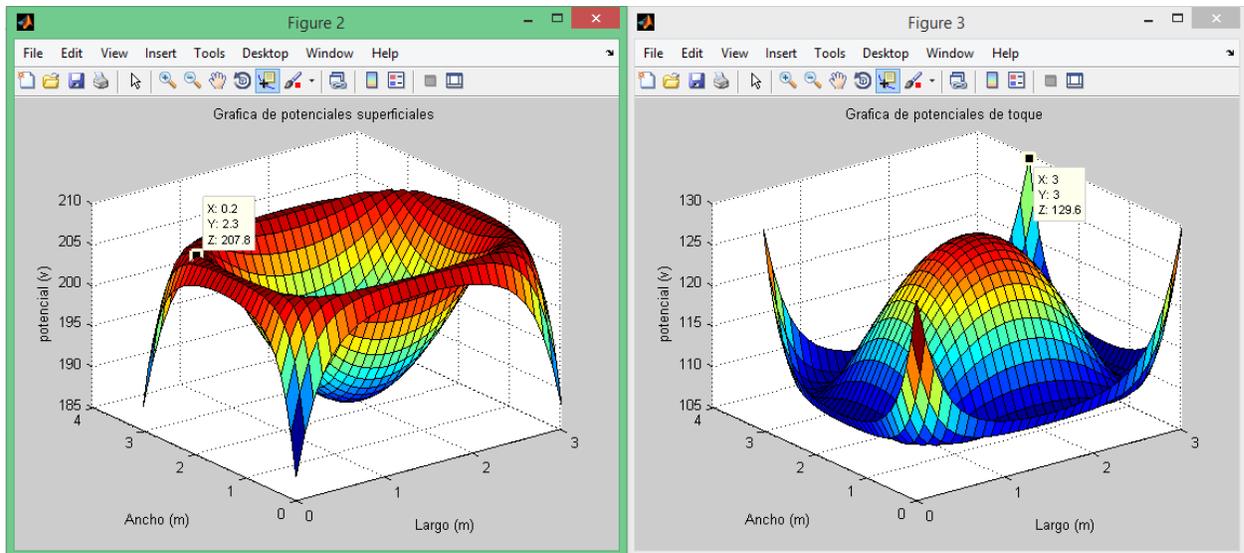


Fig. 77: Mapeo de potenciales en MATLAB (2) Gradiente de potencial, (3) Potencial de toque

### 5.4.3 Cálculo de potenciales mediante R-PAT

Utilizando los parámetros de diseño planteados en la sección 4.9 para la instalación de una malla S1 con varillas, se presenta el cálculo de potenciales máximos tolerables y de diseño con el programa R-PAT.

Aspectos Legales a cumplir según Acuerdo 29-E-2000 (SIGET)					Aspectos de Seguridad según IEEE 80-2013	
Aspecto a evaluar	Valor Requerido	Condición	Valor Actual		Aspecto a evaluar	Valor
Incremento del Potencial a Tierra, GPR	5000	>	223.86	V	Voltaje de Malla (Em)	70.28 V
Espaciamiento entre conductores paralelos	3	<	3.00	m	Voltaje de Paso (Es)	49.10 V
Longitud de la Varilla	2.40	<	1.00	m	Voltaje Tolerable de Toque (Etouch)	157.00 V
Diámetro de la Varilla	12.7	<	40.00	mm	Voltaje Tolerable de paso (Estep)	157.00 V
Sección Transversal del Conductor	8.37	<	34.26	mm <sup>2</sup>	GPR	223.86 V
Resistencia a Tierra	1	>	11.78	Ω	<b>Comprobación de Condiciones de Seguridad</b>	
Voltaje Tolerable de Toque (Etouch)	157.00	>	70.28	V	GPR < Etouch	✗ Conductor > 2/0 ✗
Voltaje Tolerable de paso (Estep)	157.00	>	49.10	V	Em < Etouch	✓ Es < Estep ✓

Fig. 78: Resultados de malla S1 de 3x3m con varillas, mediante R-PAT

### 5.4.4 Análisis de resultados

A continuación, se presenta un cuadro comparativo de resultados obtenidos, en donde se observa los parámetros más importantes de la configuración malla S1 con varillas. Cada parámetro ha sido medido primeramente en la sección 4.9, previamente simulado con el programa comercial ETAP, R-PAT y por último con la herramienta computacional desarrolla en MATLAB utilizando el método de elementos finitos (AS-PotencialesSuperficiales).

Para una corriente de falla ( $I_g$ ) de 19 A:

Parámetros	Medición	ETAP	AS-Potenciales Superficiales (sin varillas)	R-PAT
Rg	19.9 $\Omega$	11.115 $\Omega$	16.7078 $\Omega$	11.78 $\Omega$
GPR	206 V	211.8 V	317.44 V	223.86 V
Gradiente de potencial máximo	105.77 V	149.3 V	207.8 V	-
Potencial de toque Tolerable (50kg)	-	249.8 V	130.45 V	157 V
Potencial de toque máximo	228.56 V	74.8 V	129.6 V	70.28 V
Potencial de paso máximo	41 V	51.5 V	-	49.10 V

Tabla 21: Comparación de resultados obtenidos entre medición y simulaciones para una malla S1 con varillas y sin varillas

- El valor de Rg cumple con el acuerdo 29 E-2000 de la SIGET, el cual debe ser como máximo 25 $\Omega$ , aunque depende de la potencia instalada de la SE.
- El valor de GPR es menor a 5000V por lo tanto es segura.
- Para el valor de 19 A de corriente de falla, tanto en ETAP como AS-PotencialesSuperficiales el potencial máximo de toque está por debajo del máximo tolerables establecido por la IEEE Std 80-2013.
- Los valores obtenidos con AS-PotencialesSuperficiales son relativamente más altos ya que en este caso no se utilizó varillas en las esquinas de la malla, esto hace el que valor de Rg aumente por lo tanto GPR verá un incremento significativo y los potenciales principalmente en las esquinas de las mallas que es donde se produce el potencial máximo de toque y de paso.

## 5.5 Configuración malla S4

Retomando la malla S4 real, explicada en la sección 4.10, para el estudio de casos reales, en donde se analizará tanto físicamente (datos medidos) como datos obtenidos mediante la simulación de sus parámetros de diseño en el programa comercial ETAP, simulado en el programa R-PAT y el programa realizado en el entorno de MATLAB utilizando el método de elementos finitos.

### 5.5.1 Cálculo de potenciales mediante ETAP

Utilizando los parámetros de diseño planteados en la sección 4.10 para la instalación de una malla S4, como se muestra en la Fig. 79.

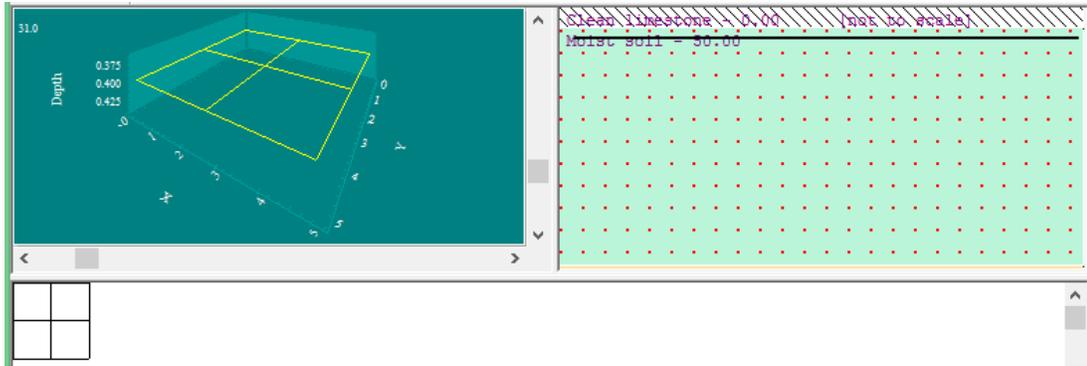


Fig. 79: Diseño de la malla S4 en el entorno de ETAP, y tipo de suelo homogéneo de 50  $\Omega.m$

Estableciendo una corriente de falla ( $I_g$ ) de 62 A como se muestra en la Fig. 80

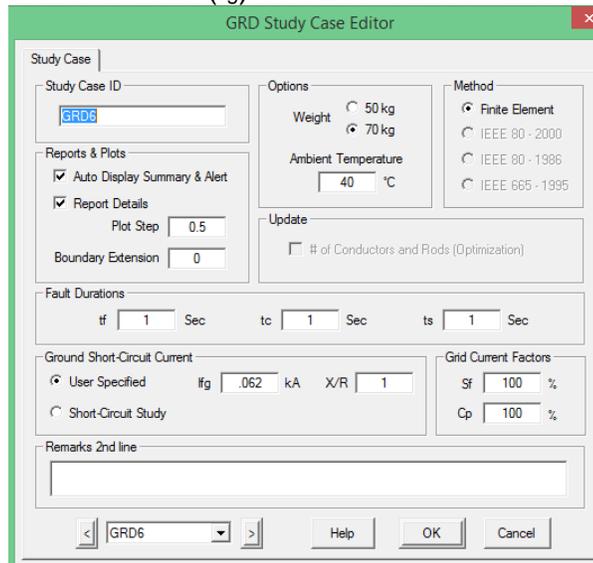


Fig. 80: Ventana de configuración de datos de corriente para una malla S4

Ahora se obtienen los datos básicos proporcionado por ETAP como se muestra en la Fig. 81.

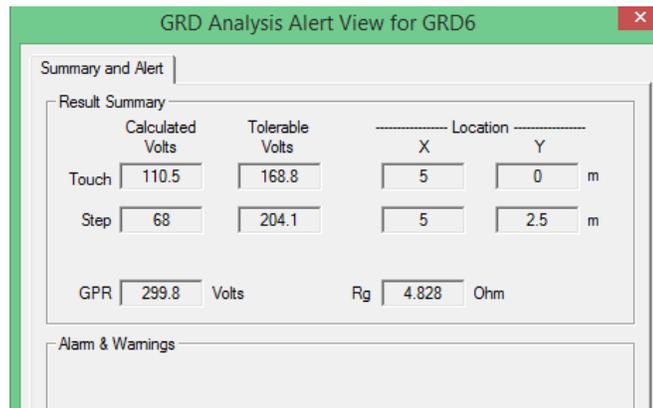


Fig. 81: Resultados de parámetros básicos de malla S4

Utilizando la herramienta de Ploteo de potenciales superficiales de ETAP para una malla S4, se obtuvo los siguientes resultados del gradiente de potencial Fig. 82, potencial de toque Fig. 83 y potencial de paso Fig. 84:

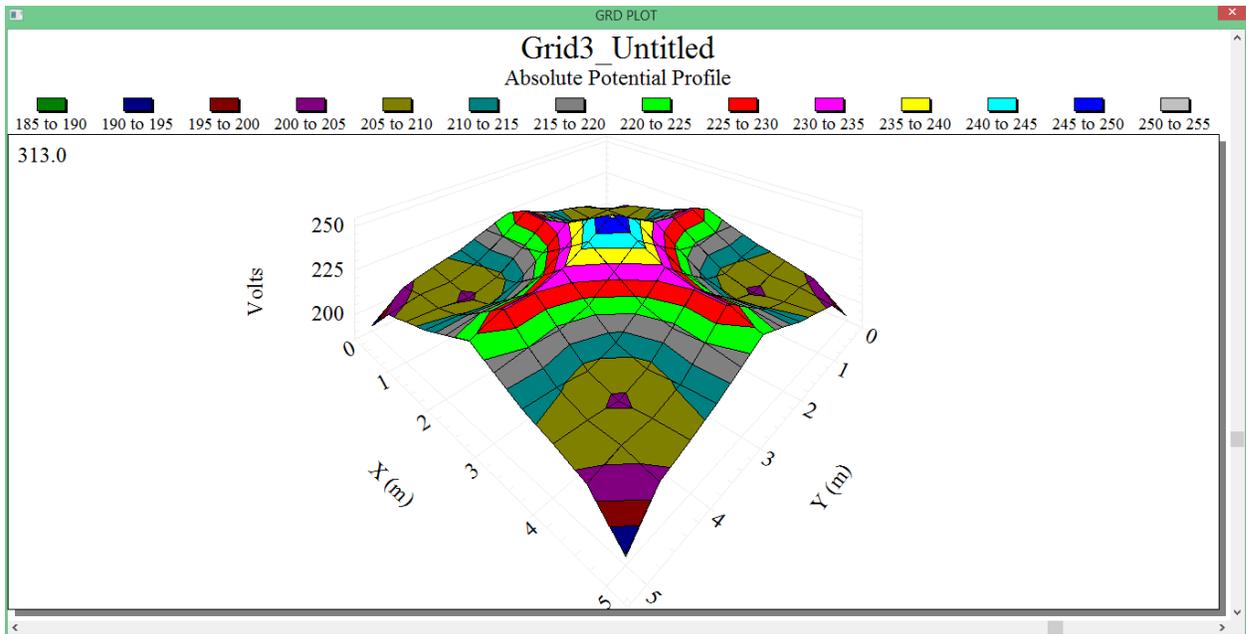


Fig. 82: Simulación en ETAP del gradiente de potencial para una malla S4

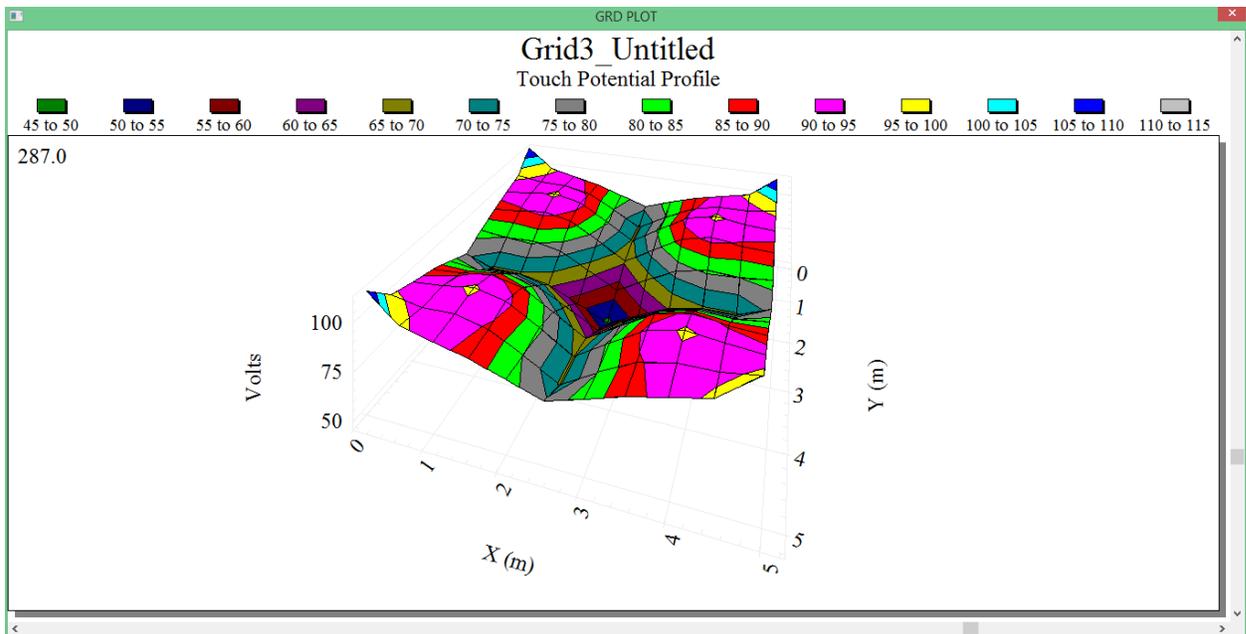


Fig. 83: Simulación en ETAP de potencial de toque para una malla S4

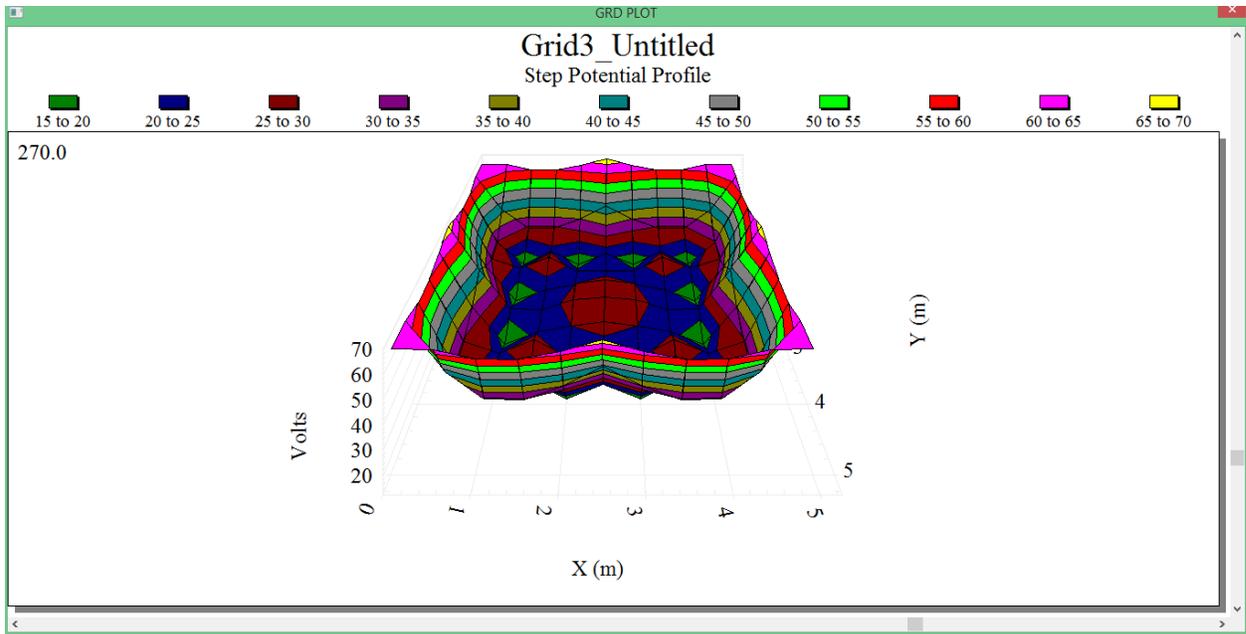


Fig. 84: Simulación en ETAP de potencial de paso para una malla S4

### 5.5.2 Cálculo de potenciales mediante MATLAB

Utilizando los parámetros de diseño planteados en la sección 4.10 para la instalación de una malla S4, utilizando la herramienta computacional basada en el método de elementos finitos, como se muestra en la Fig. 85.

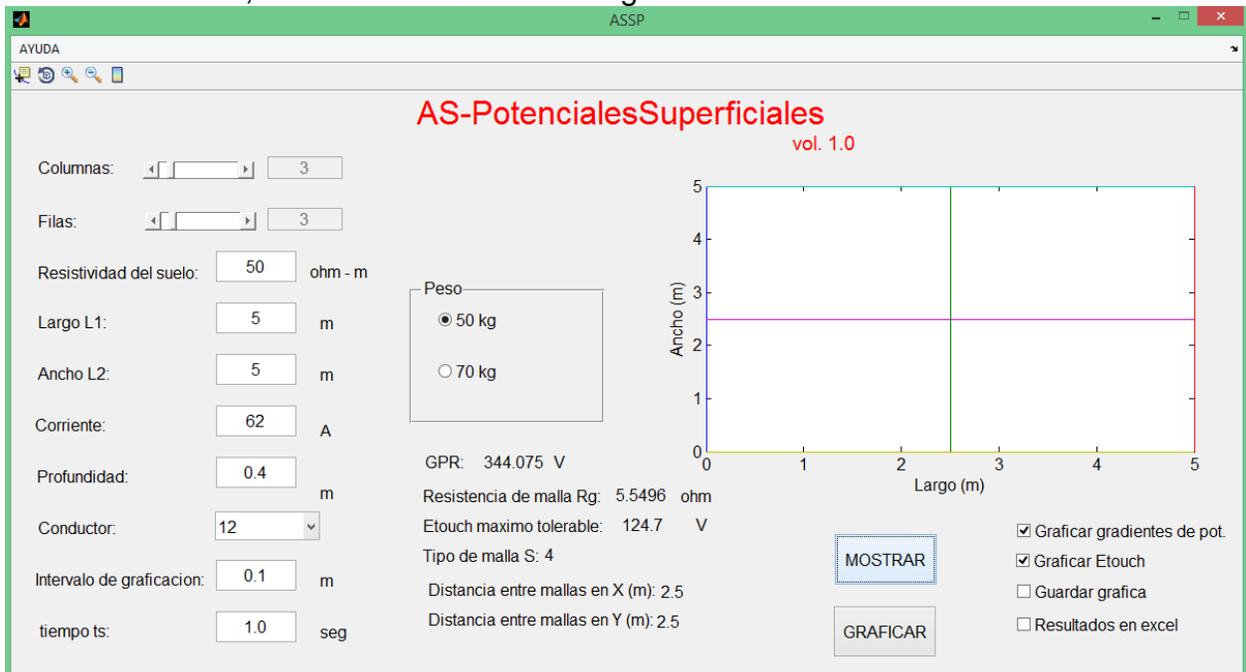


Fig. 85: Resultados obtenidos mediante MATLAB utilizando modelo de elementos finitos para una malla S4 de 5x5 metros

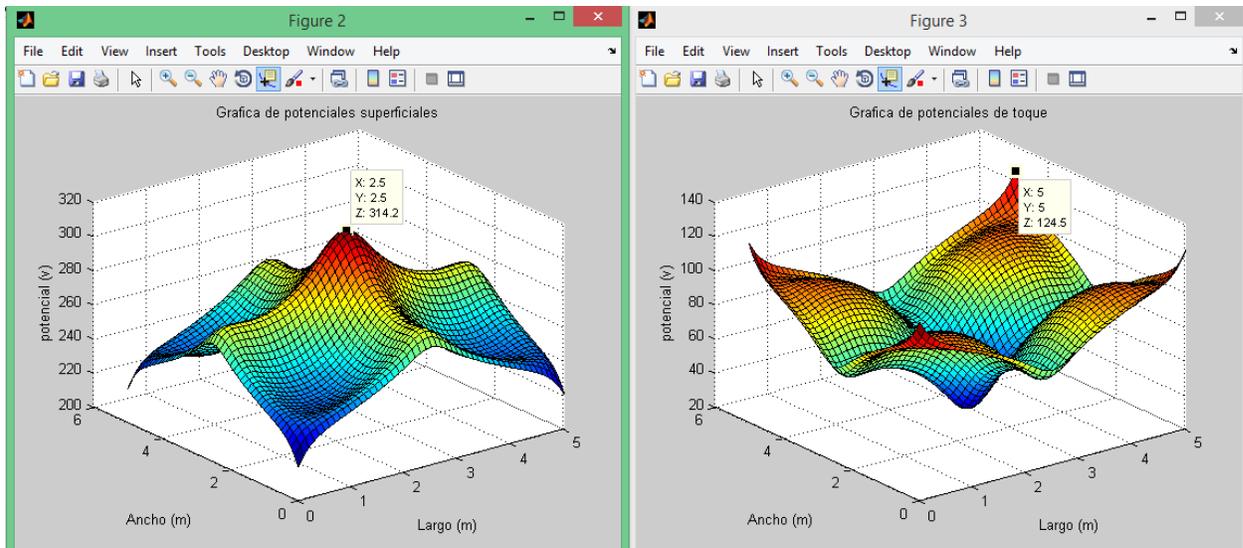


Fig. 86: Mapeo de potenciales en MATLAB (2) Gradiente de potencial, (3) Potencial de toque

### 5.5.3 Cálculo de potenciales mediante R-PAT

Utilizando los parámetros de diseño planteados en la sección 4.10 para la instalación de una malla S4 sin varillas, se presenta el cálculo de potenciales máximos tolerables y de diseño con el programa R-PAT.

Aspectos Legales a cumplir según Acuerdo 29-E-2000 (SIGET)					Aspectos de Seguridad según IEEE 80-2013	
Aspecto a evaluar	Valor Requerido	Condición	Valor Actual		Aspecto a evaluar	Valor Actual
Incremento del Potencial a Tierra, GPR	5000	>	344.08	V	Voltaje de Malla (Em)	99.22 V
Espaciamiento entre conductores paralelos	3	<	2.50	m	Voltaje de Paso (Es)	85.64 V
Longitud de la Varilla	2.40	<	0.00	m	Voltaje Tolerable de Toque (Etouch)	157.00 V
Diámetro de la Varilla	12.7	<	0.00	mm	Voltaje Tolerable de paso (Estep)	157.00 V
Sección Transversal del Conductor	8.37	<	34.26	mm <sup>2</sup>	GPR	344.08 V
Resistencia a Tierra	1	>	5.55	Ω	<b>Comprobación de Condiciones de Seguridad</b>	
Voltaje Tolerable de Toque (Etouch)	157.00	>	99.22	V	GPR < Etouch	✗ Conductor > 2/0 ✗
Voltaje Tolerable de paso (Estep)	157.00	>	85.64	V	Em < Etouch	✓ Es < Estep ✓

Fig. 87: Resultados de malla S4 de 5x5m, mediante R-PAT

### 5.5.4 Análisis de resultados

A continuación, se presenta un cuadro comparativo de resultados obtenidos, en donde se observa los parámetros más importantes de la configuración malla S4. Cada parámetro ha sido medido primeramente en la sección 4.10, previamente simulado con el programa comercial ETAP, R-PAT y por último con la herramienta computacional desarrolla en Matlab utilizando el Método de Elementos Finitos (AS-PotencialesSuperficiales).

Para una corriente de falla ( $I_g$ ) de 62 Amp:

Parámetros	Medición	ETAP	AS-Potenciales Superficiales	R-PAT
Rg	16.3 $\Omega$	4.828 $\Omega$	5.5496 $\Omega$	5.55 $\Omega$
GPR	1005 V	299.8 V	344.075 V	344.08 V
Gradiente de potencial máximo	331.88 V	253 V	314.2 V	-
Potencial de toque Tolerable (50kg)	-	168.8 V	124.7 V	157 V
Potencial de toque máximo	774.88 V	110.5 V	124.5 V	99.22 V
Potencial de paso máximo	32.45 V	68 V	-	85.64 V

Tabla 22: Comparación de resultados obtenidos entre medición y simulaciones para una malla S4

- El valor de Rg cumple con el acuerdo 29 E-2000 de la SIGET, el cual debe ser como máximo 25 $\Omega$ , aunque depende de la potencia instalada de la SE.
- El valor de GPR es menor a 5000V por lo tanto es segura.
- Para el valor de 62 A de corriente de falla, tanto en ETAP como AS-Potenciales Superficiales el potencial máximo de toque está por debajo del máximo tolerables establecido por la IEEE Std 80-2013, solamente en la medición debido al valor medido de GPR los potenciales de toque se elevan en gran medida.

## 5.6 Configuración malla S25

Analizando un caso hipotético de una malla S25 por medio de ETAP y la herramienta computacional desarrollada en MATLAB (AS-Potenciales Superficiales). Para comparar sus resultados y verificar el potencial de la herramienta basada en el método de elementos finitos.

### 5.6.1 Cálculo de potenciales mediante ETAP

Debido a que es un caso hipotético se tomó los datos de diseño de manera arbitraria, siendo la resistividad del suelo de 150  $\Omega$ -m, profundidad de enterramiento de la malla 0.5 m y área que abarca la malla de 50m<sup>2</sup>.

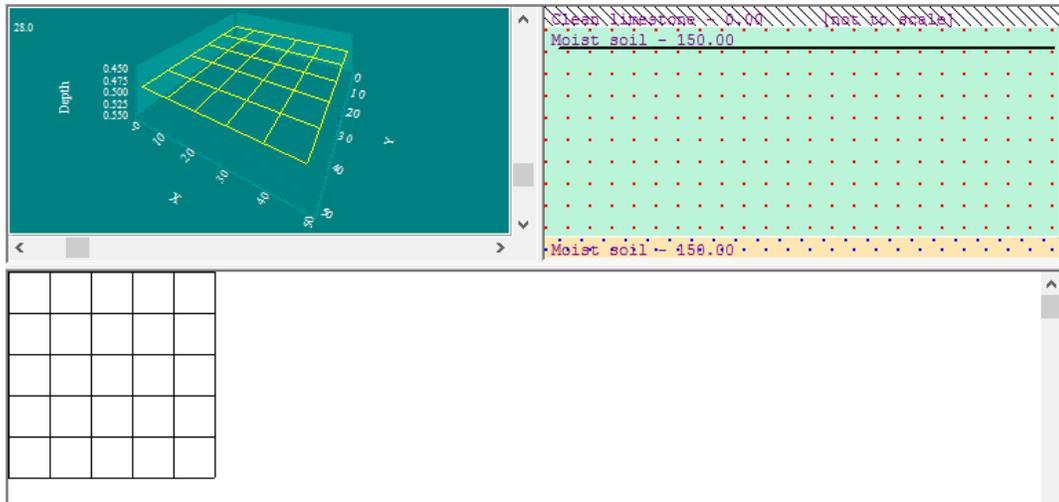


Fig. 88: Diseño de la malla S25 en el entorno de ETAP, y tipo de suelo homogéneo de 150 Ω.m

Estableciendo una corriente de falla ( $I_g$ ) de 380 Amp como se muestra en la Fig. 89.

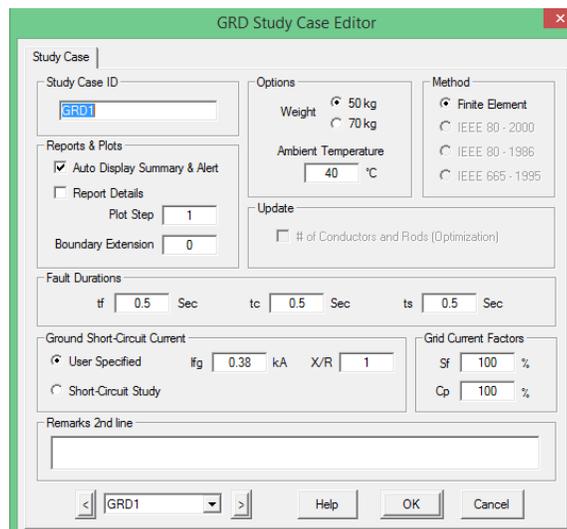


Fig. 89: Ventana de configuración de parámetros de corrientes

Ahora se obtienen los datos básicos proporcionado por ETAP como se muestra en la Fig. 90.

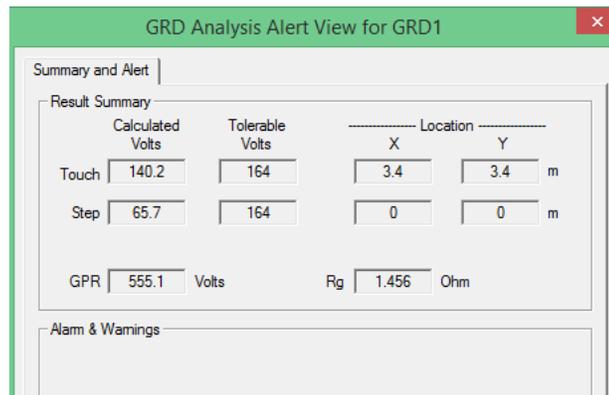


Fig. 90: Resultados de parámetros básicos de malla S4

Utilizando la herramienta de ploteo de potenciales superficiales de ETAP para una malla S25, se obtuvo los siguientes resultados del gradiente de potencial Fig. 91, potencial de toque Fig. 92 y potencial de paso Fig. 93:

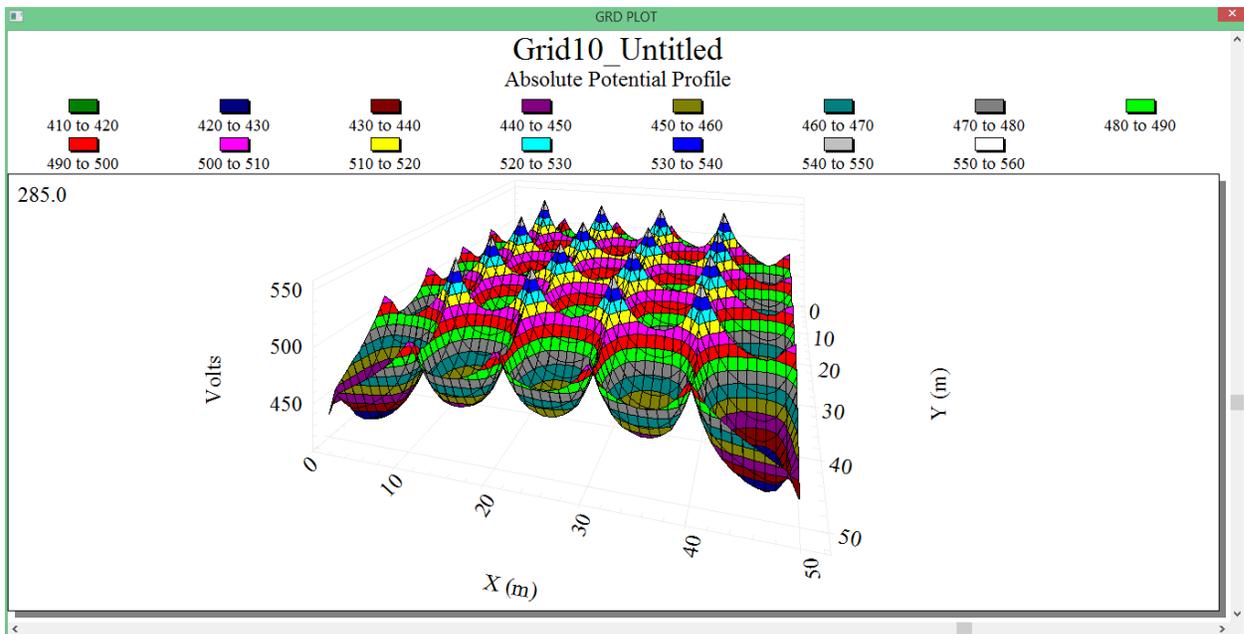


Fig. 91: Simulación en ETAP de gradiente de potencial de una malla S25

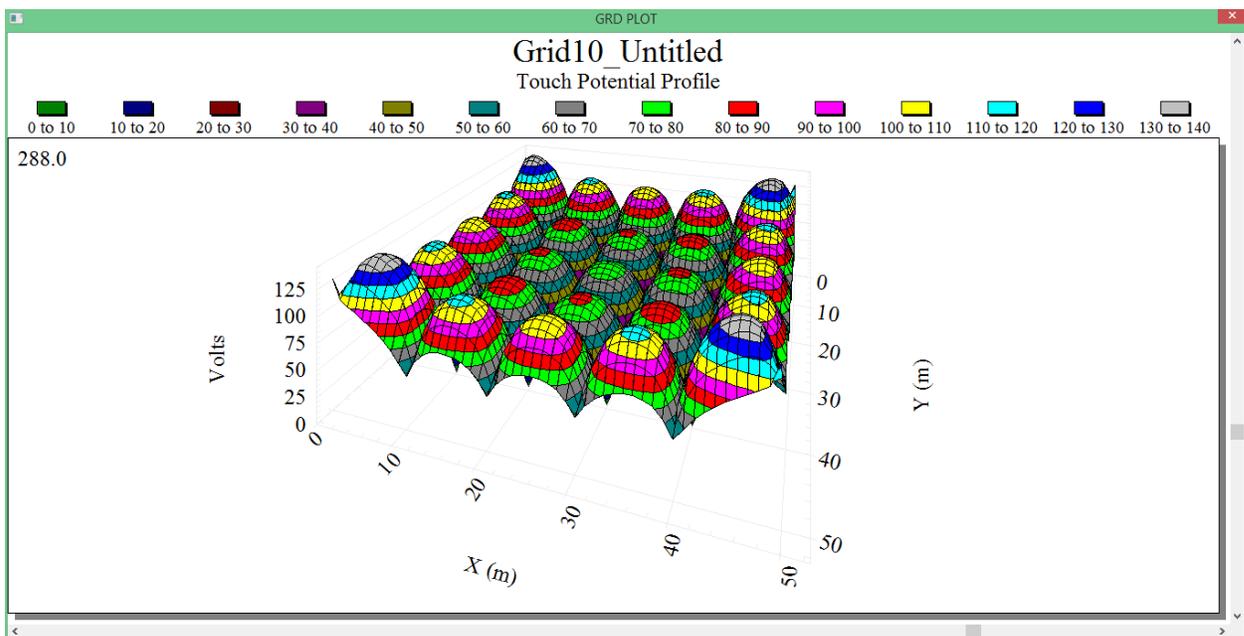


Fig. 92: Simulación en ETAP de potencial de toque para una malla S25

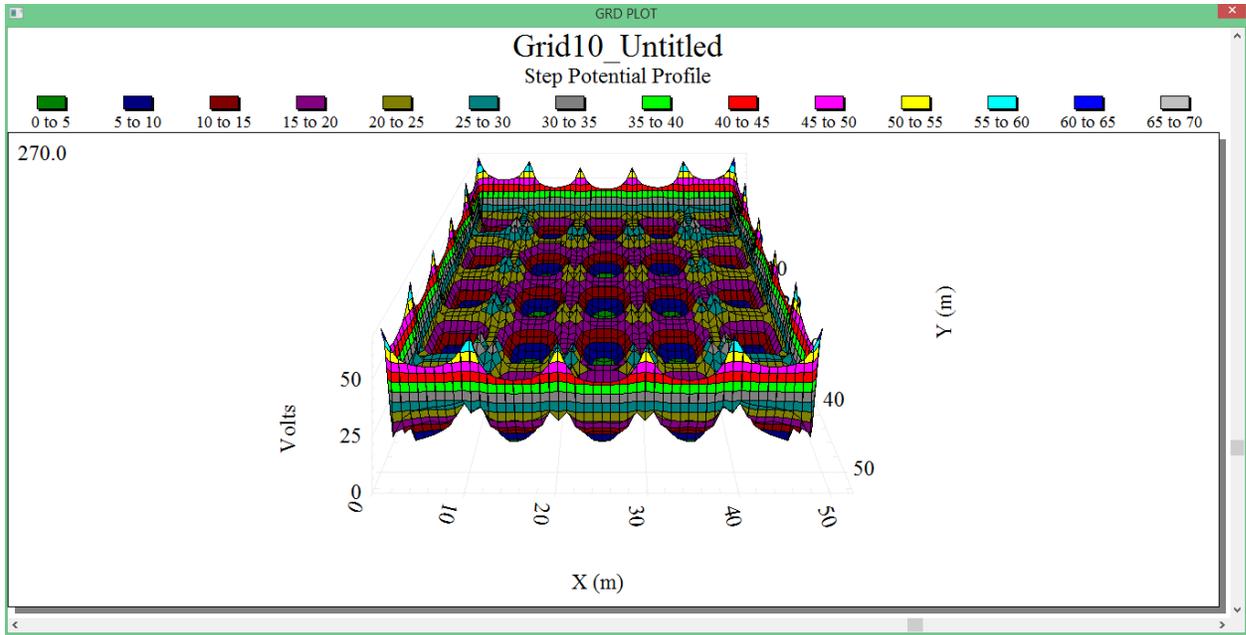


Fig. 93: Simulación en ETAP de potencial de paso para una malla S25

### 5.6.2 Cálculo de potenciales mediante MATLAB

Utilizando los parámetros de diseño planteados en la sección 5.6.1 para la una malla S25, se utiliza la herramienta computacional basada en el Método de Elementos Finitos (AS-PotencialesSuperficiales), como se muestra en la Fig. 94.

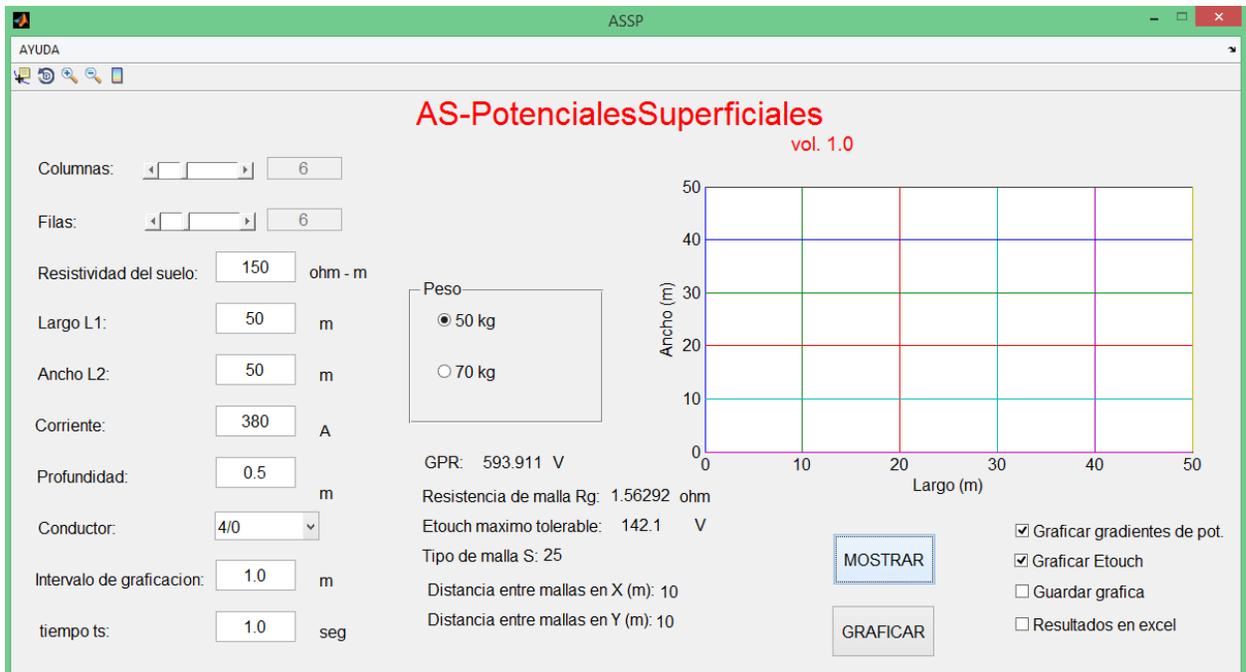


Fig. 94: Resultados obtenido mediante Matlab utilizando modelo de elementos finitos para una malla S4 de 5x5m

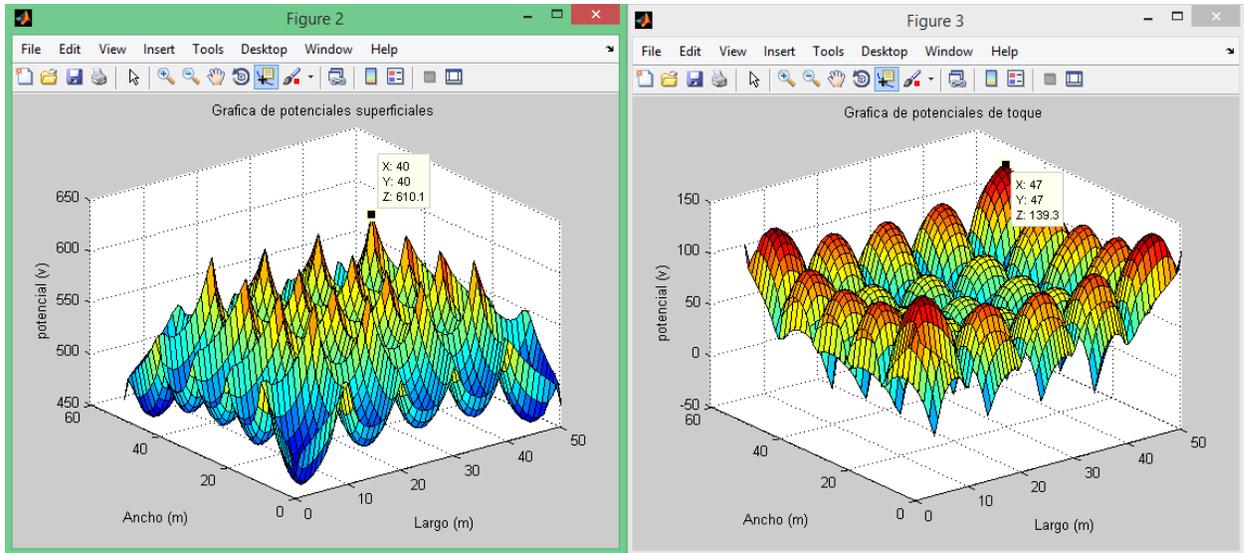


Fig. 95: Mapeo de potenciales en MATLAB (2) Gradiente de potencial, (3) Potencial de Toque

### 5.6.3 Cálculo de potenciales mediante R-PAT

Debido a que es un caso ficticio se tomó los datos de diseño de manera arbitraria, siendo la resistividad del suelo de  $150 \Omega\cdot m$ , profundidad de enterramiento de la malla  $0.5 m$  y área que abarca la malla de  $50m^2$ .

Aspectos Legales a cumplir según Acuerdo 29-E-2000 (SIGET)					Aspectos de Seguridad según IEEE 80-2013	
Aspecto a evaluar	Valor Requerido	Condición	Valor Actual		Aspecto a evaluar	Valor Actual
Incremento del Potencial a Tierra, GPR	5000	>	596.02 V	✓	Voltaje de Malla (Em)	152.98 V
Espaciamiento entre conductores paralelos	3	<	10.00 m	✓	Voltaje de Paso (Es)	88.94 V
Longitud de la Varilla	2.40	<	0.00 m	✗	Voltaje Tolerable de Toque (Etouch)	157.00 V
Diámetro de la Varilla	12.7	<	0.00 mm	✗	Voltaje Tolerable de paso (Estep)	157.00 V
Sección Transversal del Conductor	8.37	<	282.05 mm <sup>2</sup>	✓	GPR	596.02 V
Resistencia a Tierra	1	>	1.57 $\Omega$	✗	<b>Comprobación de Condiciones de Seguridad</b>	
Voltaje Tolerable de Toque (Etouch)	157.00	>	152.98 V	✓	GPR < Etouch	✗ Conductor > 2/0 ✓
Voltaje Tolerable de paso (Estep)	157.00	>	88.94 V	✓	Em < Etouch	✓ Es < Estep ✓

Fig. 96: Resultados de malla S25 de 50x50m, mediante R-PAT

### 5.6.4 Análisis de resultados

A continuación, se presenta un cuadro comparativo de resultados obtenidos, en donde se compara los parámetros más importantes de la configuración malla S25. Cada parámetro ha sido previamente simulado con el programa comercial ETAP, R-PAT y la herramienta computacional desarrolla en MATLAB utilizando el Método de Elementos Finitos (AS-PotencialesSuperficiales).

Para una corriente de falla ( $I_g$ ) de 380 A:

Parámetros	ETAP	AS-Potenciales Superficiales	R-PAT
Rg	0.971Ω	1.0419 Ω	1.02 Ω
GPR	555.1 V	593.91 V	596.02 V
Gradiente de potencial máximo	557.6 V	610.1 V	-
Potencial de toque Tolerable (50kg)	164 V	142.1 V	157 V
Potencial de toque máximo	140.2 V	139.3 V	152.98 V
Potencial de paso máximo	65.7 V	-	88.94 V

Tabla 23: Comparación de resultados obtenidos entre medición y simulaciones para una malla S25

- El valor de Rg cumple con el acuerdo 29 E-2000 de la SIGET, el cual debe ser como máximo 25Ω, aunque depende de la potencia instalada de la SE.
- El valor de GPR es menor a 5000V por lo tanto es segura.
- Para el valor de 380 A de corriente de falla, tanto en ETAP como AS-PotencialesSuperficiales el potencial máximo de toque está por debajo del máximo tolerables establecido por la IEEE Std 80-2013, La malla es segura para este nivel de falla pero está cerca de su límite.

### 5.7 Subestación Aguilares

Subestación con trafo de 10/12MVA, 46/23kVA, con conexión Yyn0, siendo de 46kV el lado de alta en donde tiene nivel de falla monofásica de 0 por ser un sistema con neutro aislado, el lado de baja 23kV posee un nivel en falla monofásica de 1300 A debido a que posee neutro flotante y los clientes brindan bajo nivel de referencia. Las contribuciones a las corrientes de falla monofásicas siempre son de manera remota a la subestación y esta no da contribución local, tanto el sistema de 46kV como el de 23kV está de manera flotante ya que no existe una impedancia de secuencia equivalente. La Subestación cuenta con un circuito de sub-transmisión y tres circuitos de distribución.

El diseño se realizó para cumplir con los estándares de seguridad de la norma IEEE Std 80-2013, sin la aplicación de una capa superficial y utilizando el factor  $S_f$  de división de corriente para R-PAT, pero para la simulación en Matlab se utilizó la gráfica del factor  $S_f$  con contribución 100% remota, en donde solamente tienen neutro aterrizado los tres circuitos del lado de 23kV.

Datos de diseño:

Dimensiones: 32m de largo por 27m de ancho

Resistividad: 120 Ω.m

Corriente de falla  $I_f$ : 1300 A

Profundidad de enterramiento: 0.7m

Conductor: 4/0 cobre

## 5.7.1 Simulación en R-PAT

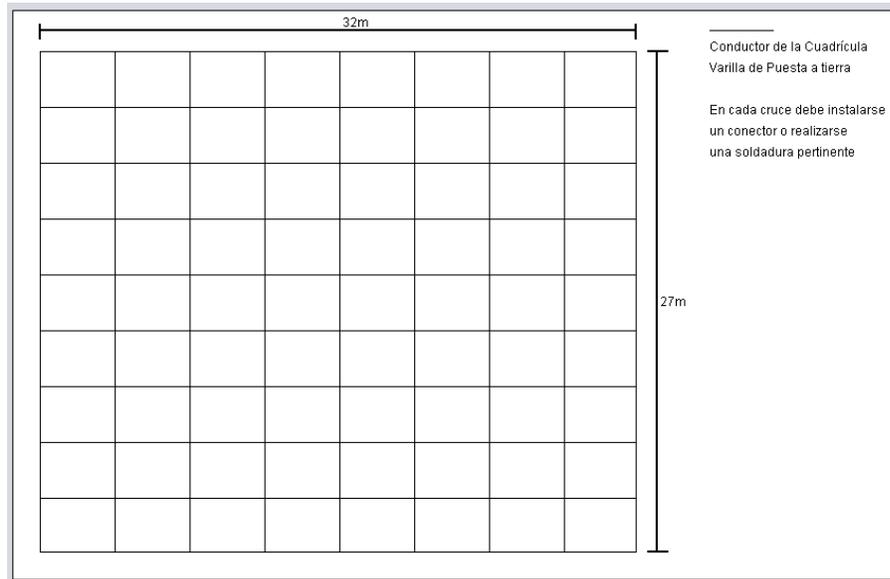


Fig. 97: Vista en planta de red de puesta a tierra, SE Aguilares

Aspectos de Seguridad según IEEE 80-2013		Conclusiones y Recomendaciones	
<b>Aspecto a evaluar</b>			
Voltaje de Malla (Em)	95.76 V	<b>Conclusiones:</b> El Sistema de Puesta a Tierra: • Cumple las condiciones de seguridad establecidas por el estándar IEEE 80-2013 • Presenta niveles de voltajes tolerables de paso y toque seguros. • Presenta un GPR mayor a Etouch pero se cumple que: Em es menor que Etouch y Es es menor que Estep, por lo tanto, es seguro.	
Voltaje de Paso (Es)	70.26 V		
Voltaje Tolerable de Toque (Etouch)	157.00 V		
Voltaje Tolerable de paso (Estep)	157.00 V		
GPR	626.04 V		
<b>Comprobación de Condiciones de Seguridad</b>			
GPR < Etouch	✘	Conductor > 2/0	✔
Em < Etouch	✔	Es < Estep	✔
		<b>Recomendaciones:</b> • No es necesario disminuir la resistencia de puesta a tierra Rg ya que cumple con los aspectos de seguridad del estándar IEEE 80-2013	

Fig. 98: Potenciales tolerables para el diseño de SE Aguilares en R-PAT

Aspectos Legales a cumplir según Acuerdo 29-E-2000 (SIGET)				
Aspecto a evaluar	Valor Requerido	Condición	Valor Actual	
Incremento del Potencial a Tierra, GPR	5000	>	626.04 V	✔
Espaciamiento entre conductores paralelos	3	<	4.00 m	✔
Longitud de la Varilla	2.40	<	0.00 m	✘
Diámetro de la Varilla	12.7	<	0.00 mm	✘
Sección Transversal del Conductor	8.37	<	282.05 mm <sup>2</sup>	✔
Resistencia a Tierra	1	>	1.95 Ω	✘
Voltaje Tolerable de Toque (Etouch)	157.00	>	95.76 V	✔
Voltaje Tolerable de paso (Estep)	157.00	>	70.26 V	✔

Fig. 99: Valores de diseño de SE Aguilares para cumplir acuerdo 29 E-2000 (SIGET)

### 5.7.2 Simulación de Matlab (AS-Potenciales Superficiales)

Para encontrar el valor de  $I_g$  a utilizar se utilizó la gráfica de Current Splits, en donde se obtiene el valor de  $S_f$  correspondiente a la resistencia de puesta a tierra y al número de circuitos con referencias a tierra ya sea neutro y cables de guarda, utilizando la ecuación [2]:

$$I_g = S_f \times I_f \quad (5.1)$$

Utilizando la resistencia de puesta a tierra con valor de  $2.05\Omega$  en la Fig. 100 para encontrar el porcentaje de corriente que pasa por la malla  $I_g$ .

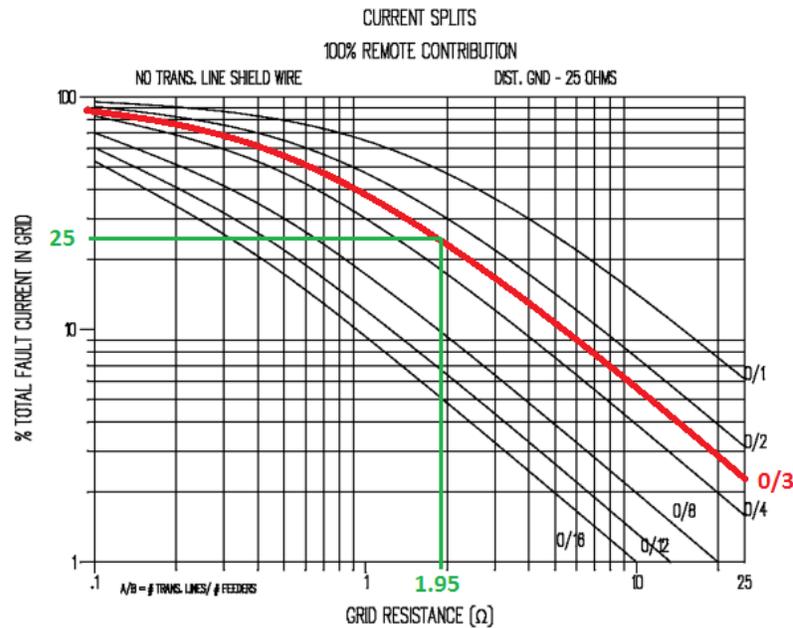


Fig. 100 Curva aproximada del factor de división  $S_f$ , con la contribución 100% remota y 3 circuitos de distribución con neutro aterrizado

De la gráfica anterior el porcentaje de  $I_f$  que pasa por la malla es el 25%.

Utilizando la ecuación (5.1) y el valor de la corriente de falla de 1300 A,  $I_g = 325$  A.

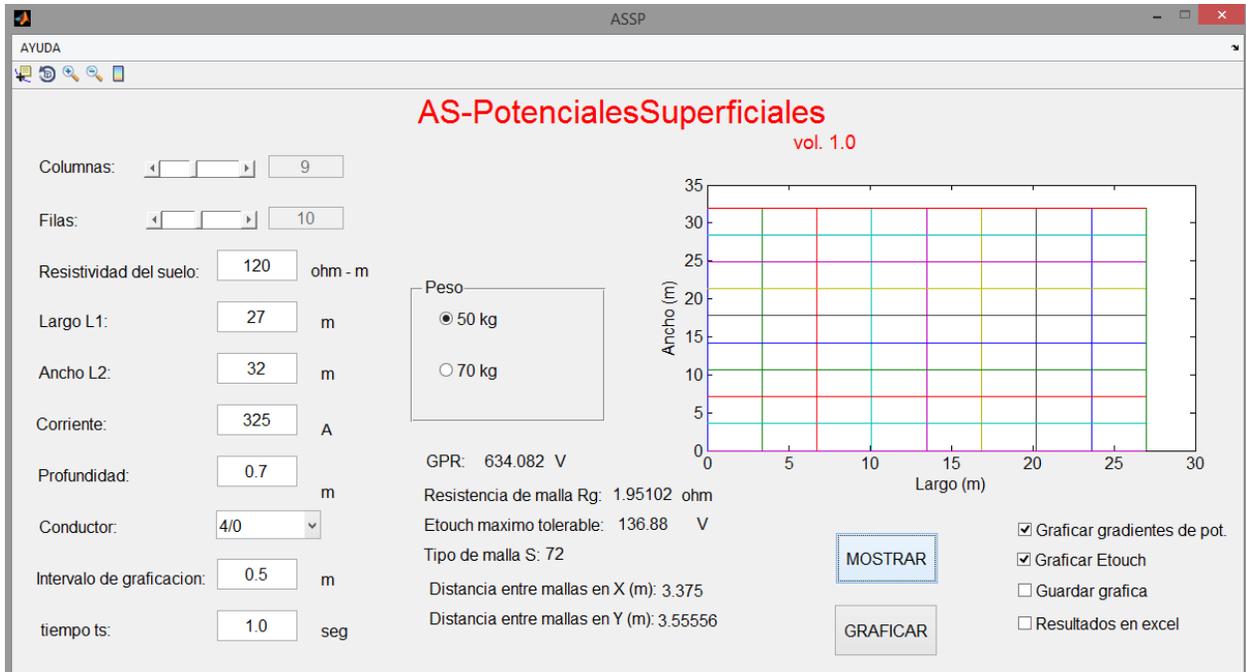


Fig. 101: Resultados obtenido mediante Matlab utilizando modelo de elementos finitos para una malla S30 de 27x32m

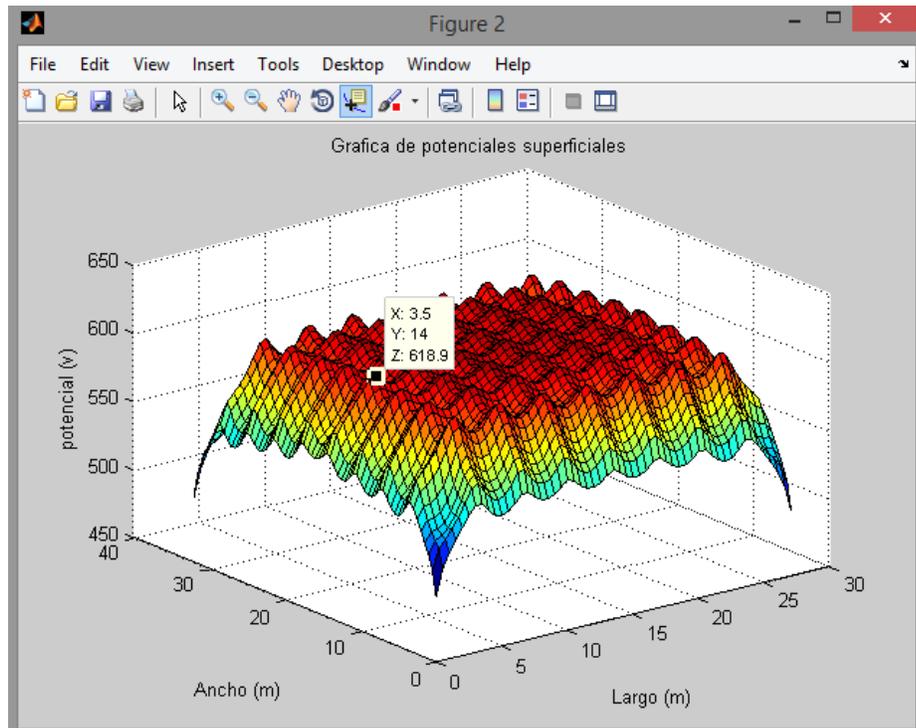


Fig. 102: Mapeo del Gradiente de Potencial en MATLAB

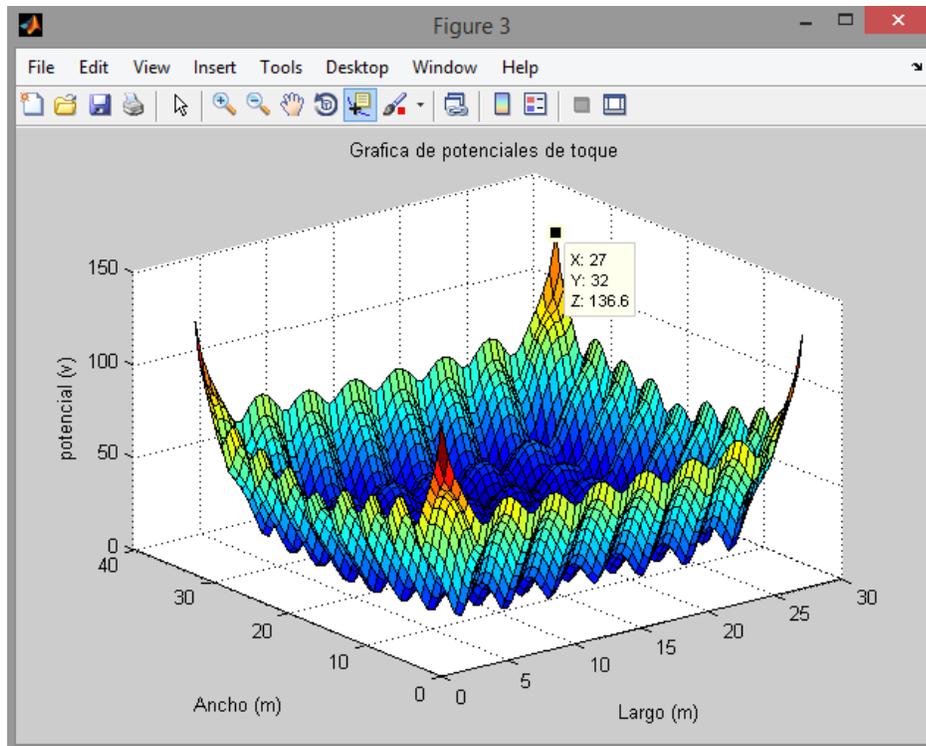


Fig. 103: Mapeo del potencial de toque en MATLAB

### 5.7.3 Análisis de resultados

Parámetros	AS-Potenciales Superficiales	R-PAT
Rg	1.95 $\Omega$	1.95 $\Omega$
GPR	634.08 V	626.04 V
Potencial de toque tolerable	136.88 V	157 V
Potencial de toque máximo	136.6 V	95.76 V

Tabla 24: Comparación de resultados obtenidos entre simulaciones para la SE Aguilares

- El valor de Rg cumple con el acuerdo 29 E-2000 de la SIGET, el cual debe ser como máximo 25 $\Omega$ , aunque depende de la potencia instalada de la SE.
- El valor de GPR es menor a 5000V por lo tanto es segura.
- Para el valor de 1300 A de corriente de falla, tanto en R-PAT como en AS-PotencialesSuperficiales la malla es segura ya que los potenciales de toque no sobrepasan el máximo potencial establecido por la norma IEEE Std 80-2013.
- El diseño se realizó para cumplir con el programa AS, en donde podemos ver que el programa R-PAT cumple de mane sobrada los parámetros de voltajes tolerables, esto debido al método de cálculo del potencial de toque tolerable.

## OBSERVACIONES

En el procedimiento explicado en el capítulo 3 y utilizado en el programa en MATLAB, cabe señalar para mallas que solo posean dos filas o dos columnas, la numeración de segmentos se hace de forma diferente considerando que la malla exterior todas tienen el mismo tipo de densidad de corriente de distribución.

En el documento no se señala el procedimiento para agregar varillas, pero con varias pruebas realizadas en ETAP y con Excel se observó que las varillas dentro de las mallas poseen un tipo diferente de densidad de corriente de distribución.

En las pruebas realizadas en el programa en MATLAB se observó que, para disminuir el potencial de toque de una red de puesta a tierra sin modificar el área, es disminuyendo el espaciamiento entre conductores (aumentando el número de malla) hasta alcanzar cierto límite donde ya no se disminuye por más que se aumente la cantidad de cable enterrado también se puede disminuir el potencial de toque aumentando la profundidad de toda la red cabe resaltar que en ambos casos solo se aplica para las mallas más internas de las redes de puesta a tierra.

El valor de resistencia de puesta a tierra medido de las configuraciones instaladas varía en gran medida con respecto a los valores obtenidos mediante simulaciones debido a las condiciones del suelo como lo fueron: suelos húmedos, rellenos con ripio y suelos de dos o más capas, esto ocasiona que tanto el GPR como los potenciales superficiales tiendan a incrementar.

Para fines didácticos se puede utilizar cable No. 12 en las redes de puesta a tierra, ya que el programa comercial ETAP posee en sus opciones este número de cable como mínimo, para una instalación de malla real se deberá tomar en cuenta el nivel de falla para la elección del conductor.

Se pudo observar que el estudio para la implementación de dos o más capas es de suma importancia y puede modificar de gran manera los resultados a obtener, es por ello que esta limitante de suelos de uniformes únicamente, debe ser de los principales objetivos a cumplir para futuros trabajos basados en el presente trabajo de graduación.

## CONCLUSIONES

El análisis matemático para gradientes de potencial presentando en la norma IEEE Std 80-1986, solamente presenta los potenciales de una línea diagonal en una malla cuadrada, siendo el gradiente de potencial, potencial de paso y de toque, los potenciales que se pueden obtener con las diferentes ecuaciones planteadas en esta norma. No se puede obtener un mapeo 3D a partir de este análisis.

Se comprobó que efectivamente se pueden medir los potenciales superficiales de mallas de prueba con un telurómetro convencional, como lo es el equipo DIGITAL GROUND RESISTANCE AND SOIL RESISTIVITY TESTER 6471, que se encuentra disponible en la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, el cual fue utilizado en el presente trabajo de graduación para medir el gradiente de potencial, el potencial de toque y de paso, basándose en los procedimientos descritos en la norma IEEE Std 81-2012. Así como también se logró medir el GPR de las mallas de prueba, en donde se hizo la suposición de que toda la corriente inyectada por el telurómetro se comportaría como la corriente total que viaja por tierra y energiza la malla.

El modelado del suelo mediante el método de Wenner resultó ser de dos capas, siendo la primera capa de mayor resistividad que la segunda capa (ver anexo A.2). Para la implementación del cálculo de los potenciales superficiales basado en el Método de Elementos Finitos, la resistividad en todos los casos se tomó como uniforme haciendo un promedio de los valores obtenidos con el modelado, debido a que una de las limitantes del método y por ende del programa implementado en Matlab es únicamente para suelos uniformes.

El máximo valor del gradiente de potencial no es igual que el valor de GPR, ya que el GPR es el máximo nivel que alcanza una malla de PAT al paso de una corriente  $I_g$ , este valor se mide directamente del conductor, en cambio el gradiente de potencial es un valor de un punto en la superficie de la tierra.

Analizando las gráficas de potencial de toque en una red de tierra se puede determinar que los mayores potenciales de toque se producen en las cuadrículas exteriores, especialmente en las esquinas de las mallas debido a que la densidad de corriente es mayor en los perímetros de una red, mientras que la densidad de corriente es menor en las cuadrículas más internas de la red, también es resaltar analizando las mallas, los potenciales de toque disminuye donde se encuentra el enterrado del cable (siendo los lugares donde se conectan las estructuras de los equipos), y aumentando en el centro de cada cuadrícula. Y analizando las gráficas de potencial de paso en una red de tierra se puede determinar que los mayores potenciales de paso se producen en el perímetro

de una red de puesta a tierra debido que al exterior de la red el potencial superficial cae abruptamente hasta llegar al valor de cero.

La configuración de electrodo simple de la sección 5.4, no cumple con los estándares mínimos para ser una puesta a tierra segura, y que el valor de  $R_g$  no logra cumplir con el acuerdo 29 E-2000 de la SIGET en donde establece un valor de resistencia de puesta a tierra máximo de  $25\Omega$ , el valor obtenido mediante medición con una resistividad de suelo muy favorable de  $83.1\Omega.m$  fue de  $83.1\Omega$ . Para lograr que una varilla de 3 pies cumpla con la norma IEEE Std 80-2013 se utilizó una corriente relativamente pequeña de 2.1 A, siendo este valor el límite mediante el programa AS-PotencialesSuperficiales para poder tener una red de puesta a tierra segura.

La configuración de malla S1 con y sin varillas de la sección 5.5, si cumple con el acuerdo 29 E-2000 de la SIGET con una  $R_g$  menor a  $25\Omega$ , En el programa AS-PotencialesSuperficiales se simuló dicha configuración sin electrodos en las esquinas debido a la limitante que este posee, al compararla con los valores obtenidos median ETAP y R-PAT que se simulo con varillas, se puede ver el incremento en la resistencia de puesta a tierra de la malla S1 sin varillas dando como resultado el incremento en el GPR y los potenciales superficiales como lo es el potencial de toque aumento significativamente. Al utilizar electrodos en las esquinas se controlan de mejor manera los potenciales superficiales los cuales son de mayor riesgo en las esquinas.

En la configuración de malla S4 de la sección 5.6 se cumple el acuerdo 29 E-2000 de la SIGET para el valor máximo de  $R_g$ , los potenciales obtenidos mediante medición fueron mucho más altos que los simulados siendo el GPR de 1000 V para una corriente de 62 A, esta elevación se ve reflejada de igual manera en el gradiente de potencial y en mayor medida en el potencial de toque haciendo que esta malla sea insegura al no cumplir con los requisitos establecidos por la norma IEEE Std 80-2013. Mediante simulación ya sea en AS-Potenciales superficiales, ETAP y R-PAT para la corriente de falla de 62 A, la malla es segura en los 3 casos simulados.

Al realizar el diseño de la red de puesta a tierra de la Subestación Aguilares, se utilizó el factor de división  $S_f$  ya que la SE presenta tres circuitos de distribución aterrizados y un circuito de distribución con neutro flotante, sienta esta la conexión Yyn0. El nivel de falla monofásica en el lado de baja es de 1300 A, utilizando la gráfica del factor de división de  $S_f$  para una contribución 100% remota (IEEE Std 80-2013) la corriente  $I_g$  que fluya de la malla hacia la tierra es el 25% de 1300 A, esta corriente se reduce a 325 A y así disminuyen considerablemente los potenciales superficiales y la malla es muy segura.

## RECOMENDACIONES

Para los futuros proyectos el expandir a las diferentes formas que son permitidas en la norma IEEE Std 80 (en forma de L, En forma de T, triangulares y agregar varillas), se deben buscar una forma de numeración de segmentos, el cálculo de resistencias mutuas para varillas con segmentos horizontales y cálculo de resistencia mutuas entre segmentos angulares.

Para los casos de suelos de dos capas en el paper “computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution” se hacen referencia a los cambios en las ecuaciones de resistencias mutuas según en la capa de suelo se encuentra localizada la malla.

Para otros proyectos relacionados con el tema además de la bibliografía presentada en este trabajo, se sugiere al autor Farid Dawalibi con varios paper sobre tópicos relacionados en las redes de puesta a tierra como por ejemplo un análisis paramétrico de las mallas de puesta a tierras.

Para futuros trabajos investigar el cálculo de potenciales con una capa de material aislante (grava, asfalto, etc.) y como esta influye en el cálculo de los potenciales gradiente, de toque y de paso.

Agregar a la herramienta computacional el cálculo del factor de división de corriente  $S_f$  mediante el uso de las gráficas propuestas en la norma IEEE Std 80-80-2013, anexo C.

Investigar métodos o ecuaciones para el cálculo de los potenciales de paso, principalmente en el contorno de las mallas, ya que el método presentado por la norma IEEE Std 80-1986 sólo presenta gráficas para el cálculo de potencial de paso en las esquinas de las mallas siendo esto insuficiente para poder realizar un mapeo 3D del potencial de paso.

Investigar las ecuaciones de Schwarz para la resistencia de una malla para comparar si se aproxima a la respuesta presentada en el programa de ETAP, e investigar el método utilizado en el programa ETAP, ya que en el manual de usuario no presenta ninguna información sobre el método de cálculo para los potenciales superficiales.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE Std 80-1986 (1986). *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York.
- [2] IEEE Std 80-2013 (2013). *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York.
- [3] IEEE Std 81-2012 (2012). *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York.
- [4] IEEE Std 142-2007(2007). *Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. New York.
- [5] Robert J. Heppel (1979). "Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution". IEEE computer Sciences Corporation, Virginia.
- [6] Miguel de la Vega Ortega (2002). "Problemas de ingeniería de puesta a tierra". Grupo noriega editores, segunda edición, México, 2002.
- [7] Earling D. Sunde (1949). "Earth Conduction Effect in Transmission Systems". Bell Telephone Laboratories, New York, United States.
- [8] F. Dawalibi & D. Mukhedkar (Sept/Oct 1979). "Parametric Analysis of grounding grids". IEEE Transactions on power apparatus and systems vol. PAS-98, Quebec Canada.
- [9] Edward B. Rosa (September, 1907). "The self and mutual inductances of linear conductors". Bulletin of the Bureau of Standards Vol. 4, Washington, Estados Unidos.
- [10] George A. Campbell (October, 1923). "Mutual impedances of grounded Circuits". The Bell System Technical Journal.
- [11] Matthew N. O. Sadiku (2003). "Elementos de Electromagnetismo". Oxford University, Tercera edición, México.
- [12] Favio Casas-Ospina (2010). "TIERRAS Soporte de la Seguridad Eléctrica". Seguridad Eléctrica Ltda. Quinta Edición, Bogotá.
- [13] Walter Esaú Pérez, Christian Javier Serrano, & Oscar Orlando Surio (2015). "Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión". San Salvador: Universidad de El Salvador.
- [14] I.E. Esp. Jorge Humberto Sanz L. (2011). "Metodología para la construcción de un telurómetro de frecuencia variable". Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

- [15] Antonio Gonzales F. Dpto. de Física Aplicada III (2008). *“El método de las imágenes”*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- [16] Marco Tulio Calderón, Julio Cesar Pineda & Carlos Benjamín Puente (2001), *“Investigación de los valores de la resistividad en San Salvador, dependiendo del tipo de suelo”*. Universidad de El Salvador, San Salvador.
- [17] Operation Technology, Inc. (Marzo 2014). *“ETAP 12.6 User Guide”*. Southern California.
- [18] MATWORKS. *Functions - By Category*. [En línea]. [1994 - 2018]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/matlab/functionlist.html>
- [19] Willian Armando Miranda (Noviembre 2014). *“Métodos numéricos para ecuaciones diferenciales parciales”*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- [20] Luis Enrique Navarrete (Agosto 2008). *“Variables de entrada al proceso de diseño de pavimentos rígidos utilizando métodos mecanicistas”*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- [21] Rolando José Alvarado & Walter Alexander Cruz (Agosto 2006). *“Determinación del factor de modificación de respuesta para edificios diseñados con la norma técnica de diseño por sismo con sistema de marcos de concreto reforzado”*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- [22] José Miguel Codoñer (2011). *“Análisis de riesgos debidos al robo de cobre en instalaciones eléctricas en empresas”*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [23] AEMC INSTRUMENTS. Digital Ground Resistance and Soil Resistivity Tester 6471. User Manual. Disponible en: <https://www.aemc.com/userfiles/files/resources/usermanuals/Ground-Testers/6471EN.pdf>
- [24] Jaime Arriola & Jorge Rodríguez (Mayo 2016). *“Desarrollo de un simulador para el diseño de redes de tierra de subestaciones de potencia basado en el estándar IEEE 80-2000”*. San Salvador: Universidad de El Salvador.

## ANEXOS

### A.1 Fotos de las mediciones





## A.2 Modelado del terreno (Arreglo de Wenner)

Cuando se analiza el arreglo de Wenner, la resistividad aparente es graficada según el espaciamiento  $a$ , la curva resultante indica la estructura del suelo. Si el terreno posee múltiples capas puede ser complejo determinar el tipo de suelo y se obtiene las diferentes capas del terreno al analizar la curva resultante.

Los modelos de resistividad del suelo mayormente usados son los de suelo homogéneo y de dos capas. El modelo de dos capas es normalmente una buena aproximación si el terreno posee varias capas de resistividad. Modelos de suelos multicapas suelen emplearse para condiciones de suelo más complejas.

Un modelo de suelo uniforme u homogéneo puede ser usado sólo cuando hay una moderada variación en la resistividad aparente. Si hay una gran variación en la resistividad aparente medida, el modelo homogéneo es poco probable que produzca resultados precisos.

Una representación más aproximada de las reales condiciones del suelo puede obtenerse mediante el uso de un modelo de suelo de dos capas. El modelo de dos capas consiste de una capa superior de profundidad finita y con diferente resistividad que la capa inferior de profundidad finita.

En el método de Sunde [7], el gráfico mostrado en la Fig. A1 se utiliza para aproximar un modelo de suelo de dos capas. El gráfico de la Fig. A1, que se basa en los datos de prueba de 4 puntas del Wenner [2].

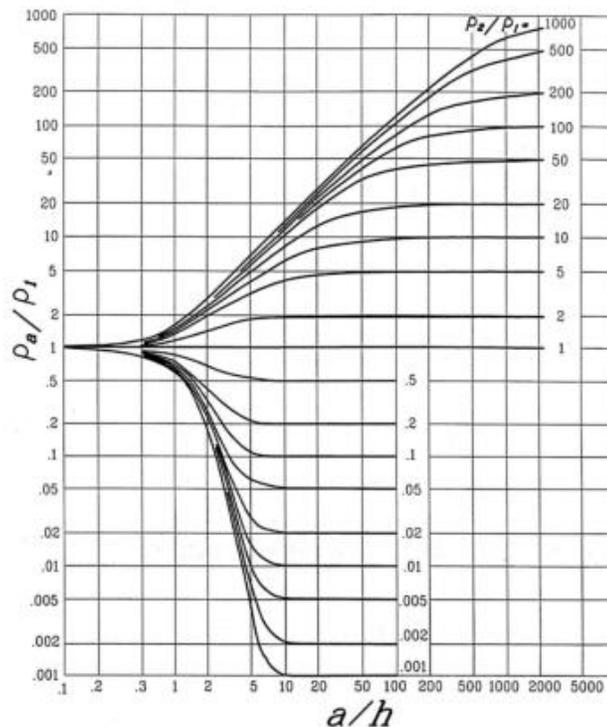


Fig. A 1: Gráfica para calcular la resistividad del suelo

Presentando valores medidos de resistividad en suelo de la Universidad de El Salvador, para determinar el tipo de suelo:

Espaciamiento "a" (m)	Resistencia mutua "R" ( $\Omega$ )	Resistividad aparente ( $\Omega.m$ )
1	22	122
2	8.12	92
3	4.33	73
4	1.22	62
5	0.72	72
6	0.51	79

Tabla 25: Datos de resistividad aparente medidos

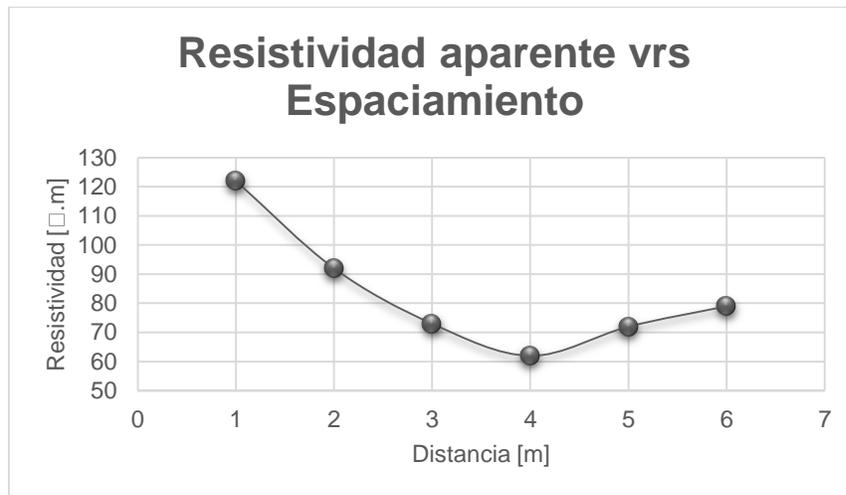


Fig. A2: Gráfico de Resistividad aparente vs Espaciamiento de a

La tendencia del gráfico de la Fig. A2, muestra que el suelo posee dos capas de resistividad en donde la capa superior es más resistiva que la capa inferior la cual se ubica aproximadamente a 3 o 4 metros de profundidad.

### A.3 Guía de usuario del programa

#### SECCION 1: PARA EMPEZAR

##### 1.1 Introducción

¡Bienvenidos al programa AS-PotencialesSuperficiales volumen 1! Este programa se realizó para proveer una herramienta computacional con un grado alto de exactitud para observar dentro de una red de tierra como se producen los potenciales superficiales. Y es basado en el método de imágenes y asume que el sistema de tierra es una estructura equipotencial. Da resultados exactos para redes de tierra pequeñas, medianas y grandes, para terrenos uniformes. Maneja configuraciones tanto regulares (mallas cuadradas y rectangulares) con separación uniforme entre cada malla.

##### 1.2 Acerca de AS- PotencialesSuperficiales vol.1.0

En el archivo llamado "Acerca de ..." se encuentra toda la información sobre el propósito, necesidad y proyecciones que se tienen con el programa AS- PotencialesSuperficiales vol.1.0. Además de explicar cuáles son las funciones implementadas dentro del programa.

### **1.3 Acerca del manual de usuario**

El manual te informará de todo lo que necesitas saber para utilizar el programa AS-PotencialesSuperficiales vol. 1.0. Se divide en tres secciones: “Para empezar” (que es la que estás leyendo), “Conceptos básicos,” que contiene toda la información necesaria para utilizar el programa junto a las limitantes que este posee y “Control de botones” donde se define como utilizar cada uno de los botones y funciones extras que posee el programa.

### **1.4 Requisitos del sistema**

El programa funciona con MATLAB específicamente con la app GUI (también conocidas como interfaces gráficas de usuario o interfaces de usuario) permiten un control sencillo (con uso de ratón) de las aplicaciones de software, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos a fin de ejecutar una aplicación.

Requisitos mínimos del sistema para MATLAB 2013a:

Sistema operativo: Windows XP SP3.

Memoria: 1 GB de memoria RAM pero se recomienda 2 GB.

Espacio en el disco duro: 3 - 4 GB de espacio libre en el disco duro.

Procesador: cualquier Intel o AMD x86.

Las funciones dentro del programa son archivos con terminación .m, por lo tanto, en el archivo acerca de... se documenta todas las funciones utilizadas para que se puedan utilizar en un entorno de programación como por ejemplo octave (software libre).

### **1.5 Instalación**

El archivo llamado ASSP.rar se debe descomprimir dentro de la carpeta de MATLAB ubicada en mis documentos. El archivo debe contener las siguientes funciones y documentos:

ASSP.Fig  
ASSP.m  
inicio.m  
crmut1.m  
simultaneo.m  
rpar.m  
rhor.m  
rmutua.m  
xmatriz.m  
ymatriz.m  
zmatriz.m  
voltaje.m  
grafcuad.m  
04113714.pdf  
MANUAL\_DE\_USUARIO.pdf  
ACERCADE.pdf

## 1.6 Como ejecutar el programa AS-PotencialesSuperficiales vol. 1.0 dentro del entorno MATLAB

Dentro del programa de MATLAB, el programa se puede ejecutar de tres formas diferentes además de presentar un error común que se explicara en este mismo apartado.

Lo primera forma es colocar en la ventana de comando de MATLAB la siguiente instrucción ASSP como se muestra en la Fig. A3.

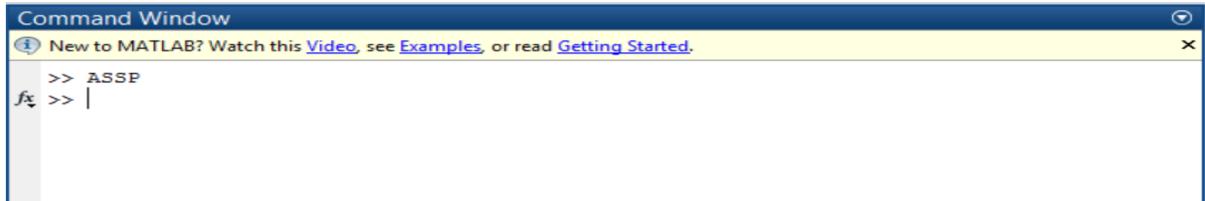


Fig. A3: Ejecutar el programa desde línea de comando de MATLAB

La segunda forma es abriendo el editor de archivos .m ya sea con la línea de comando con la instrucción edit ASSP.m o dando doble clic al archivo ASSP.m en la ventana de current files dentro del entorno de MATLAB.

En el editor solo se ejecuta el archivo dando clic en el botón run en la parte superior derecha en el menú editor como se muestra en la Fig. A4.

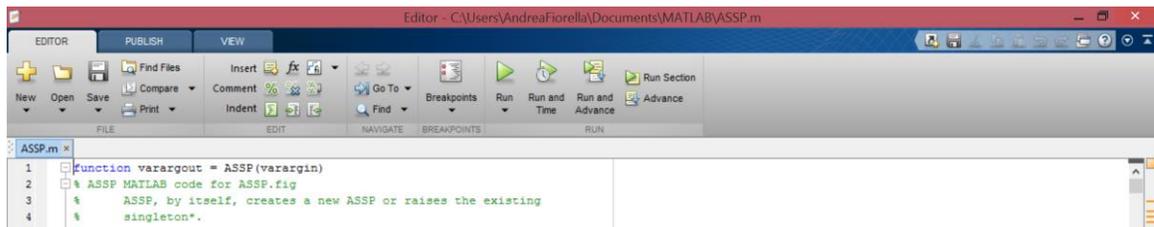


Fig. A4: Ejecutar el programa desde editor de archivos .m de MATLAB

La tercera forma de ejecución es colocar en la línea de comando de MATLAB el comando guide y en esta se debe abrir el archivo ASSP.Fig como muestra la Fig. A5.

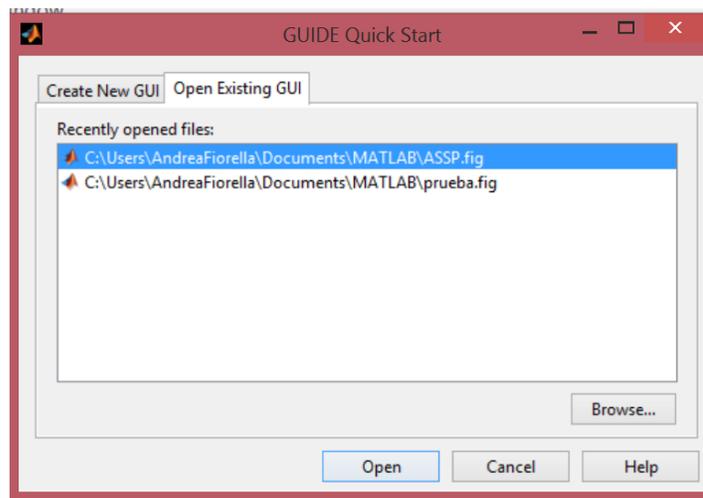


Fig. A5: Abrir el archivo desde la app GUIDE de MATLAB

Una vez seleccionado el archivo nos mostrara la interfaz gráfica del programa en su modo de edición en esta ventana solo debemos darle clic al botón verde en la parte superior derecha como se muestra en la Fig. A6.

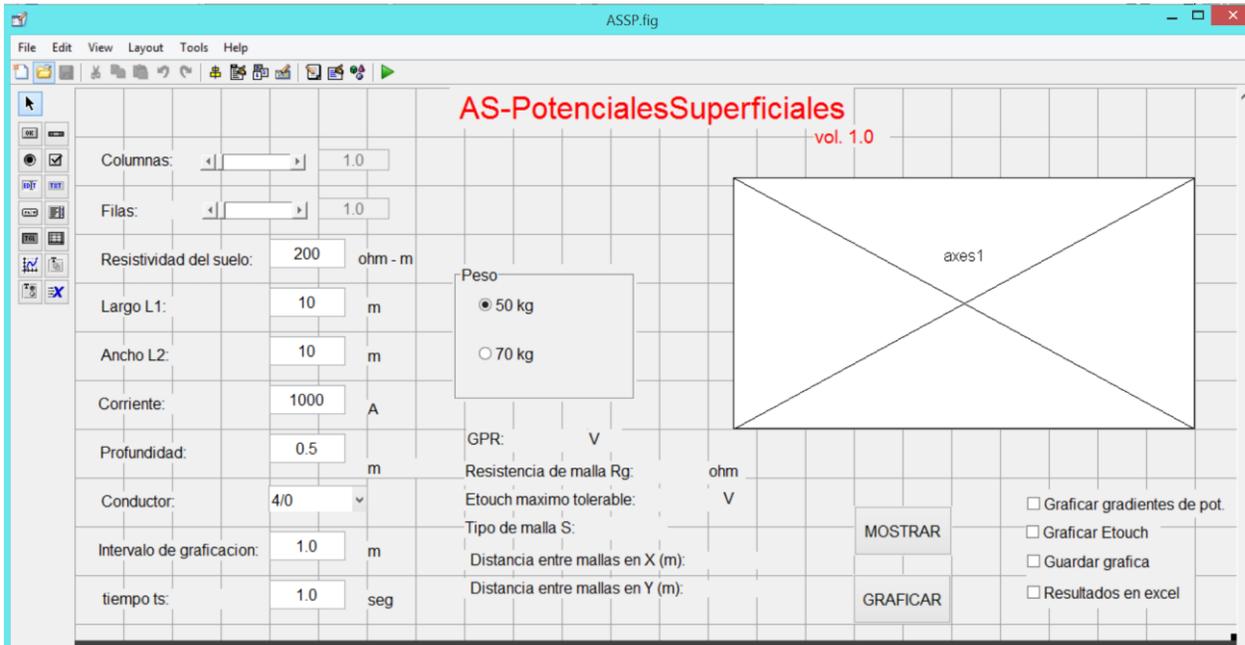


Fig. A6: Ejecutar el programa desde GUIDE de MATLAB

Uno de los errores que se pueden cometer al ejecutar el programa es abrir ASSP.Fig desde el current folder dentro del entorno de MATLAB, este ejecutara la interfaz de manera automática, pero al intentar cambiar cualquier valor dentro de ella presentara el próximo error.

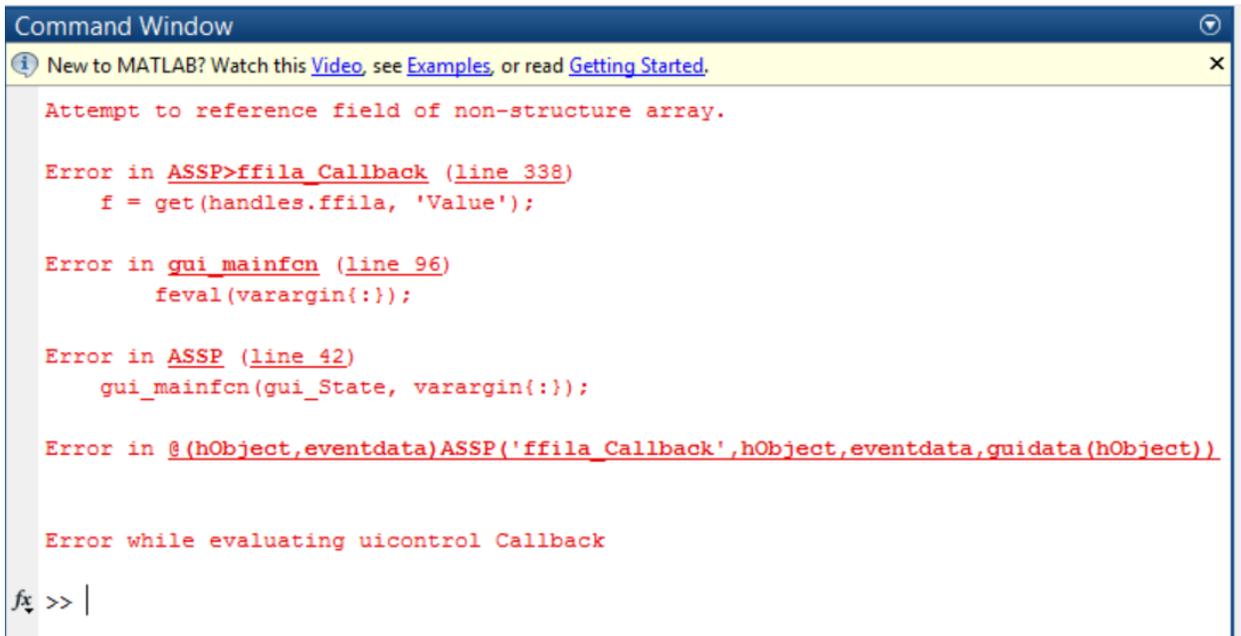


Fig. A7: Error al ejecutar el archivo ASSP.Fig

Este error no se puede corregir ya que se ha ejecutado solo una parte del archivo el ASSP.Fig y debe tener en paralelo ejecutándose el archivo ASSP.m. Por lo tanto, se debe cerrar el archivo y abrirlo con una de las formas explicadas anteriormente.

## **SECCION 2: CONCEPTOS BASICOS**

### **2.1 Introducción**

En esta sección se definen todos los conceptos básicos sobre redes a tierras y de los cuales se basa el programa, además de varias condiciones iniciales que el programa se ejecuta, además de presentar las limitaciones y posibles errores.

### **2.2 Conceptos de puesta a tierras implícitos dentro del programa**

**Puesta a tierra:** Un sistema, circuito o aparato dotado de una conexión a tierra, los efectos de establecer un circuito de retorno por tierra y para mantener su potencial aproximadamente al potencial de la tierra.

**Corriente de tierra:** Una corriente que entra o sale de la tierra o su equivalente que sirve como tierra.

**Electrodo de tierra:** Un conductor incrustado en la tierra y usado para recolectar la corriente de tierra, o la disipación de corriente de tierra hacia el suelo.

**Red de tierra:** Un sistema de electrodos de tierra interconectado arreglado en un patrón sobre un área específica y enterrado por debajo de la superficie del suelo.

**Elevación del potencial de tierra (GPR):** El potencial eléctrico máximo que un electrodo de tierra puede alcanzar respecto a un punto de conexión a tierra distante que se supone se encuentra el potencial de tierra remoto. Este voltaje, GPR, es igual a la corriente máxima de tierra, multiplicado por la resistencia de la red de tierra.

**Factor de decremento:** Un factor de ajuste que se utiliza junto con el parámetro de corriente de falla a tierra simétrica en los cálculos de tierra orientados a la seguridad.

**Corriente de falla asimétrica efectiva:** El valor RMS de la onda de corriente asimétrica, integrada en el intervalo de duración de la falla.

**Factor de división de corriente:** Un factor que representa la relación la inversa de la corriente de falla simétrica a la porción de la corriente que fluye entre la red de tierra y el suelo circundante.

**Material superficial:** Un material instalado sobre el suelo que consiste en, pero no limitado a, roca o piedra triturada, asfalto o materiales artificiales. El material superficial, dependiendo de la resistividad del material, puede afectar significativamente la corriente por el cuerpo para los voltajes de paso y de toque que involucran los pies de la persona.

**Voltaje de paso:** La diferencia en el potencial de la superficie que podría ser experimentada por una persona parada con los pies separados una distancia de 1 m sin contactar algún objeto conectado a tierra.

Voltaje de toque: La diferencia de potencial entre el incremento de potencial de tierra (GPR) de una cuadrícula o sistema de tierra y el potencial de superficie en el punto en que una persona puede estar de pie, mientras que, al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura conectada a tierra.

### 2.3 Concepto básicos del modelado de puestas a tierras

Un sistema de puesta a tierra debe ser instalado de manera que limitará el efecto de los gradientes de potencial de tierra a tales niveles de voltaje y corriente que no va a poner en peligro la seguridad de las personas o equipos bajo las condiciones normales y de falla. El sistema también debe ayudar a asegurar la continuidad del servicio.

Los conductores horizontales (cuadrícula) son más eficaces en la reducción del peligro de los altos voltajes de paso y de toque en la superficie de la tierra, a condición de que la red se instale a una profundidad superficial (por lo general de 0.3 m a 0.5 m por debajo del nivel del suelo)

En el programa se considera el uso de conductores horizontales de forma cuadrada y rectangulares a continuación en la Fig. A8 se muestra el ejemplo de un modelado de una malla de puesta a tierra S4. También cuales son las limitantes dentro de cada una de las variables.

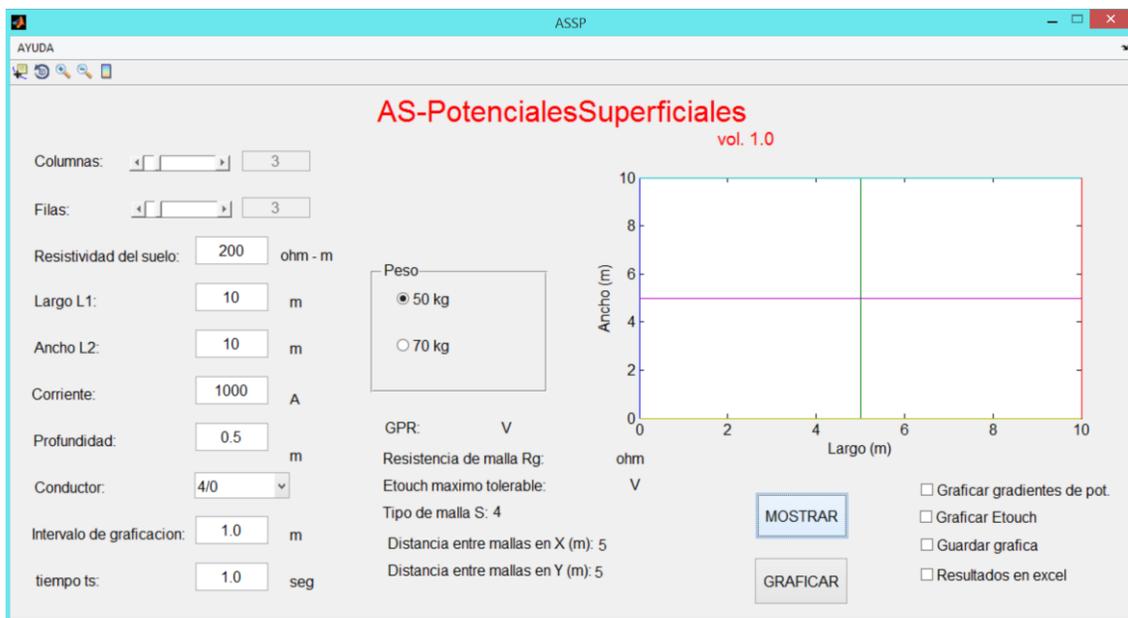


Fig. A8: Interfaz del programa AS-Potenciales Superficiales vol. 1.0

Para modelar una malla en el programa los datos que esta usa son los siguientes: Columnas y Filas: Estos parámetros se configuran moviendo la barra horizontal, el cuadro de texto a la par indica el valor de cuantas columnas o filas desea el usuario en la malla incluyendo las líneas de los extremos de las mallas de puesta a tierra. La combinación de estas dos variables nos dice el tipo de malla que uno desea implementar en el caso de la Fig. 6 se dibujó una malla S4 con 3 columnas y 3 filas. También si el valor de cualquiera de estas dos variables queda en el valor de 1, el programa se configura para mostrar una varilla.

Estos parámetros están configurados para llegar a un valor máximo de 21 en la combinación de ambos (filas y columnas), la malla de puesta a tierra máxima que acepta el sistema es una S400 se configuró de este modo porque para mallas más grandes el programa consume mayores recursos y se el tiempo de procesamiento son demasiados largos.

Largo L1 y Ancho L2: Estos dos parámetros los puede modificar el usuario para colocar el valor que se desee para el área que ocupara la malla de puesta a tierra. En la Fig. 6 se muestra una malla de 10 metros de largo por 10 metros de ancho. Para en el caso de la varilla el valor de L1 es el largo de la varilla y el diámetro se debe colocar en L2 ambas en metros.

Profundidad: Este parámetro es para modelar la profundidad en metros en la que se entierra toda la red. Por defecto el programa siempre coloca el valor de 0.5 metros de profundidad ya que ese valor generalmente se entierran las mallas.

Conductor: Este parámetro nos indica que tipo de conductor se desea colocar en la red dando a elegir entre los siguientes conductores y los diámetros de cada uno. El valor de los diámetros del conductor se usa tanto en el método de potenciales superficiales.

Calibre de conductor	Diámetro (mm)
4/0	11.58
3/0	10.38
2/0	9.36
1/0	8.25
2	6.54
4	5.18
6	4.11
8	3.26
10	2.59
12	2.05
14	1.62

Tabla 26: Calibre de conductor con su respectivo diámetro en mm

Tiempo  $t_s$ : Es la duración que la corriente eléctrica pasa a través de la malla o el tiempo en que una persona es sometida a un choque eléctrico.

Peso: criterio para calcular la corriente tolerable de la persona en base al peso de la persona según cual seleccione.

#### 2.4 Consideraciones para graficar los potenciales superficiales

Ahora los demás parámetros sirven para la configuración de los potenciales superficiales los cuales se presentan a continuación:

Resistividad del suelo: Este parámetro nos indica la propiedad que tiene el suelo, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno para

este programa solo toma en cuenta el suelo de una capa uniforme y esta medido en ohm por metro.

Corriente de cortocircuito  $I_{sc}$ : Este parámetro está definido por la siguiente ecuación.

$$I_{sc} = S_f C_p D_f (3 I_0)$$

Donde:  $I_{sc}$  es la corriente máxima que va circular en la malla.

$S_f$  Factor de división de corriente.

$C_p$  Factor de crecimiento del sistema.

$D_f$  Factor de decremento.

$(3 I_0)$  Valor rms de la corriente de falla a tierra.

Las consideraciones generales a tomar en cuenta se deben realizar de forma manual como lo indica la norma IEEE Std 80 – 2013, pero para facilidad se considera que la corriente de cortocircuito provocada a la subestación posee un factor de decremento (100%), significa la corriente asimétrica en los primeros intervalos de tiempo durante una falla. Un factor de división de corriente del 100 %, toda la corriente en la subestación se descarga sobre la puesta a tierra (no se divide la corriente por ningún cable de guarda o neutro dentro de la subestación.). Y un factor de crecimiento del sistema del 100%, que no se prevea que la subestación crezca en el tiempo.

Intervalo de graficación: Este parámetro indica dentro del área de la malla cada cuanto se debe tomar un punto en el proceso de graficar los potenciales superficiales. Para el caso de un varilla es de tener en cuenta este parámetro debido a que la varilla se colocara en el punto (0,0) y que la distancia en metros que el usuario designe es la distancia total que se presentara en la gráfica por ejemplo se coloca un metro el programa va interpretar que se quiere los resultados desde -1 metro hasta 1 tanto en el eje x como en el eje y.

Anteriormente se definió el termino de capa superficial en este programa no se considera el uso de este material porque se necesita el comportamiento de los potenciales superficiales en un suelo homogéneo.

## 2.6 Condiciones de error dentro del programa.

El programa valida todos los datos de las variables largo L1, Ancho L2, Corriente de cortocircuito  $I_{sc}$ , Profundidad y Paso de graficación para que sean números positivos. Mostrando mensajes de error para el caso que el usuario escriba un numero negativo dentro de algunas de las variables como lo muestra Fig. A8 y otro tipo de mensaje de error si el usuario escribe letras dentro de algunas de las variables como lo muestra la Fig. A9.



Fig. A9: Mensaje de error al colocar un numero negativo en las variables



Fig. A10: Mensaje de error al colocar letras en las variables

## 2.7 Conceptos mostrados en las respuestas del programa

Para este programa se usó el método de computación de voltajes superficiales asumiendo una distribución de corriente no uniforme desarrollado por: Robert J. Heppe, Senior Member, IEEE.

Este método utiliza el Método de Elementos Finitos para asumir la corriente de distribución no uniforme, el problema se divide naturalmente en dos partes: determinación de los valores de corrientes de fuga en segmentos de los conductores, y utilizando estas corrientes de fuga se utilizan los valores para calcular la tensión en cualquier punto deseado la superficie. Para mayor información sobre este método puede consultar el paper que se encuentra en el botón ayuda en la opción de paper sobre procedimiento o en la sección de funciones dentro del archivo acerca de.

Ahora en la Fig. A11 se muestra la misma malla S4 pero aplicando el método de graficar los potenciales absolutos ahora mostrado en la gráfica aplicando el método antes mencionado.

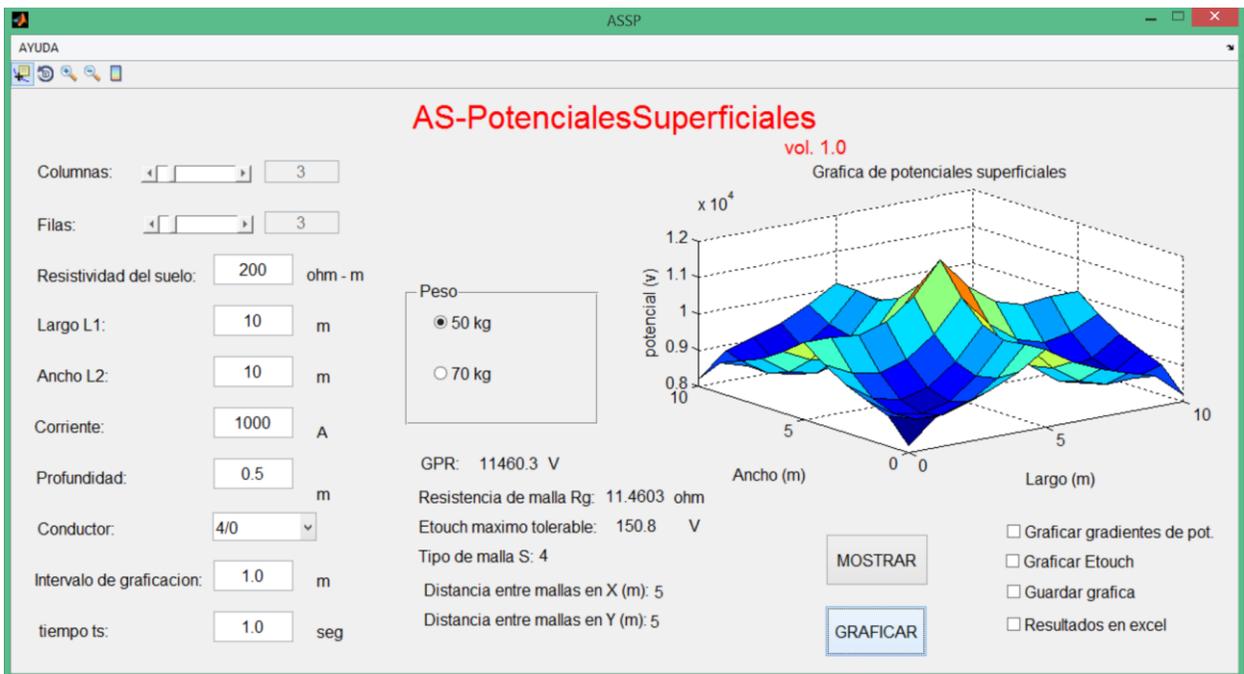


Fig. A11: Interfaz del programa AS-SurfaceVoltage vol. 1.0

En general, la resistencia de tierra de cualquier electrodo depende de la resistividad del suelo ( $\rho$ ) y el tamaño (Área A) y tipo de disposición de todos los conductores individuales

que comprenden el electrodo de tierra ( $L_t$ ) y la profundidad de la malla ( $h$ ). En disposiciones más complejas con alambres entrecruzados y un gran número de varillas en la misma área, la resistencia mutua entre elementos individuales juega un papel importante.

Para el cálculo de la  $R_g$  en el caso de malla horizontales se utiliza la ecuación de Sverak:

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

Y para el caso del cálculo de una varilla simple se ocupa la ecuación de Dwight expresada en la norma IEEE Std 142:

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

Donde  $L$  es la longitud de la varilla y el valor de  $a$  es el radio.

Las siguientes dos respuestas que presenta el programa son Distancia entre malla tanto en  $x$  como en  $y$  se refieren la distancia que se encuentra entre dos columnas o dos filas y esa distancia se repita para el resto de la puesta a tierra.

### SECCION 3: CONTROL DE BOTONES

#### 3.1 Introducción

En esta sección se explicará cual es el funcionamiento cada uno de los botones que posee el programa y las diferentes opciones que se pueden realizar. Además de explicar las funciones en la barra de herramientas en la parte superior.

#### 3.2 Botones y opciones principales

El programa consta de una selección de peso para el cálculo de voltaje de toque tolerable según el peso  $q$  se seleccione para activar esta opción se debe dar clic a una de las dos opciones  $q$  presenta el programa.

Además el programa AS-Surface Voltaje vol. 1.0 consta de dos botones para iniciar los dos procedimientos principales para los cuales fue realizado el programa. Los cuales se presenta en la siguiente Fig..

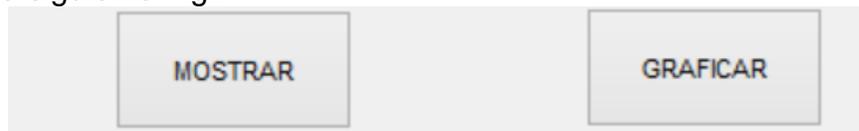


Fig. A12: Botones principales dentro del programa

Botón MOSTRAR: El fin de este botón es bosquejar la forma de la red de puesta a tierra en un gráfico 2D que el usuario desea conocer los potenciales superficiales.

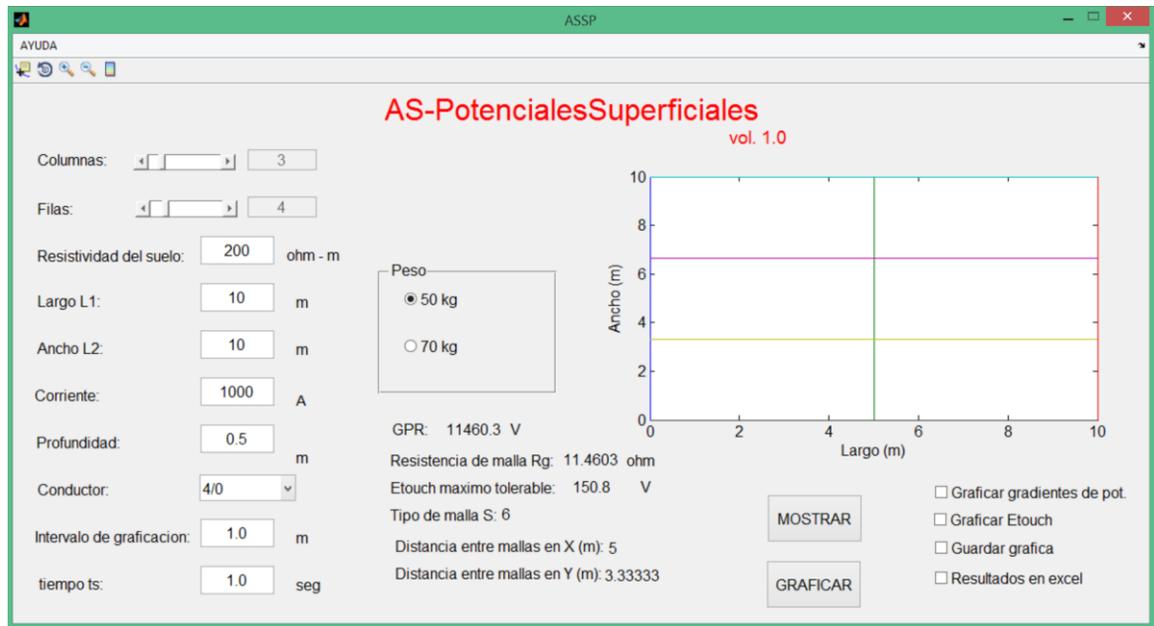


Fig. A13: Muestra del resultado con el botón MOSTRAR

En el espacio que posee el programa para mostrar graficas da como resultado una gráfica en 2D. Para este procedimiento se utilizan únicamente las variables de columna, fila, largo y ancho. Además de presentar las respuestas que le pueden ser útiles al usuario como son el tipo de malla y el distanciamiento entre mallas tanto en X como en Y. Se muestra un ejemplo del funcionamiento del botón mostrar en la Fig. A13 en la cual podemos observar que los datos son 3 columnas y 4 filas que producen un tipo de malla S6, con una distancia de largo de 10 metros y 10 metros de ancho. Y el ancho entre mallas de 5 metros y de largo entre mallas de 3.33 metros.

Para el caso de una varilla el botón de mostrar no funciona correctamente lo único que muestra es el tipo de malla aparecerá de respuesta "varilla". Además, ninguna de las opciones extra al costado del programa (Graficar, Guardar gráfica y Resultados en Excel) no interactúan con este botón.

Botón GRAFICAR: la finalidad de este botón es mostrar el resultado en una gráfica 3D de cómo se comportan los potenciales superficiales de una red de puesta a tierra elegida por el usuario.

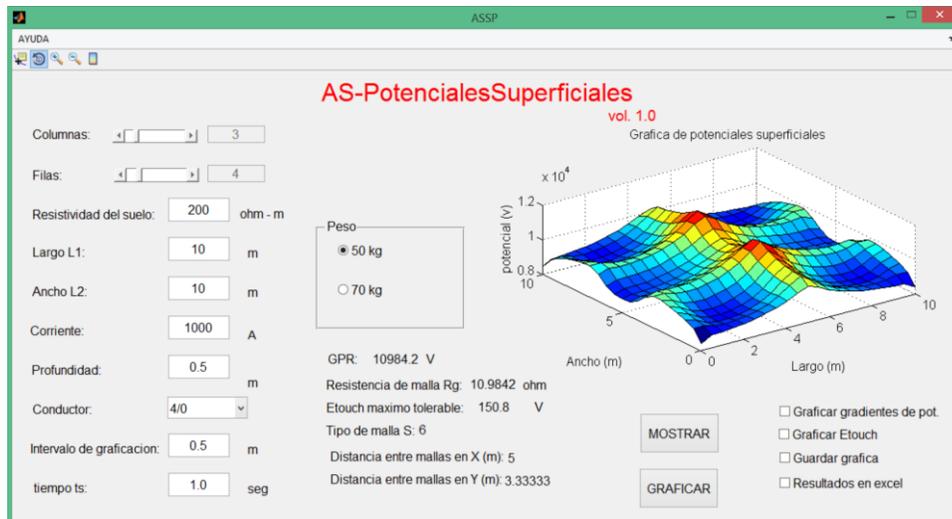


Fig. A14: Muestra del resultado con el botón GRAFICAR

En el espacio que posee el programa para mostrar graficas da como resultado una gráfica en 3D. Para este procedimiento se utilizan todas las variables de entrada. Además de presentar las respuestas que le pueden ser útiles al usuario como son resistencia de malla calculada con Sverak y el cálculo del GPR. Se muestra un ejemplo del funcionamiento del botón mostrar en la Fig. A14 en la cual podemos observar que los datos son 3 columnas y 4 filas que producen un tipo de malla S6, en la grafica se puede observar el comportamiento de los potenciales absolutos que presenta esta malla con una corriente de cortocircuito de 1000 A. Cada uno de los datos dentro de la malla se encuentran a 0.5 metros de distancia y presenta además dos resultados los cuales son una Resistencia de malla de 10.984 ohm y un GPR de 10,984 V.

Este botón funciona para cualquier caso desde una varilla ingresando correctamente los parámetros iniciales hasta una malla S400, Además, todas de las opciones extra al costado del programa (Graficar, Guardar gráfica y Resultados en Excel) solo interactúan con este botón ya que dependen de todo el proceso interno que se realiza.

Función extra Graficar pot. superficiales: Si el usuario selecciona esta opción a la hora de activar el botón principal GRAFICAR este desplegara una ventana extra, en la cual se presenta la misma grafica en 3D de resultado, pero con todas las opciones que posee MATLAB para el uso de gráficas y darle al usuario un mayor espacio visual a la respuesta de la red de puesta a tierra que el usuario desea conocerlos potenciales superficiales. A continuación, en la Fig. A15 se muestra la ventana resultado al seleccionar la opción Graficar pot. Superficiales.

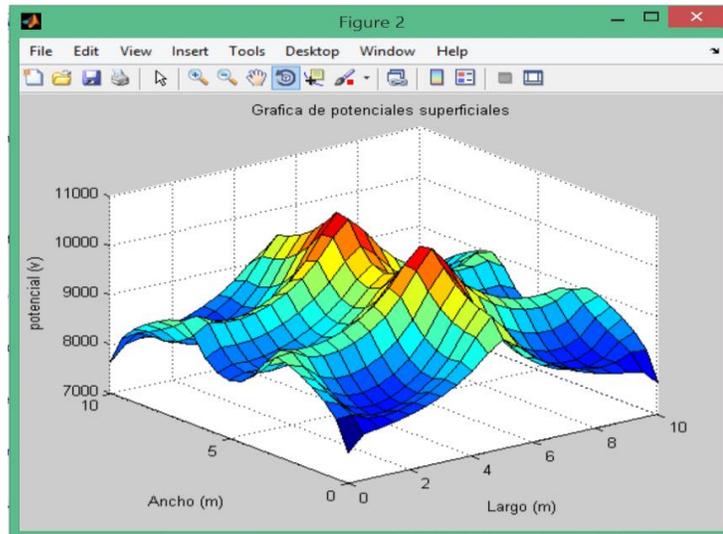


Fig. A15: Ventana de resultado de la opción Graficar pot. superficiales

Función extra Graficar  $E_{touch}$ : Si el usuario elige esta opción al activar el botón GRAFICAR esta desplegará una ventana extra, en la cual se presenta el resultado de una gráfica en 3D sobre el potencial de toque en el terreno, este apartado es el único dentro de este programa, pero los cálculos se basan en el potencial superficial obtenido anteriormente. Se muestra un ejemplo con la malla S6.

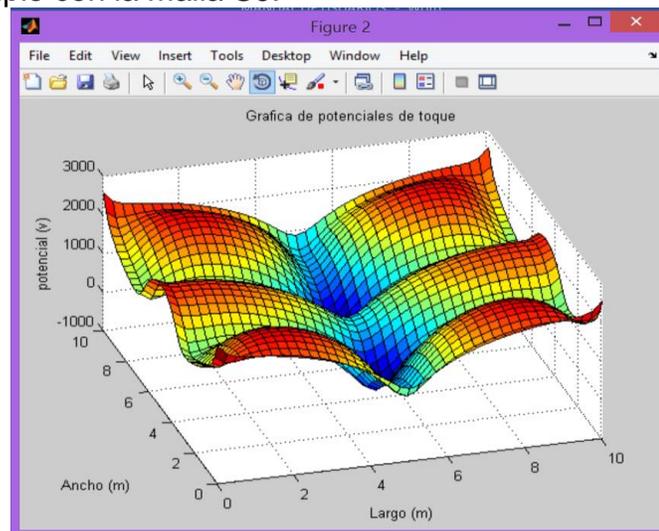


Fig. A16: Ventana de resultado de la opción Graficar  $E_{touch}$

Función extra Guardar Grafica: Si el usuario elige esta opción al activar el botón GRAFICAR en la carpeta donde se encuentren los programas (MATLAB en mis documentos por lo general) se creará un archivo llamado plot3D.jpg que dependiendo si no está activa la función Graficar guardará una imagen con la vista principal del programa mientras si tiene activado la función solamente guardará la imagen presentada en esa ventana. Como se muestra de ejemplo en la Fig. A17.

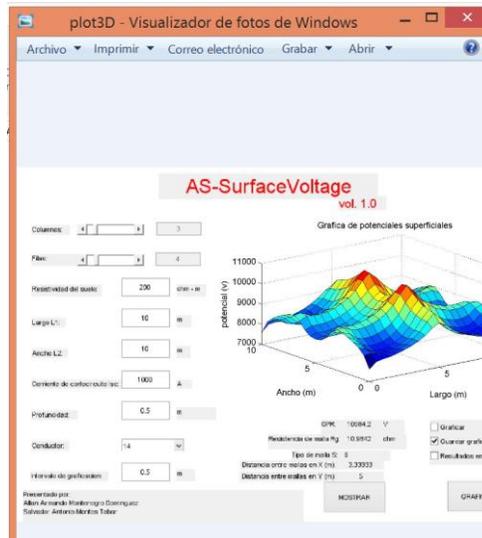


Fig. A17: Archivo plot3D.jpg

Se debe tener en cuenta que si se desea guardar varias imágenes se sugiere cambiarle nombre a cada uno de los archivos creados ya que el programa guarda todos los archivos con el nombre plot3D por lo tanto solo sustituye la imagen anterior.

Opción extra Resultados en Excel: Esta función también si se selecciona se activara cuando se active el botón GRAFICAR y esta crea un archivo de Excel llamado reportederesultados.xls en el cual se presenta la información siguiente: tipo de malla graficada, corriente de cortocircuito que se utilizó, cálculos de resistencia de la puesta a tierra  $R_g$  y GPR, los intervalos para graficar dentro de las mallas, los datos tomados en posición x y en posición y además de la matriz resultado con todos los puntos de potenciales superficiales. Así como se muestra en la siguiente Fig. A18:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Reporte sobre los potenciales calculados														
2															
3	tipo de malla														
4	6														
5	corriente de cortocircuito														
6	1000														
7	GPR														
8	10984.1588														
9	Resistencia de puesta a tierra														
10	10.9841588														
11	Intervalo de datos entre grafica														
12	0.5														
13	Datos utilizados en posicion x (largo)														
14	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
15	Datos utilizados en posicion y (ancho)														
16	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
17	Potenciales superficiales en posicion z (voltios)														
18	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
19	0	7617.47184	8201.53786	8476.26173	8663.33425	8815.5623	8942.23854	9005.07299	8798.58578	8435.91071	8232.71181	8171.70177	8232.71181	8435.91071	8798.58578
20	0.5	7921.03928	8230.75344	8352.48175	8488.92125	8645.50371	8831.13252	9043.92543	8986.59906	8584.94048	8338.07267	8263.48006	8338.07267	8584.94048	8986.59906
21	1	7976.4088	8090.65616	8085.53948	8170.95944	8327.74082	8560.90404	8876.4426	8932.66427	8570.29977	8322.70141	8245.2457	8322.70141	8570.29977	8932.66427
22	1.5	8030.07009	8058.46624	7985.90504	8038.12521	8193.42321	8453.39915	8818.35574	8926.36445	8594.40676	8357.12463	8281.57031	8357.12463	8594.40676	8926.36445

Fig. A18: Archivo generado en Excel

El archivo generado se guardará en donde se encuentren todos los archivos del programa (generalmente en la carpeta MATLAB en mis documentos). Se debe tener en cuenta que si se desea guardar varios archivos en Excel se sugiere cambiarle nombre a cada uno de los archivos creados o borrar el reporte anterior, ya que el programa guarda todos los

archivos con el nombre reportesderesultado por lo tanto solo sustituye las celdas anteriores.

Además, en este proceso es el que más tiempo se tarda la computadora por lo tanto los límites para generar estos archivos es que no se sobrepase la matriz resultado de una 200 x 200 datos mostrando el siguiente mensaje de error mostrado en la Fig. A19. Para corregirlo se sugiere que el usuario elija un intervalo para graficar más grande para que cumpla dicha condición.



Fig. A19: Mensaje de error al sobrepasar el límite de 200 datos para Excel

### 3.3 Opciones y menús secundarios dentro del programa

En este apartado se explicará cada una de las funciones secundarias que posee el programa los cuales se divide en el menú de ayuda y la barra de herramientas en la parte superior del programa.

Barra de herramientas y el menú de ayuda se muestran en la siguiente Fig. A20.

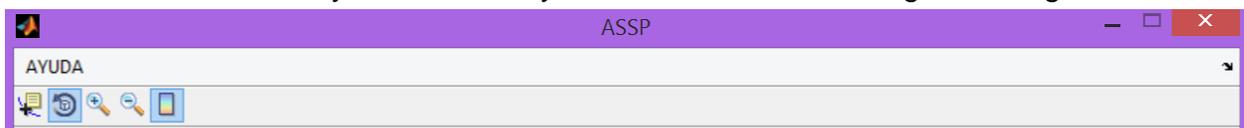


Fig. A20: barra de herramientas y menú de ayuda que dispone el programa

Empezando por la barra de herramientas de izquierda a derecha dispone de:  
cursor de datos: que al seleccionar un punto dentro de la gráfica esta va a mostrar un cuadro de dialogo con las coordenadas del punto seleccionado en su eje x y z.

Rotación: esta nos permite girar la gráfica en cualquier posición para que el usuario busque una forma en la que se mire o ajuste mejor la gráfica y ver el efecto de los potenciales.

Aumentar y disminuir el zoom: como su nombre lo indica para aumentar o disminuir (alejar) la gráfica.

Colorbar: esta función genera a la par de la grafica una barra con la representación de los valores de potencial en el eje z con los colores asignados, sirve para que el usuario se haga una idea que los colores dentro de las gráficas están definidos para ciertos valores de potencial.

El menú de ayuda

Al desplegar este menú se pueden observar tres opciones que se han hablado o sugerido a lo largo de este documento. La primera opción es el manual de usuario si el usuario da clic en esa opción lo mandara a este documento para consultar cualquier problema o duda que el usuario pueda consultar, la segunda opción redirige al usuario

a otro documento llamado acerca de ... donde se explica con cuales propósitos se crearon el programa los límites y furos proyectos además de una guía del funcionamiento paso a paso de cada una de las funciones dentro de este programa. Y la última opción redirecciona al usuario al paper llamado “computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution” que trata sobre el procedimiento matemático y ecuaciones utilizadas para realizar el programa.

### **A.3 Funciones dentro del programa**

Basándonos en el procedimiento descrito en el paper: “computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution” el problema se divide naturalmente en dos partes: determinación de los valores de corrientes de fuga en segmentos de los conductores, y utilizando estas corrientes de fuga se utilizan los valores para calcular la tensión en cualquier punto deseado la superficie.

Para ejecutar el programa en otro entorno se debe utilizar primero la función inicio.m descrita a continuación:

inicio.m

Esta función como su nombre lo indica es el inicio de todo el procedimiento para obtener los potenciales superficiales y básicamente su funcionamiento es de dividir conceptualmente la cuadrícula en segmentos y numerar los segmentos, números consecutivos para segmentos que pueden ser vistos por simetría para tener la misma corriente de fuga. Está definida de la siguiente forma:

$$[A, Mres, a, l, L11, L22, x, y] = inicio(\text{colum, fila}, L1, L2)$$

Donde se necesitan 4 parámetros de entrada los cuales son el número de filas y columnas que requiere el usuario para crear la malla, el largo L1 y el ancho L2 ambos parámetros en metros.

Lo primero que realiza son los cálculos de 4 respuestas que se utilizaran más adelante en el proceso, primero el cálculo de “l” que es la cantidad de conductor enterrado en la malla, siguiendo con el cálculo de “a” que sería el área total de todo a la red, ambos utilizados para el cálculo de resistencia de tierra siendo más fácil calcular en este punto ya que es la única parte que se utilizan las variables de entrada columna y fila. Y los cálculos de L11 y L22 que es la distancia que hay entre una malla tanto en posición x como en posición y ambos utilizados en partes del programa.

Los parámetros de salida “x” y “y” es donde se encuentra ubicada cada segmento según fila y columna se presentan como respuestas por si el usuario necesita graficar primero el tipo de malla necesaria.

La finalidad de la función inicio con los parámetros de entrada es: ubicar, clasificar y enumerar todos los segmentos en los que se divide la red de puesta a tierra e identificar son los segmentos que tienen la misma corriente.

La matriz respuesta “Mres” presenta 4 filas y el número total de columnas son la cantidad de segmentos que posee la red. Las cuatro respuestas son: la primera fila es el # de segmento, la segunda y tercera fila es donde se encuentra ubicado el segmento en un gráfico (x, y) tomando como el origen la esquina inferior izquierda de la malla y en el segmento solo tomando el punto de inicio la parte izquierda del segmento, y la cuarta fila presenta dos valores de respuestas los cuales pueden ser los números 104 para indicar que el segmento es horizontal y 118 para indicar que el segmento es vertical. Para esta parte del código toma en cuenta todos los posibles casos que puedan suceder entre mallas incluyendo casos especiales como lo pueden ser las mallas q contengan solo 2 filas o 2 columnas. A continuación, se presenta la respuesta de esta matriz con un ejemplo con una malla S4 de 10 metros de largo con 10 metros de ancho.

```

b =
  1     0     0    104
  2     0    10    104
  3     5     0    104
  4     5    10    104
  5     0     0    118
  6    10     0    118
  7     0     5    118
  8    10     5    118
  9     0     5    104
 10     5     5    104
 11     5     0    118
 12     5     5    118
  
```

Fig. A21: Matriz Mres con una malla S4

Para finalizar la matriz A empieza a ubicar cuantos son los segmentos que comparten la misma corriente dentro del método, la combinación de segmentos horizontales y verticales en una iteración del programa clasifica la cantidad de segmentos que comparten esa misma corriente, por ejemplo el caso de la malla S4 se conoce que tiene 2 tipos de corrientes distintas, la corriente en la orilla o perímetro de la malla y la segunda corriente en la cruz que se forma dentro de la malla, por lo tanto la matriz A como se muestra en la Fig. A22 nos indica que la primera corriente esta con los primeros 8 segmentos y la segunda corriente aplica para los 4 segmentos restantes.

```

a =
  1     8
  2     4
  
```

Fig. A22: Matriz A para una malla S4

Una vez obtenida la función inicio se debe proceder con la función crmut1 esta contiene otras 3 funciones necesarias en el programa para el cálculo de las resistencias mutuas las cuales son: rmutua, rhor y rpar todas estas funciones se explicarán a continuación:

crmut1.m

En esta función es el paso previo a encontrar los valores de corriente de fuga, en el paper se interpreta como encontrar los valores de resistencias mutuas dentro de la malla para resolver la ecuación como muestra la siguiente Fig. 3:

$$\begin{aligned}r_{11}i_1 + r_{12}i_2 + r_{13}i_3 + r_{14}i_4 &= v_1 \\r_{21}i_1 + r_{22}i_2 + r_{23}i_3 + r_{24}i_4 &= v_2 \\r_{31}i_1 + r_{32}i_2 + r_{33}i_3 + r_{34}i_4 &= v_3 \\r_{41}i_1 + r_{42}i_2 + r_{43}i_3 + r_{44}i_4 &= v_4\end{aligned}$$

Fig. A23: Ecuación a resolver para encontrar la densidad de corriente de fuga

En este conjunto de ecuaciones  $r_{ij}$  es la suma de resistencias mutuas que comparten el mismo tipo de corriente de fuga, y  $r_{jk}$  es la suma de la resistencia mutua entre una corriente de un segmento  $j$  y una corriente de segmentos  $k$ . Esta parte es la que realiza la función `crmut1` que está definida de la siguiente forma:

$$[vv, r] = \text{crmut1}(t, \text{mat}, l11, l22, \text{rho}, \text{prof}, d)$$

Los primeros cuatro valores de entradas ( $t$ ,  $\text{mat}$ ,  $l11$  y  $l22$ ) son respuestas obtenidas de la matriz inicio, mientras que  $\text{rho}$ ,  $\text{prof}$  y  $d$  son valores que el usuario debe designar en el diseño de la malla, siendo  $\text{rho}$  la resistividad del suelo ensuelas homogéneos y se encuentra en ohm por metro,  $\text{prof}$  es la profundidad a la que se encuentra la malla en metros y  $d$  es el diámetro del conductor utilizado en la malla definido en metros. Estos tres parámetros se utilizan en las funciones para el cálculo de resistencias mutuas.

En el caso de  $t$  es la matriz  $A$  de la función inicio definida para ver cuales segmentos comparten el mismo tipo de corriente y la variable  $\text{mat}$  es la matriz respuesta  $M_{res}$  definida anteriormente.

Ahora esta función primero selecciona el primer segmento de todos los segmentos por el mismo tipo de corriente siendo esta la primera columna dentro de la matriz respuesta  $r$  y los empareja con el resto de los segmentos de las mallas siendo la segunda columna, una vez obtenido los emparejamientos con la información contenida en la matriz  $M_{res}$  obtenemos el cálculo de resistencia mutua, el programa sabe identificar qué tipo de resistencia mutua debe realizar en cada emparejamiento siendo tres posibilidades: la auto resistencia, la resistencia mutua entre segmentos paralelos y la resistencia mutua entre segmentos perpendiculares, esta es la tercera columna de la matriz respuesta  $r$ . Se muestra parte del procedimiento que realiza el programa con una malla S4 en la siguiente Fig. A24.

```

>> rr
rr =
    1.0000    1.0000   14.5981
    1.0000    2.0000    0.7791
    1.0000    3.0000    2.0863
    1.0000    4.0000    0.7058
    1.0000    5.0000    2.6165
    1.0000    6.0000    1.0208
    1.0000    7.0000    1.0209
    1.0000    8.0000    0.7566
    1.0000    9.0000    1.4787
    1.0000   10.0000    1.1369
    1.0000   11.0000    2.6165
    1.0000   12.0000    1.0209
    9.0000    1.0000    1.4787
    9.0000    2.0000    1.4787
    9.0000    3.0000    1.1369
    9.0000    4.0000    1.1369
    9.0000    5.0000    2.6165
    9.0000    6.0000    0.7566
    9.0000    7.0000    2.6165
    9.0000    8.0000    1.0208

```

Fig. A24: Matriz r, Cálculo de resistencias mutuas

Una vez encontradas las resistencias con la matriz t de entrada, se puede conocer cuántos segmentos contiene por cada tipo de corriente y sumar las resistencias mutuas de la matriz anterior, creando una matriz respuesta vv que contiene las resistencias mutuas r<sub>jj</sub> y r<sub>jk</sub> que se deben utilizar en la ecuación matricial presentada en la Fig. A23. A continuación se presenta la respuesta para una malla S4.

```

s =
    23.5841    6.2529
    12.2415   20.3218

```

Fig. A25: Suma de resistencias mutuas para poder encontrar las corrientes por segmento

rhorr.m

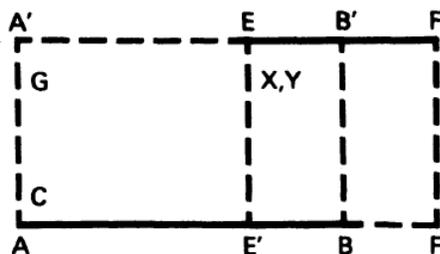


Fig. A26: Resistencia mutua entre dos segmentos paralelos

Esta función es la encargada de calcular la resistencia mutua entre dos segmentos paralelos, ya sea que se encuentren a una distancia colineal o no colineal. Se encuentra definida de la siguiente forma:

$$[rh] = \text{rhorr}(\text{rho}, x, y, l1, l2, \text{prof})$$

Para calcular la resistencia entre segmentos paralelos (rh), los datos de entrada de esta función son la resistividad del suelo (rho), donde se encuentra ubicado el segundo segmento en posición x y en posición y, la longitud del primer segmento (l1) y del segundo segmento (l2) y la profundidad donde se encuentra la malla (prof), utilizando la ecuación definida en el paper para el cálculo de M se utiliza la ecuación 1 presentada a continuación:

$$\begin{aligned}
 M = & L_1 \ln \frac{\sqrt{(x + L_2 - L_1)^2 + W^2} + x + L_2 - L_1}{\sqrt{(x + L_2)^2 + W^2} - (x + L_2)} \\
 & + (x + L_2) \ln \frac{\sqrt{(x + L_2 - L_1)^2 + W^2} - (x + L_2 - L_1)}{\sqrt{(x + L_2)^2 + W^2} - (x + L_2)} \\
 & - x \ln \frac{\sqrt{(x - L_1)^2 + W^2} - (x - L_1)}{\sqrt{(x)^2 + W^2} - x} - \sqrt{(x - L_1)^2 + W^2} \\
 & - \sqrt{(x + L_2)^2 + W^2} + \sqrt{(x + L_2 - L_1)^2 + W^2} + \sqrt{x^2 + W^2}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde:  $W^2 = y^2 + z^2$

Después utilizando la ecuación 2 para el cálculo de la resistencia mutua para encontrar la resistencia mutua se deben encontrar dos valores de R, para permitir el efecto de la superficie: el valor para los dos cables en sí, y la mutua resistencia entre un cable y la imagen del otro. Para el caso de cables coplanares se encuentra R con  $z = 0$ , y otra vez con  $Z = 2D$ , donde D es la profundidad donde se encuentra enterrado el conductor.

$$R = \frac{M\rho}{4\pi L_1 L_2} \tag{2}$$

rpar.m

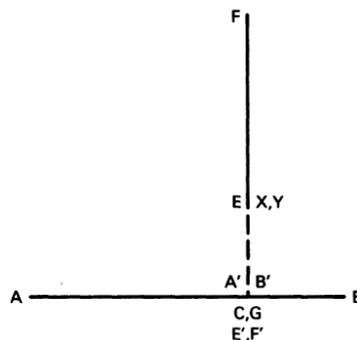


Fig. A27: Resistencia mutua entre dos segmentos perpendiculares.

Esta función es la encargada de calcular la resistencia mutua entre dos segmentos perpendiculares. Se encuentra definida de la siguiente forma:

$$[rp] = rpar(\rho, x, y, l1, l2, prof)$$

Para calcular la resistencia entre segmentos perpendiculares (rp), los datos de entrada de esta función son la resistividad del suelo (rho), donde se encuentra ubicado el segundo segmento en posición x y en posición y, la longitud del primer segmento (l1) y del segundo segmento (l2) y la profundidad donde se encuentra la malla (prof), utilizando la ecuación definida en el paper para el cálculo de M se utiliza la ecuación 1 presentada a continuación:

$$\begin{aligned}
 M = & (L_1 - x) \ln \frac{\sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} + L_2 + y}{\sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2} + y} \\
 & + x \ln \frac{\sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} + L_2 + y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + y} \\
 & + (L_2 + y) \ln \frac{\sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} + L_1 - x}{\sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} - x} \\
 & - y \ln \frac{\sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2} + L_1 - x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - x} - |U|
 \end{aligned} \tag{3}$$

Donde U =0, si z=0 y si z ≠ 0 la expresión de U queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 U = z \left[ \tan^{-1} \left( \frac{(L_1 - x)(L_2 + y)}{z\sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{(L_1 - x)y}{z\sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2}} \right) \right. \\
 \left. - \tan^{-1} \left( \frac{-x(L_2 + y)}{z\sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{-xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

Para encontrar el valor de la resistencia mutua se utiliza la ecuación 2 de la misma forma que se explico para el caso anterior.

rmutua.m

Para este último caso esta función hace el cálculo de resistencia mutua que produce un solo segmento esta definido de la siguiente forma:

$$[rm] = rmutua(\rho, l, d, \text{prof})$$

Para calcular la resistencia mutua de un mismo segmento, se utiliza los siguientes variables de entrada: resistividad del suelo (rho), la longitud del segmento (l), el diámetro del conductor enterrado en la red de puesta a tierra (d), y la profundidad donde se encuentra (prof), Utilizando la ecuación 5 para el cálculo, esta ecuación ya incluye el efecto de la resistencia propia y la de la imagen.

$$\begin{aligned}
 R_{jj} = \frac{\rho}{2\pi L^2} \left[ L \ln \left( \frac{\sqrt{L^2 + a^2} + L}{a} * \frac{\sqrt{L^2 + a^2 + 4D^2} + L}{\sqrt{a^2 + 4D^2}} \right) + a + 2\sqrt{a^2 + 4D^2} \right. \\
 \left. - \sqrt{L^2 + a^2 + 4D^2} - \sqrt{L^2 + a^2} \right]
 \end{aligned} \tag{5}$$

Una vez obtenida la matriz de resistencias como se muestra en la Fig. 3 se procede a entrar en un proceso de simultaneo de ecuaciones para encontrar los diferentes tipos de corriente dentro de la malla utilizando la siguiente función:

simultaneo.m

Esta función como se menciona anteriormente encuentra los diferentes tipos de corriente resolviendo la matriz además de encontrar dos parámetros los cuales son el GPR y el cálculo de la resistencia de tierra, está definida de la siguiente forma:

$$[r,v,b] = \text{simultaneo}(\text{rho},d, i, l, A, \text{prof})$$

Donde los parámetros de entrada están definidos de la siguiente forma: resistividad del suelo ( $\rho$ ), el área de todo el terreno obtenido en la función inicio ( $A$ ), profundidad donde se encuentra la red de puesta a tierra ( $\text{prof}$ ), la cantidad de cable enterrado ( $l$ ) también obtenido en la función inicio, la corriente de cortocircuito que va a pasar en toda la red de puesta a tierra ( $i$ ), y la matriz de resistencias mutuas ( $d$ ) obtenida en la función  $\text{crmut1}$ . Con los parámetros de salida  $v$  que es el cálculo del GPR que es la corriente de cortocircuito por la resistencia de la red de puesta a tierra  $R_g$ , para calcular esta resistencia se utiliza la ecuación de Sverak presentada en la norma IEEE Std 80, siendo esta resistencia de puesta a tierra ( $b$ ) otro de los valores de salida de esta función.

$$R_g(h) = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} + \left( 1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (6)$$

Donde:

$h$  = Profundidad de entierro de la malla en metros

$A$  = Area de la malla en  $\text{m}^2$

$L$  = Longitud total de conductor en metros.

Para encontrar la matriz resultado ( $r$ ) de las corrientes se debe resolver el sistema de ecuaciones, colocando en el valor de voltaje en la matriz el valor de GPR encontrado anteriormente, para resolver este sistema de ecuaciones, la matriz de resistencia mutuas se debe obtener la matriz inversa y por medio de una multiplicación de matrices con la matriz de GPR se obtienen la matriz resultado de corrientes.

```

q =
    101.3002
     81.6702

>> v

v =
    2.8997e+03

>> r

r =
    2.8997

```

Fig. A 28 Respuesta de matriz de corriente (q), GPR (v) y resistencia de puesta a tierra (r) para una malla S4.

Funciones xmatriz y ymatriz su finalidad es obtener todos los puntos dentro del área designada por el usuario, tanto para el eje x, como para el eje y además funcionan de la siguiente manera:

$$[xvec]= xmatriz(L1,L2, t)$$

Donde las variables de entrada son la longitud total de la malla (L1), el ancho total que tendrá la malla (L2), y el intervalo entre los puntos que se desea obtener. Presentando de respuesta una matriz que más adelante se usa para poder graficar los potenciales superficiales.

zmatriz.m

esta es la función final del proceso para calcular los potenciales superficiales en esta se definen como en el caso anterior una matriz de resultado con el mismo tamaño de las matrices anteriores, pero en cada uno de los puntos se realiza el proceso de cálculo de voltaje superficiales utilizando la función voltaje.m se encuentra definida de la siguiente forma:

$$[zvec]= zmatriz(L1, t, i, d, x, y, rho, prof, s, L11, L22, L2)$$

Donde las variables de entradas son el largo y ancho de toda la malla (L1 y L2) además las distancias entre las mallas tanto en el eje x como en el eje y (L11 y L22), la resistividad del suelo (rho), profundidad (prof), las matrices con todos los puntos que se desean graficar y obtenidas de las funciones xmatriz y ymatriz (x, y), la matriz de los diferentes tipos de corrientes obtenida en la función simultaneo (i), el intervalo para graficar los puntos dentro de la red de puesta a tierra (t), la posición de todos los segmentos dentro de la malla (d) y la cantidad de segmentos por cada uno de los tipos de corrientes obtenida en la función inicio (s). La respuesta que presenta esta función es una matriz con las mismas dimensiones que las obtenidas en xmatriz, ymatriz solo que dentro de esta se encuentra el cálculo de los potenciales superficiales para cada uno de los puntos dentro de la red de puesta a tierra.

voltaje.m

Esta función es la que se encuentra dentro de zmatriz.m y utilizando las corrientes de fuga se utiliza los valores para calcular la tensión en cualquier punto deseado la superficie se encuentra definida de la siguiente forma:

$$[v] = \text{voltaje}(i, d, x, y, \rho, \text{prof}, s, L11, L22, L2)$$

Donde las variables de entradas son el largo y ancho de toda la malla (L1 y L2) además las distancias entre las mallas tanto en el eje x como en el eje y (L11 y L22), la resistividad del suelo ( $\rho$ ), profundidad (prof), la matriz de los diferentes tipos de corrientes obtenida en la función simultaneo (i), la posición de todos los segmentos dentro de la malla (d) y la cantidad de segmentos por cada uno de los tipos de corrientes obtenida en la función inicio (s) y el punto donde se desea encontrar el potencial superficial (x,y).

Para obtener el voltaje de superficie en cualquier punto deseado se puede encontrar por superposición, sumando las contribuciones de todos los segmentos presentes dentro de la malla, la ecuación a utilizar:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + D^2} + x}{\sqrt{(x-L)^2 + y^2 + D^2} + x - L} \quad (7)$$

Donde  $p$  es la resistividad del suelo (asumiendo suelo homogéneo) y  $D$  es la profundidad. Un sistema de coordenadas en la que el eje  $x$  se encuentra sobre la superficie por encima y paralelo al segmento, con el origen sobre el extremo izquierdo del segmento, y el eje  $y$  es horizontal y perpendicular al eje  $x$ . Las cantidades  $x$  e  $y$  son las coordenadas de la superficie punto en este sistema.