



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA  
EXISTENTE EN LA SUBESTACIÓN TOVAR 115/34,5/13,8 kV**

Br. María Geraldine Cerrada Peña.

C.I. 20.406.925

**MÉRIDA, NOVIEMBRE, 2017**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA  
EXISTENTE EN LA SUBESTACIÓN TOVAR 115/34,5/13,8 kV**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero  
Electricista

Br. María Geraldine Cerrada Peña

Tutor: Jean Carlos Hernández Mejía, Ph.D.

**MÉRIDA, NOVIEMBRE, 2017**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA**  
**EXISTENTE EN LA SUBESTACIÓN TOVAR 115/34,5/13,8 kV**

**Br. María Geraldine Cerrada Peña**

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado.

---

**Prof. Jesús A. Velazco**

**Jurado**

---

**Prof. Ernesto Mora**

**Jurado**

---

**Prof. Jean C. Hernández**

**Tutor**

## DEDICATORIA

**A Dios todo Poderoso, con él TODO sin él  
nada.**

*A mis padres María y Mario, gracias por el  
apoyo que me han dado en cada momento de mi vida.*

*A mis hermanos, por ser motivo de inspiración  
para lograr esta meta de mi vida.*

*Lo hemos logrado, contra viento y marea...!!*

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## AGRADECIMIENTO

Le agradezco primeramente a Dios por permitirme vivir esta etapa universitaria, tal y como fué, valió la pena cada sacrificio y dificultad; culminó esta etapa llena de satisfacción por los conocimientos adquiridos, por los momentos vividos y por los amigos que he cosechado durante este largo camino.

A mis padres y hermanos, por no dejarme sola en los momentos difíciles y de debilidad; gracias por su apoyo tanto económico como espiritual. En especial a mi madre que supo darme aliento en esos momentos donde quería abandonarlo todo. Los amo familia y son mi tesoro más resguardado.

A la ilustre Universidad de Los Andes, gracias al personal docente, administrativo y obrero, por formarme como profesional y fortalecer los valores morales que todo ciudadano debe tener. Gracias por ser mi segunda casa.

A la empresa CORPOELEC, por la colaboración de los técnicos, operadores e ingenieros para la realización de este trabajo de grado y, por los conocimientos que me cedieron en el campo laboral. Me enseñaron lo importante que es una buena comunicación con su equipo de trabajo para proteger la vida de cada persona.

A mi novio, por su apoyo, paciencia y comprensión en cada momento.

A mis amigos y compañeros de clase, por su colaboración y socorro durante la carrera.

A TODOS GRACIAS..!!

Atte: María Cerrada.

**Br. María G. Cerrada P. Estudio y Evaluación de la Malla de Puesta a Tierra Existente en la Subestación Tovar 115/34.5/13.8 kV.** Universidad de Los Andes. Tutor: Prof. Jean C. Hernández M. Mérida, Noviembre 2017.

## RESUMEN

El presente trabajo en primer lugar tiene como finalidad realizar una evaluación de la malla de tierra la subestación Tovar existente desde hace aproximadamente cuatro décadas, donde se han realizado diferentes modificaciones de la malla debido a el aumento de la capacidad de la subestación. Se procedió a realizar un análisis del suelo, donde se eligió el método de cuatro puntos en su configuración Wenner (Método de Wenner), para obtener mediante unas medidas realizadas dentro de la subestación la resistencia del terreno y luego calcular mediante fórmula la resistividad aparente del terreno.

Luego, los datos obtenidos de la resistividad del terreno fueron introducidos en el módulo de análisis del suelo del programa CYMGRD para su respectivo estudio. Gracias a una búsqueda del plano de la malla de tierra inicial y los planos de las posteriores ampliaciones de la malla, se introdujeron en el programa para efectuar un análisis de la malla y, así calcular la resistencia del sistema de puesta a tierra, la elevación del potencial de tierra (GPR) y los gradientes de potencial en la superficie del terreno; los resultados arrojados muestran tensiones peligrosas en toda el área de subestación, permitiendo así a plantear el rediseño de la malla de puesta a tierra existente en la subestación, en la cual se modelaron ampliaciones anexando conductores de manera simétrica para una mejor distribución de las corrientes al momento de una falla. Por medio del rediseño planteado se lograron bajar las tensiones de malla considerablemente y disminuir la resistencia de puesta a tierra.

**Descriptor:** Método de Wenner, Resistividad Aparente, Elevación del Potencial de Tierra, Gradientes de Potencial, Malla de Tierra.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS.....</b>	<b>xi</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>3</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 EL PROBLEMA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3.1 Objetivo General .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 METODOLOGÍA.....</b>	<b>6</b>
<b>1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES .....</b>	<b>6</b>
<b>1.5.1 Alcances.....</b>	<b>6</b>
<b>1.5.2 Limitaciones .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>8</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 SISTEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA EN SUBESTACIONES. ....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 FUNCIONES DE LA MALLA DE TIERRA.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3 PRINCIPALES CONSIDERACIONES DEL DISEÑO. ....</b>	<b>10</b>
<b>2.4 ASPECTOS BÁSICOS EN EL DISEÑO DE LA MALLA: .....</b>	<b>12</b>
<b>2.5 ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA: .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.1 Electrodo: .....</b>	<b>14</b>

2.5.2 Electrodo Horizontal.....	14
2.5.3 Electrodo vertical.....	14
2.5.4 Conectores y accesorios.....	15
<b>2.6 FACTORES CONSIDERADOS EN EL DISEÑO.....</b>	<b>16</b>
2.6.1 Resistividad y características del terreno.....	16
2.6.2 Medidas de resistividad.....	18
2.6.3 Recomendaciones para la medición en campo.....	20
2.6.4 Resistividad y espesor de La Capa de la Piedra Picada.....	22
2.6.5 Corrientes máximas de cortocircuito a tierra.....	25
2.6.6 Selección del conductor y las uniones.....	27
<b>2.7 EFECTO DE LA CORRIENTE EN EL CUERPO HUMANO.....</b>	<b>29</b>
<b>2.8 SITUACIONES DE RIESGO EN LAS INMEDIACIONES DE UN SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRA (SCT).....</b>	<b>31</b>
2.8.1 Voltaje de Paso.....	32
2.8.2 Voltaje de Toque.....	33
2.8.3 Criterios de voltajes de toque y de contacto.....	34
2.8.4 Perfiles de Voltaje.....	35
<b>2.9 RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....</b>	<b>36</b>
<b>2.10 PROGRAMA CYMGRD PARA ANÁLISIS DE REDES DE TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.....</b>	<b>37</b>
2.10.1 Módulo Análisis del suelo.....	37
2.10.2 Módulo Análisis de Malla.....	38
2.10.3 Módulo de Graficado.....	39
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>39</b>
<b>DESCRIPCIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA EXISTENTE EN LA SUBESTACIÓN TOVAR.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 DESCRIPCIÓN DE LA SUBESTACIÓN TOVAR.....</b>	<b>39</b>
3.1.1 Ubicación de la Subestación Tovar.....	39
3.1.2 Áreas servidas.....	41
3.1.3 Impacto.....	42
3.1.4 Diagrama Unifilar.....	42
3.1.5 Niveles de tensión.....	43

3.2 MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN TOVAR.....	44
CAPÍTULO IV.....	45
ANÁLISIS DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA. ....	45
4.1 ANÁLISIS DEL SUELO.....	45
4.2 PARÁMETROS DE CORTOCIRCUITO EN LA SUBESTACIÓN TOVAR. ....	50
4.3 ANÁLISIS DE LA MALLA DE LA SUBESTACIÓN TOVAR. ....	51
4.3.1 Diagramas de Contorno de Potencial de Contacto y Superficie, S/E Tovar.....	54
CAPÍTULO V.....	60
PROPUESTA DE MEJORA A LA MALLA DE TIERRA DE LA SUBESTACIÓN TOVAR.....	60
5.1 MEJORA A LA MALLA.....	60
5.2 VERIFICACIÓN DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR .....	63
5.3 ANÁLISIS DE LA MALLA.....	64
5.3.1 Diagrama de Contorno de Potencial de Contacto. ....	66
5.3.2 Diagrama de Contorno de Potencial de Superficie. ....	68
5.3.3 Diagrama de Perfil de Potencial. ....	70
5.4 COMPARACIÓN DE SEGURIDAD ENTRE LA MALLA ACTUAL Y LA PROPUESTA. ....	72
CONCLUSIONES .....	75
RECOMENDACIONES.....	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78
ANEXOS .....	80
Anexo 1: Tabla de las constantes de los materiales (IEEE80-2000).....	81
Anexo 2: Características físicas, mecánicas y eléctricas de los conductores. ....	81
Anexo 3: Coordenadas de conductores dispuestos en la mejora de la malla de puesta a tierra de la S/E Tovar. ....	82
Anexo 4: Coordenadas de las barras Copperweld de la malla existente. ....	83
Anexo 5: Coordenadas de las barras Copperweld de la mejora de la malla existente..	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2. 1 Tipos de conexión [2].</b> .....	<b>15</b>
<b>Figura 2. 2. Equivalencia de la resistividad del terreno [6].</b> .....	<b>16</b>
<b>Figura 2. 3.Método de los cuatro puntos en configuración Wenner [2].</b> .....	<b>19</b>
<b>Figura 2. 4.Puntos de medición de resistividad en un lote rectangular [2].</b> .....	<b>20</b>
<b>Figura 2. 5.Curvas de resistividad aparente en función de la distancia “a” [7].</b> .....	<b>22</b>
<b>Figura 2. 6. Tipos de fallas [9].</b> .....	<b>26</b>
<b>Figura 2. 7. Tipos de fallas [9].</b> .....	<b>27</b>
<b>Figura 2. 8 Situaciones de riesgo en las inmediaciones de un SCT [10].</b> .....	<b>32</b>
<b>Figura 2. 9. Persona expuesta a un voltaje transferido [2].</b> .....	<b>33</b>
<b>Figura 3. 1. Ubicación de la Subestación Tovar, Edo Mérida.</b> .....	<b>41</b>
<b>Figura 3. 2. Diagrama Unifilar [13].</b> .....	<b>42</b>
<b>Figura 4. 1. Instrumentos utilizados para las mediciones en campo.</b> .....	<b>47</b>
<b>Figura 4. 2. Configuración de la malla de puesta a tierra de la S/E Tovar.</b> .....	<b>52</b>
<b>Figura 4. 3. Diagrama de Potenciales de Contacto 2D, S/E Tovar.</b> .....	<b>55</b>
<b>Figura 4. 4. Diagrama de Potencial de Contacto en 3D, S/E Tovar.</b> .....	<b>55</b>
<b>Figura 4. 5. Reporte de Contorno de Potencial de Contacto, S/E Tovar.</b> .....	<b>56</b>
<b>Figura 4. 6. Diagrama de potencial de superficie 2D, S/E Tovar.</b> .....	<b>57</b>
<b>Figura 4. 7. Diagrama de potencial de superficie en 3D, S/E Tovar.</b> .....	<b>57</b>
<b>Figura 4. 8. Reporte de contorno de potencial de superficie, S/E Tovar.</b> .....	<b>58</b>
<b>Figura 4. 9. Diagrama de perfil de potencial.</b> .....	<b>59</b>
<b>Figura 4. 10. Reporte de perfil de potencial, S/E Tovar.</b> .....	<b>60</b>
<b>Figura 5. 1. Mejora de la malla de puesta a tierra de la S/E Tovar.</b> .....	<b>62</b>
<b>Figura 5. 2. Malla modificada, propuesta para la mejora de la malla de puesta a tierra de S/E Tovar.</b> .....	<b>65</b>
<b>Figura 5. 3. Diagrama de contorno de potencial de contacto de la malla modificada de la S/E Tovar.</b> .....	<b>67</b>
<b>Figura 5. 4. Diagrama de contorno de potencial de contacto de la malla modificada de la S/E Tovar.</b> .....	<b>67</b>
<b>Figura 5. 5. Reporte del contorno de potencial de contacto, malla modificada de la S/E Tovar.</b> .....	<b>68</b>
<b>Figura 5. 6. Diagrama de contorno de potencial de superficie de la malla modificada de la S/E Tovar.</b> .....	<b>69</b>
<b>Figura 5. 7. Diagrama de contorno de potencial de superficie de la malla modificada de la S/E Tovar.</b> .....	<b>69</b>
<b>Figura 5. 8. Reporte del contorno de potencial de superficie de la malla modificada de la S/E Tovar.</b> .....	<b>70</b>
<b>Figura 5. 9. Dirección del perfil de potencial de la malla modificada de la S/E Tovar.</b> .....	<b>71</b>
<b>Figura 5. 10. Reporte de perfil de potencial de la malla modificada de la S/E Tovar.</b> .....	<b>72</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2. 1. Resistividad típica de los materiales utilizados en la capa superficial [1].</b>	<b>.....23</b>
<b>Tabla 2. 2. Efectos de la Corriente Eléctrica sobre las Personas [10].</b>	<b>.....30</b>
<b>Tabla 3. 1 Características de la malla de la S/E Tovar.</b>	<b>.....45</b>
<b>Tabla 4. 1. Medidas tomadas en campo con el Megger.</b>	<b>.....47</b>
<b>Tabla 4. 2 Reporte del análisis del suelo.</b>	<b>.....49</b>
<b>Tabla 4. 3. Parámetros de cortocircuito de las barras de la Subestación Tovar [12].</b>	<b>....51</b>
<b>Tabla 4. 4 Reporte de análisis de la malla, S/E Tovar.</b>	<b>.....52</b>
<b>Tabla 5. 1. Reporte del análisis de la Malla Modificada de la S/E Tovar.</b>	<b>.....65</b>
<b>Tabla 5. 2. Valores de Comparación del Estudio de la Malla de la S/E Tovar.</b>	<b>.....74</b>

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 2. 1. Valores de Cs en función del ancho de la capa de piedra [2].</b> .....	<b>25</b>
<b>Gráfico 4. 1. Curva del análisis del suelo (programa CYMGRD).</b> .....	<b>48</b>
<b>Gráfico 4. 2. Diagrama de perfil de potencial, S/E Tovar.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 5. 1. Terreno con dos plataformas de diferentes alturas.....</b>	<b>63</b>
<b>Gráfico 5. 2. Diagrama de perfil de potencial de la malla modificada de la S/E Tovar....</b>	<b>71</b>
<b>Gráfico 5. 3. Perfiles de los potenciales de la malla existente y la malla mejorada. ....</b>	<b>73</b>

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# INTRODUCCIÓN

La Subestación Tovar perteneciente a la Corporación Eléctrica Nacional Venezolana (CORPOELEC), se encuentra ubicada, en el Municipio Tovar del estado Mérida, fue diseñada con niveles de tensión de 115/34.5/13.8 Kv, en primer momento dispone de dos transformadores de potencia, el transformador de 115/34.5 kV de 20 MVA que se conecta con tres salidas y, el segundo transformador de 115/13.8 kV de 36 MVA que alimenta cuatros salidas; se hace referencia en “primer momento” debido a quel el transformador de 115/34.5 kV salió de sevicio y fue reemplazado por una subestación móvil de 115/ 34.5 Kv de 36 MVA.

El objetivo principal del presente trabajo de grado es la evaluación de la malla de puesta a tierra de la subestación Tovar, para descartar ó afirmar algunas inquietudes que ha presentado la empresa CORPOELEC sobre las fallas en los equipos como transformador, pararrayo y equipos electrodomésticos, tienen alguna relación con un mal estado de la malla de puesta a tierra.

Gracias a la revisión bibliográfica, se pudo apreciar que el método de los cuatros puntos en su configuración Wenner es un buen método para medir la resistividad de un terreno de una subestación atendida como lo es la subestación Tovar, dicho método es aplicado por el programa CYMGRD, el cual fue diseñado para hacer análisis y diseños de tierra en subestaciones, sirviendo para optimizar el diseño de nuevas redes y reforzando las ya existentes. Es importante mencionar que se optó por utilizar el método Wenner ya que puede ser ejecutado por cualquier persona con conocimientos básicos en estudios de puesta a tierra y, se eligio el programa antes mencionado debido a que presenta una interfaz amigable con los usuarios.

Este trabajo de grado consta de cinco capítulos para lograr los objetivos trazados:

En el capítulo I, se expone el planteamiento del problema, la justificación del trabajo, los objetivos que se quieren alcanzar con la investigación, así como las limitaciones y alcance del mismo. En el capítulo II, se determinan los conceptos teóricos de un sistema de puesta a tierra, los métodos para medir la resistividad del terreno y se realiza descripción sobre los modulos de

análisis del programa. En el capítulo III, se realiza una descripción de la subestación como: ubicación, niveles de tensión y circuitos de salida. En el capítulo IV, se especifica el análisis del suelo realizado en la subestación, exponiendo las medidas tomadas en campo y su representación gráfica utilizando el módulo de análisis del programa CYMGRD, así como también se realiza un análisis a la malla de la subestación en estudio. En el capítulo V, se establecen recomendaciones para la mejora de la malla de tierra de la subestación Tovar.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se expresa las propuestas que fundamentan el desarrollo de este trabajo de grado, se expone el problema, su justificación, los objetivos que se quieren alcanzar con la investigación, así como la metodología aplicada.

### 1.1 EL PROBLEMA

La subestación Tovar perteneciente a la Corporación Eléctrica Nacional S.A (CORPOELEC), se encuentra ubicada en la población de Tovar estado Mérida, fue diseñada en principio para niveles de tensión 115/ 13,8 kV alimentada por tres líneas de llegada (GRITA I, VIGIA I, MÉRIDA), debido a la demanda la empresa se vió en la necesidad de aumentar la capacidad de la misma, es por ello, que se realizaron modificaciones en la subestación introduciendo un tramo de transformación 115/34,5 kV y una nueva línea de llegada denominada GRITA II. En la actualidad la subestación se encuentra conformada por:

Nivel 115 kV:

- Barra principal de 115 kV capacidad de corriente 600 a 800 A.
- Llegada de línea de 115 kV siendo una S/E Nodal II.
- Número de tramo de 115 kV: 4

Nivel 13,8 kV:

- Una (1) Barra Principal con una capacidad de 1200 A.
- Una (1) Barra de Transferencia con capacidad de 600 A.
- Número de tramos de 13,8 kV: 4.
- Número de tramos de salida de 13,8 kV: 4.
- Nivel de 34,5 kV:
- Barra principal 600 A: 1.
- Número de tramos de 34,5 kV: 4.
- Número de tramos de salida 34,5 kV: 3.

Debido a la ampliación y el aumento de la capacidad en la subestación, el nivel de corriente de cortocircuito en la misma sufrió un incremento significativo, presentando deficiencia en la malla a tierra existente y por ende problemas con respecto a los niveles de los potenciales de contacto, lo antes mencionado conlleva a que los operadores que laboran en la subestación presenten notificaciones de operaciones poco seguras y mal funcionamiento de algunos equipos.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN.

En la actualidad la demanda de la energía eléctrica va creciendo con gran rapidez, por lo cual origina a realizar modificaciones en la subestaciones para aumentar su capacidad como, por ejemplo, aumentar la capacidad de los transformadores, añadir tramos de transformación, alimentar la subestación con una nueva línea de llegada; dichas modificaciones deben ir acompañadas de ampliaciones de la malla de la puesta a tierra y deben estar reguladas con las especificaciones técnicas con las que se rige la empresa (CORPOELEC). Uno de los aspectos principales para la protección contra las sobretensiones en las subestaciones es la de disponer de una red de tierra adecuada, a la cual se conectan los neutros de los equipos y todas aquellas partes metálicas que deben estar a potencial de tierra para el resguardo de todos los dispositivos que son de vital importancia.

La necesidad de contar con una red de tierra en las subestaciones es de proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra y así despejar cualquier falla, una de las funciones más importante de la red de tierra es evitar que durante la circulación de estas corrientes de tierra, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación, y de esta manera resguardar el personal que labora dentro o en las adyacencias de la instalación.

Preservando la integridad del personal y de los equipos, es más factible garantizar la prestación de un servicio eficiente y confiable de energía eléctrica a los usuarios abonados a la empresa CORPOELEC.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

Estudiar las condiciones de la malla de puesta a tierra de la Subestación Tovar y proponer las recomendaciones que ayuden a disminuir eficientemente las fallas presentadas.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Estimar las condiciones que presenta la malla de puesta a tierra de la Subestación Tovar.
- ✓ Utilizar el programa CYMGRD como herramienta para modelar el Sistema de Conexión a Tierra y representar sus parámetros actuales.
- ✓ Registrar modificaciones de la malla de puesta a tierra del diseño inicial.
- ✓ Reducir los potenciales peligrosos existentes en la subestación mediante las consideraciones y recomendaciones más adecuadas.

## **1.4 METODOLOGÍA**

El siguiente trabajo de investigación presenta un carácter de tipo mixto, ya que refleja una parte práctica y una parte de investigación documental.

En primer lugar la investigación es respaldada con unas bases teóricas, obtenidas por una revisión bibliográfica e información cedida por la empresa CORPOELEC, debido a la información obtenida se profundiza en el método de cuatro puntos en su configuración Wenner para medir la resistividad del terreno; la parte práctica se fundamenta con la investigación en campo sobre la configuración de la malla tomando como guía los planos facilitados por la empresa y se toman las medidas para obtener la resistividad del suelo. Tanto la configuración de la malla como las medidas de la resistividad de suelo son introducidos en el programa CYMGRD, el cual sigue los estándares IEE Std -80 revisión 2000, donde se realiza el modelado del suelo, cálculos de elevación de potencial y diagramas de potencial de paso, contacto y superficie dentro y fuera de la malla. En seguida se procede al análisis de los resultados para generar las recomendaciones más factibles y, así reducir las condiciones peligrosas dentro de la subestación y en sus inmediaciones.}

## **1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **1.5.1 Alcances**

El trabajo de grado tiene como objeto principal evaluar el sistema de puesta a tierra de la Subestación Tovar, con la finalidad de descartar que las fallas que se están aconteciendo en algunos equipos de la subestación y electrodomésticos de uso del operador se deban a un inadecuado sistema de puesta a tierra; de ser así, proporcionar las recomendaciones más viables para la empresa.

### 1.5.2 Limitaciones

- Información limitada por parte de la empresa, debido a sus rigurosas normas sobre la manipulación de información por parte de personas que no pertenecen a la corporación.
- Las posibilidades para realizar investigación de campo en la subestación tovar fueron muy reducidas por las situaciones acontecidas en el país, se hizo difícil el desplazamiento en las unidades de transporte de la empresa por el resguardo de las mismas.
- La empresa no manejaba información acerca de los planos de la malla de la puesta a tierra de la subestación en estudio, pero luego de una revisión exhaustiva se localizaron dichos planos.

www.bdigital.ula.ve

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se exponen los conceptos básicos necesarios para desarrollar el presente trabajo, a fin de proporcionar una base teórica que permita comprender de forma sencilla los elementos que conforman un sistema de puesta a tierra en una subestación eléctrica y, entender los modelos, simulaciones, análisis y resultados que se presentan en los posteriores capítulos.

#### 2.1 SISTEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA EN SUBESTACIONES.

La malla o red de conexión a tierra suministra la adecuada protección al personal y al equipo que, dentro o fuera de la subestación, pueden quedar expuestos a tensiones peligrosas cuando se presentan fallas a tierra en la instalación, ya que mejora la efectividad de las protecciones eléctricas al proporcionar una adecuada conducción de la corriente de falla a tierra.

Estas tensiones dependen básicamente de dos factores: la corriente de falla a tierra y la resistencia de puesta a tierra de la malla. El primero de ellos depende del sistema de potencia al cual se conecte la subestación y el segundo, de algunos factores controlables y otros incontrolables, tales como: la resistividad del suelo, el calibre de los conductores de la malla, su separación, su profundidad de enterramiento y la resistividad de la capa de triturado que recubre el piso de la subestación.

Un concepto importante que será utilizado en los posteriores capítulos es el de "malla de tierra"

La malla de tierra, es un sistema de electrodos de tierra horizontales que consiste en un número de conductores desnudos interconectados y enterrados en la tierra, proporcionando una tierra común para dispositivos eléctricos o estructuras metálicas, usualmente en un lugar específico [1]

## 2.2 FUNCIONES DE LA MALLA DE TIERRA

Las funciones de la malla de tierra de una instalación son:

- Proteger a los individuos, limitando las tensiones de toque y paso a valores aceptables en los alrededores de la instalación durante condiciones de cortocircuito.
- Proporcionar un medio para disipar la corriente eléctrica en la tierra bajo condiciones normales o de cortocircuito, sin exceder ningún límite operacional de los equipos o afectar adversamente la continuidad del servicio.
- Asegurar el buen funcionamiento de los equipos de protección de una red, lo cual garantizará el adecuado aislamiento de las porciones de dicha red que estén en falla.
- Minimizar la interferencia de los circuitos de transmisión y distribución sobre los sistemas de comunicaciones y control.
- Mantener ciertos puntos de una red a un nivel de potencial definido con referencia a la tierra.
- Impedir que los soportes de los equipos alcancen un nivel de potencial diferente al de la tierra.
- Garantizar el punto neutro sólidamente conectado a tierra debido a la tendencia histórica de conseguir la conexión en Y de los transformadores en los que el punto neutro se conecta a tierra en sistemas de distribución a 60 Hz [3].
- Proteger la red contra los efectos de las descargas atmosféricas.

- Permitir la utilización de la tierra como camino de retomo en la transmisión de energía en corriente continua.

### **2.3 PRINCIPALES CONSIDERACIONES DEL DISEÑO.**

Un sistema de tierra debe ser instalado de manera que limite el efecto de los gradientes de potenciales de tierra a niveles de tensión y corriente para que no pongan en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla y para asegurar la continuidad del servicio [2].

La norma IEEE Std 80 supone que la práctica más común con respecto al diseño del sistema de tierra corresponde a una malla horizontal de conductores enterrados, complementada por un número de varillas verticales conectadas a la malla. Algunas de las razones para usar esta configuración son las siguientes:

-En subestaciones, un sólo electrodo no es adecuado por sí mismo para brindar un sistema de tierra seguro. Por el contrario, cuando varios electrodos, tales como varillas, están interconectados entre ellos y a todos los neutros de los equipos, estructuras y soportes que se requiera aterrizar, el resultado es esencialmente un arreglo en forma de malla, independientemente de los objetivos originales. Si sucede que las uniones de conexión entre electrodos están enterradas en un suelo de buena conductividad, esta red por sí sola representa un sistema excelente de puesta a tierra.

-Si la magnitud de la corriente a disipar en la tierra es muy alta, es casi imposible instalar una malla con la resistencia tan baja que asegure que la elevación de potencial de la tierra no vaya a generar diferencias de tensiones que sean inseguras para el contacto humano. Este peligro puede ser sólo eliminado controlando los potenciales locales a través de toda el área de la subestación, lo cual se logra con una combinación de malla horizontal y varillas verticales. Normalmente, la malla de tierra se entierra a una profundidad entre 0,3 m y 0,5 m y generalmente las capas superficiales de la tierra son de mayor resistividad que las capas mas profundas; es ésta una razón adicional para utilizar las varillas verticales.

-El uso de varillas trae ventajas adicionales en instalaciones con áreas limitadas, como por ejemplo subestaciones tipo GIS, y en la periferia de las mallas de tierra en donde generalmente se encuentran diferencias de tensiones altas.

Un sistema de tierra debe ser instalado de manera que limite el efecto de los gradientes de potenciales de tierra a niveles de tensión y corriente para que no pongan en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla y para asegurar la continuidad del servicio.

La norma IEEE Std 80 supone que la práctica más común con respecto al diseño del sistema de tierra corresponde a una malla horizontal de conductores enterrados, complementada por un número de varillas verticales conectadas a la malla. Algunas de las razones para usar esta configuración son las siguientes:

En subestaciones, un sólo electrodo no es adecuado por sí mismo para brindar un sistema de tierra seguro. Por el contrario, cuando varios electrodos, tales como varillas, están interconectados entre ellos y a todos los neutros de los equipos, estructuras y soportes que se requiera aterrizar, el resultado es esencialmente un arreglo en forma de malla, independientemente de los objetivos originales. Si sucede que las uniones de conexión entre electrodos están enterradas en un suelo de buena conductividad, esta red por sí sola representa un sistema excelente de puesta a tierra.

Si la magnitud de la corriente a disipar en la tierra es muy alta, es casi imposible instalar una malla con la resistencia tan baja que asegure que la elevación de potencial de la tierra no vaya a generar diferencias de tensiones que sean inseguras para el contacto humano. Este peligro puede ser sólo eliminado controlando los potenciales locales a través de toda el área de la subestación, lo cual se logra con una combinación de malla horizontal y varillas verticales. Normalmente, la malla de tierra se entierra a una profundidad entre 0,3 m y 0,5 m y generalmente las capas superficiales de la tierra son de mayor resistividad que las capas mas profundas; es ésta una razón adicional para utilizar las varillas verticales.

El uso de varillas trae ventajas adicionales en instalaciones con áreas limitadas y en la periferia de las mallas de tierra en donde generalmente se encuentran diferencias de tensiones altas.

## **2.4 ASPECTOS BÁSICOS EN EL DISEÑO DE LA MALLA:**

El análisis conceptual de una malla de tierra usualmente empieza con la inspección de la planta general de la subestación, mostrando los equipos principales y estructuras. Para establecer las ideas básicas y conceptos, los siguientes puntos sirven como guía para comenzar con el diseño de una malla de tierra típica [2].

- ✓ Un conductor continuo en forma de lazo debe rodear el perímetro de la subestación de tal forma que encierre la mayor área posible. Esta medida ayuda a evitar altas concentraciones de corriente y, por lo tanto, altas diferencias de tensión en el área de la malla y cerca de los tramos finales de los cables de la malla.
- ✓ Dentro del lazo, los conductores deben colocarse en líneas paralelas y, en lo posible, a lo largo de estructuras y filas de equipos, de tal forma que se tengan las conexiones más cortas.
- ✓ Una malla típica de una subestación puede estar conformada por conductores de cobre desnudo, enterrado como mínimo entre 0,3 m y 0,5 m bajo la capa de piedra picada, con un espaciamiento determinado formando retículas. En cada punto de cruce, los conductores deben fijarse segura y apropiadamente.
- ✓ Las varillas de puesta a tierra pueden colocarse en las esquinas de la malla y en la periferia. Pueden instalarse también adyacentes a los equipos de protección como pararrayos. En suelos de varias capas de resistividad se pueden instalar varillas de varios metros de longitud para poder llegar a la capa de menor resistividad.

- ✓ La malla debe extenderse sobre la totalidad del área de la subestación y, en ocasiones, por fuera del cerco perimetral. Es usual disminuir la separación de los conductores en la periferia para un mejor control de las tensiones de choque. Varios conductores o uno de mayor tamaño deben instalarse en áreas de gran concentración de corriente, como por ejemplo, en los puntos de la puesta a tierra de neutros de transformadores, generadores y bancos de capacitores.
- ✓ En sitios en los cuales es frecuente la presencia de personal de mantenimiento, como por ejemplo, adyacentes a mecanismos de operación de seccionadores, se puede instalar una esterilla de tierra.

Es importante mencionar que la esterilla de tierra es una placa metálica sólida o un sistema de conductores con muy poco espaciamiento, que es conectado y puesto sobre la malla de tierra o en cualquier lugar sobre la superficie para obtener un margen extra de protección y minimizar así el peligro de exposición a altas tensiones de paso y toque en áreas críticas o en lugares de uso frecuente por personas.

Las conexiones cruzadas entre los conductores en paralelo que conforman la retícula tienen un efecto relativamente pequeño en bajar la resistencia de la malla; su principal función es el control de las tensiones de choque.

- ✓ Se debe prever una capa de piedra picada de alta resistividad sobre la superficie de toda la subestación. Esta capa puede tener un espesor entre 0,08 m y 0,15 m.
- ✓ Para ayudar a reducir la resistencia de la malla, se deben conectar los cables de guarda de las líneas de transmisión a la malla.
- ✓ En áreas en donde la resistividad del terreno es alta o en un área limitada o muy costosa, puede no ser posible obtener una baja resistencia de malla aunque se incremente el número de conductores en paralelo. Algunas soluciones pueden ser:

Conexiones a mallas de tierra remotas y sistemas de tierra de instalaciones adyacentes. Requiere consideraciones especiales y cuidadosas en lo referente a tensiones transferidas, localización de pararrayos, etc.

## **2.5 ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA:**

### **2.5.1 Electrodo:**

Los electrodos son elementos metálicos que permanecen en contacto directo con el terreno.

Los electrodos estarán contruidos con materiales inalterables a la humedad y a la acción química del terreno. Por ello, se suelen usar materiales tales como el cobre, el acero galvanizado y el hierro zincado.

El electrodo puede tomar diversas formas: barras verticales, placas y conductores horizontales. Las formas más comunes se describen a continuación:

### **2.5.2 Electrodo Horizontal**

Son conductores desnudos ubicados en posición horizontal que constituyen la malla de tierra, el valor de la resistividad para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra, corresponde al estrato donde va a estar ubicado. Se recomienda el uso de conductores de calibre 4/0 AWG[3] por razones mecánicas, ya que eléctricamente pueden usarse conductores de menor calibre.

### **2.5.3 Electrodo vertical**

Uno de los más utilizados es la varilla Copperweld, por su relativa facilidad de instalación, poco mantenimiento y bajo costo. Están hechas de cobre con aleación de acero para soportar los golpes de incrustación. Su área de contacto no es la mejor y lo compensa con la longitud, logrando el contacto con capas de tierra de diferentes resistividades [4].

El Código Eléctrico Nacional (CEN) [5], realiza las siguientes indicaciones con respecto a este tipo de electrodo:

- ✓ No tendrán menos de 2.40 m de longitud.
- ✓ Los electrodos de barras de hierro o acero tendrán como mínimo diámetro de 5/8".
- ✓ Los electrodos se enterraran de manera que por lo menos 2.40 m de su longitud este en contacto con el suelo. Estos deben llegar a una profundidad de al menos 2.40 m, a menos que se encuentren rocas podrá enterrarse de forma oblicua con ángulo de 45 grados con la vertical.

#### 2.5.4 Conectores y accesorios.

Son los elementos que nos sirven para unir a la red de tierra los electrodos profundos, las estructuras, los neutros de los bancos de transformadores, etc.

Los conectores utilizados en los sistemas de tierra son principalmente de tres tipos:

- a) Conectores atornillados.
- b) Conectores a presión.
- c) Conectores soldados.

Todos los tipos de conectores deben soportar la corriente de la red de tierra en forma continua.



Figura 2. 1 Tipos de conexión [2].

## 2.6 FACTORES CONSIDERADOS EN EL DISEÑO.

### 2.6.1 Resistividad y características del terreno.

Es la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad y equivale a la resistencia que ofrece el terreno medida en las caras opuestas de un cubo de suelo de 1 m de arista; se representa por la letra griega " $\rho$ " y su unidad en el S.I. está expresada por  $\Omega$ -m.

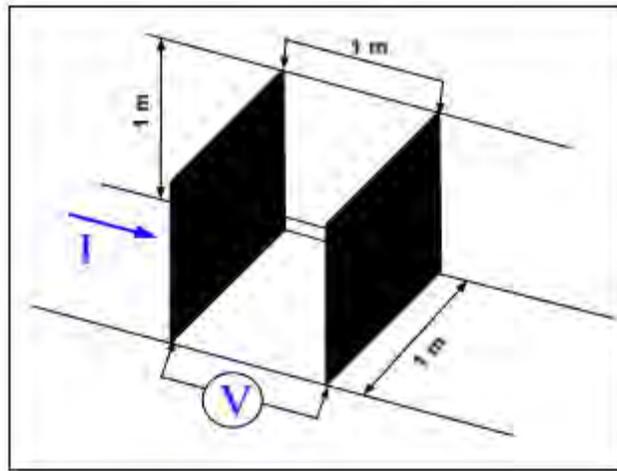


Figura 2. 2. Equivalencia de la resistividad del terreno [6].

La resistividad del terreno está influenciada por los siguientes factores:

- Tipo de suelo.
- Humedad.
- Composición química del suelo.
- Temperatura.
- Salinidad.
- Estratificación del suelo, factor primordial debido a que el terreno se encuentra generalmente conformado por estratos que poseen su propia resistividad y grosor.

### ❖ Tipo de suelo

Existen en la literatura abundantes datos sobre los rangos de resistividad para varios tipos de suelos y rocas. Estimativos hechos solamente con la clasificación del suelo conllevan a aproximaciones no muy exactas, siendo entonces necesario efectuar medidas de resistividad en los sitios.

Raramente se encuentran suelos que tengan una resistividad uniforme en la totalidad del área de la subestación. En la mayoría de los casos se presentan varias capas, cada una con diferente resistividad. También ocurren cambios horizontales pero, en comparación con los verticales, son más graduales [2].

### ❖ Humedad

La humedad es un factor que afecta inversamente la resistividad del suelo: a una mayor humedad menor es la resistividad del suelo; en otras palabras, los suelos secos presentan una alta resistividad, mientras que los suelos húmedos presentan una menor resistividad. Por lo tanto, sitios como riveras de ríos y costas marinas pueden presentar una baja resistividad del terreno.

En general, la humedad aumenta con la profundidad. Por otro lado, si el contenido de sales disueltas en el agua es bajo, no siempre una alta humedad en el suelo significa una baja resistividad.

### ❖ Minerales y sales disueltos

La presencia de sales y minerales combinados con el agua permite una mejor conducción de la electricidad (conducción electrolítica) por el suelo.

Suelos dedicados generalmente a la agricultura, por lo general tienen una alta resistividad debido a las sales y a los minerales presentes en el suelo.

### ❖ Temperatura

La resistividad del suelo también es influenciada por la temperatura, la cual afecta de dos formas distintas:

Al aumentar la temperatura, disminuye la humedad del suelo aumentando la resistividad; sin embargo, hay que tener en cuenta que este fenómeno afecta más la superficie del suelo; en las capas interiores del suelo la humedad es más constante.

Por otro lado, la disminución de la temperatura a temperaturas iguales o menores a cero incrementa considerablemente el valor de la resistividad debido a que el agua contenida en el suelo se congela y el hielo es un mal conductor.

### 2.6.2 Medidas de resistividad.

En esta sección se analiza la representación del suelo por medio de modelos matemáticos, basados en medidas de resistividad del suelo.

La norma [3] sugiere varios métodos para la medición de la resistividad, entre ellos:

- Información geológica mediante muestras de suelo.
- Método de los tres puntos.
- Método de los cuatro puntos.

En éste proyecto por sugerencia de la norma [3] se analiza el método de cuatro puntos en su configuración Wenner, debido a que es un buen método para medir la resistividad de un terreno de grandes dimensiones.

El método de las cuatro picas de Wenner, consiste en clavar cuatro varillas enterradas a lo largo de una línea recta, espaciadas uniformemente a una distancia **a** y enterradas a una profundidad **b**, tal como se ilustra en la Figura 2.3. Las dos varillas externas inyectan una corriente alterna **I** en el suelo y las dos varillas internas captan la caída de tensión **V**, que ocurre entre ellas debido a la corriente **I**, la diferencia de tensión es medida por un potenciómetro de alta impedancia. La tensión es dividida por la corriente para dar un valor de resistencia de los electrodos internos **R**. La resistividad del suelo se estima con base en la fórmula:

$$\rho = \frac{4 \pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.1)$$

Donde:

$\rho$ : resistividad del suelo,  $\Omega$ -m.

R: resistencia resultante de la medida,  $\Omega$ .

a: distancia entre electrodos adyacentes, m.

b: profundidad de enterramiento de los electrodos, m.

Si **b** es pequeño comparado con **a**, comunmente en la práctica la profundidad de **b** no es superior a **a**. Entonces se puede asumir **b**=0 y la ecuación se reduce en:

$$\rho = 2\pi a R \quad (2.2)$$

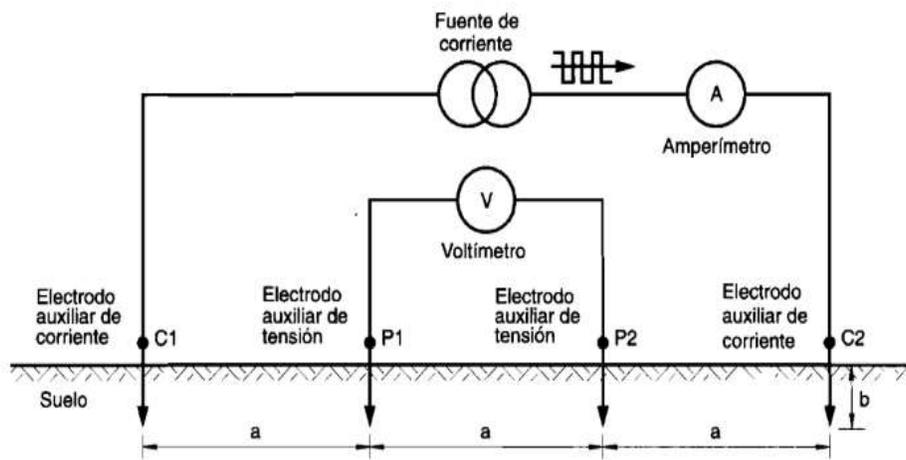


Figura 2. 3.Método de los cuatro puntos en configuración Wenner [2].

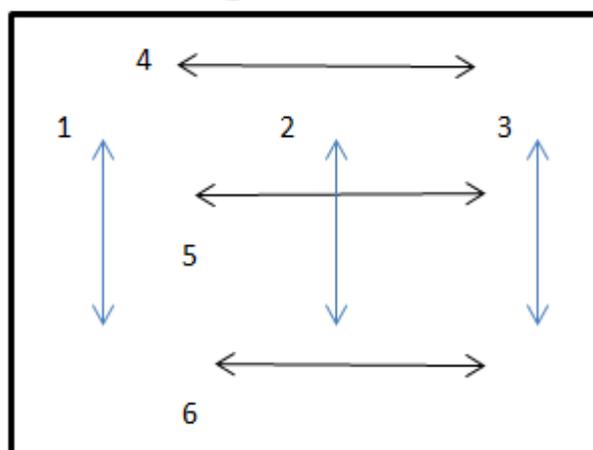
Cuando se realiza una medición con un determinado valor **a** de separación entre varillas, se considera que el valor de resistividad obtenido  $\rho$  corresponde aproximadamente a la resistividad del suelo a una profundidad del mismo valor de **a**. Esto se entiende cuando se recuerda que las superficies equipotenciales son aproximadas por hemisferios; cuanto mayor sea la separación **a**, más profundos son los caminos predominantes de la corriente. Esta propiedad permite construir curvas de resistividad del suelo en función de la profundidad,

realizando varias medidas con una separación a cada vez mayor en una dirección específica. En la práctica, se realizan mediciones sucesivas a una separación  $a$ .

### 2.6.3 Recomendaciones para la medición en campo.

Para determinar la resistividad de un terreno es necesario efectuar varios grupos de mediciones sucesivas debido a las condiciones heterogéneas del terreno. Las medidas deben efectuarse en una forma organizada de tal manera que se logre un cubrimiento total del área sobre la cual va a ser construida la subestación ó donde se va a evaluar el sistema de conexión a tierra.

Uno de los métodos que podrían ser empleados consiste en trazar las líneas separadas en tal forma que se cubra aproximadamente el ancho del patio en el que se localizan los equipos. Sobre cada una de las líneas se efectúan mediciones sucesivas a diferente profundidad. Estas medidas se pueden efectuar en diferentes épocas del año (tiempo húmedo y tiempo seco), para así tener cálculos más precisos. En la figura 2.4 se muestra una sugerencia de distribución de los puntos de medición para un terreno rectangular.



**Figura 2. 4.Puntos de medición de resistividad en un lote rectangular [2].**

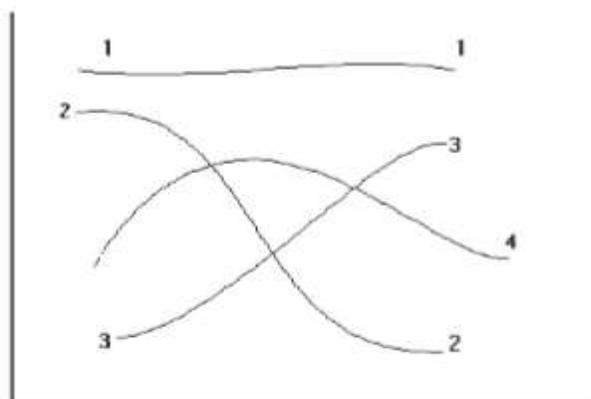
Se debe asegurar que los electrodos tengan un buen contacto con el terreno, para ello, deben estar por lo menos 10cm dentro del terreno.En el caso de que el terreno sea de

resistividad elevada es recomendable agregar agua en las alrededores del electrodo para mejorar el contacto.

Una vez determinada la resistividad para cada profundidad se debe seleccionar el modelo con el cual se representa el suelo, entre el modelo de una capa (uniforme) o el modelo de dos capas.

El objetivo principal de las mediciones de campo es graficar y obtener la curva de resistividad aparente en función de la distancia respectiva  $a$ , como se muestra en la figura 2.5 ; a partir de esta curva es posible proponer modelos estratificados horizontalmente, que desde el punto de vista teórico dan como resultado una curva de resistividad aparente similar a la obtenida con las mediciones de campo.

Por lo general, las curvas de campo de la resistividad aparente presentan variaciones para las diferentes ubicaciones de los electrodos de medición lo cual indica una estructura heterogénea del terreno. Es posible encontrar curvas con variaciones de resistividad muy pequeña donde se presume que el terreno tiene una característica homogénea, como se muestra en la curva número uno de la figura 2.5, no existe una regla que permita la interpretación directa de estos resultados para obtener un modelo de terreno, lo único que se puede concluir con certeza es la característica heterogénea que presenta, la existencia de estratos profundos de mayor o menor resistividad, y en algunos casos el número de capas inicial del modelo propuesto, por ejemplo en la figura 2.5 para las curvas dos y tres se puede proponer un modelo de dos estratos [7].



**Figura 2. 5. Curvas de resistividad aparente en función de la distancia “a” [7].**

#### **2.6.4 Resistividad y espesor de La Capa de la Piedra Picada.**

Para el diseño de la malla de puesta a tierra de una subestación la inclusión de una capa de piedra picada en la superficie del terreno es muy útil en cuanto a retardar la evaporación de la humedad y por lo tanto, limitar el secado de las capas superficiales del suelo, además cubrir la superficie con una capa de material de alta resistividad es valioso a la hora de reducir las corrientes de choque y ayuda a que las tensiones de toques y paso tolerables aumenten.

Las condiciones locales, tamaño y tipo de piedra pueden afectar el valor de resistividad. Por lo tanto, es importante conocer el tipo de material que se usa en la subestación para de esta manera comparar con los valores típicos de resistividades medidas.

En la tabla 2.1 se proporcionan los distintos tipos de superficie de piedra picada que se deben utilizar con su respectivo valor de resistividad.

**Tabla 2. 1. Resistividad típica de los materiales utilizados en la capa superficial [1].**

Descripción del material utilizado para capa de piedra superficial	Resistividad ejemplo $\Omega\cdot m$	
	Seco	Húmedo
Granito molido	$140 \times 10^6$	1300
Granito molido (1.5") (0.04 m)	4000	1200
Granito molido (0.75-1") (0.02-0.025 m)	-	6513 (10min después de 45 $\Omega\cdot m$ de agua evaporada)
Granito lavado #2 (1-2") (0.02-0.025 m)	$1.5 \times 10^6$ a $4.5 \times 10^6$	5000 (agua de lluvia, 100 $\Omega\cdot m$ )
Granito lavado #3 (2-4") (0.05-0.1m)	$2.6 \times 10^6$ a $3 \times 10^6$	10000 (agua de lluvia, 100 $\Omega\cdot m$ )
Piedra picada (tamaño desconocido)	$7 \times 10^6$	2000 a 3000 (suelo húmedo, 45 $\Omega\cdot m$ )
Granito lavado similar a la gravilla (0.75")	$2 \times 10^6$	10000
Granito lavado similar a la gravilla	$40 \times 10^6$	5000
Granito lavado #57 (0.75") (0.02m)	$190 \times 10^6$	8000 (suelo húmedo, 45 $\Omega\cdot m$ )
Asfalto	$2 \times 10^6$ a $30 \times 10^6$	
Concreto	$1 \times 10^6$ a $1 \times 10^9$	10000 a $6 \times 10^6$

En la superficie de las subestaciones se esparce una capa de material de alta resistividad con un espesor que varía de 0.08m a 0.15m, esto se realiza para aumentar la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de la persona en la subestación. Por ello se introduce el factor  $C_s$  (factor de reducción debido a la capa de piedra) de reducción de potencia en presencia de una capa gruesa de material de alta resistividad [8]. El uso de capa de piedra proporciona un

valor que acompañado con el tiempo de exposición a la falla y la resistividad del terreno, ayudan a cuantificar las tensiones de toque y paso tolerables por un ser humano.

La norma [1] expone un procedimiento matemático y presenta unas gráficas para encontrar el valor de  $C_s$ ; sin embargo, también presenta una expresión empírica para el valor de  $C_s$ :

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2hs + 0.09} \quad (2.3)$$

Dónde:

$C_s$ : Factor de disminución de la capa superficial.

$\rho$ : Resistividad del terreno ( $\Omega$ -m).

$\rho_s$ : Resistividad de la capa superficial ( $\Omega$ -m).

$h_s$ : Espesor de la capa superficial (m).

En el gráfico 2.1 se pueden observar los distintos valores de factor de disminución debido a la capa de piedra  $C_s$ , a partir del factor de reflexión  $K$ , valor que proporciona información sobre los cambios abruptos de la resistividad en la frontera de ambas capas del suelo. Viene dado por la siguiente expresión:

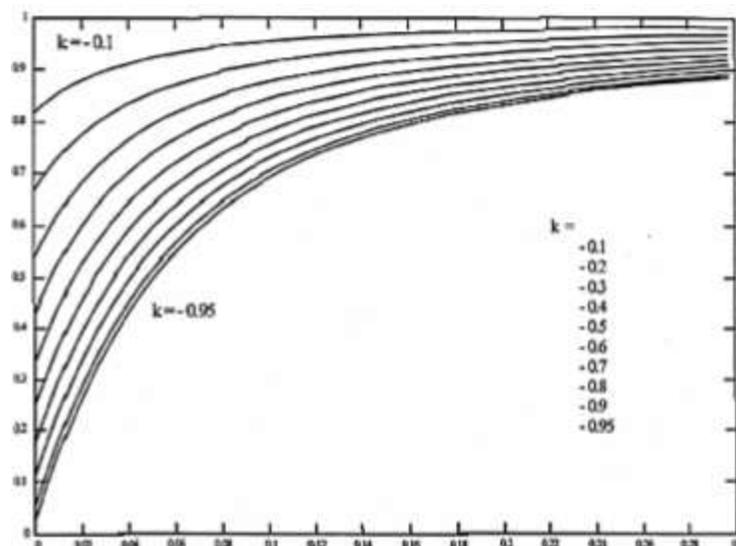
$$k = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (2.4)$$

Dónde:

$K$ : Es el factor de reflexión entre materiales de diferentes superficies.

$\rho$ : Resistividad del suelo ( $\Omega$ -m).

$\rho_s$ : Resistividad de la capa de piedra superficial ( $\Omega$ -m).



**Gráfico 2. 1. Valores de  $C_s$  en función del ancho de la capa de piedra [2].**

Este factor de reflexión  $K$  varía entre  $-1$  y  $+1$ . Un suelo con cambios extremos en la resistividad representa un factor con un valor cercano a la unidad, mientras que un factor de cero o cercano a cero es dado por un suelo uniforme.

### 2.6.5 Corrientes máximas de cortocircuito a tierra.

Para determinar el valor correcto de la corriente de falla, utilizada en el cálculo del sistema de tierras, se necesita:

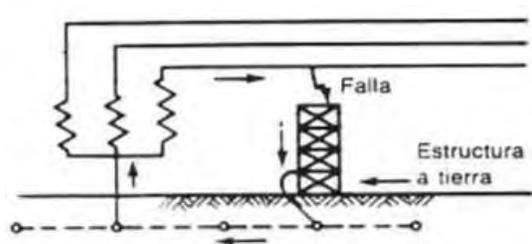
- Determinar el tipo de falla posible a tierra que produzca el máximo flujo de corriente entre la malla del sistema de tierras y la tierra adyacente, y por lo tanto su mayor elevación de potencial y los mayores gradientes locales en el área de la subestación.
- Determinar por cómputo o por analizadores, el máximo valor efectivo de la corriente simétrica de falla a tierra  $I''$  entre la malla de tierra y la tierra circundante en el instante de iniciarse la falla.

- **Tipos de fallas a tierra.**

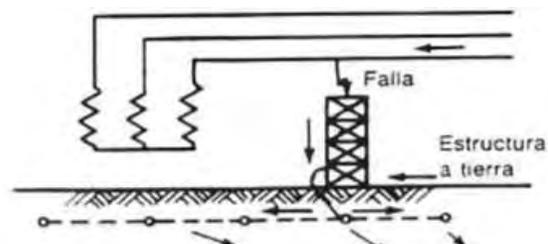
Son de dos tipos principalmente:

- Falla monofásica a tierra.
- Falla polifásica a tierra.

Para cualquiera de los tipos de fallas mencionados, se debe hacer primero un diagrama equivalente a los de la Figura 2.6 y la Figura 2.7, que represente la situación real de los circuitos. El diagrama deberá incluir todo hilo aéreo neutro que esté conectado al sistema de tierra o a los neutros de los transformadores [9].

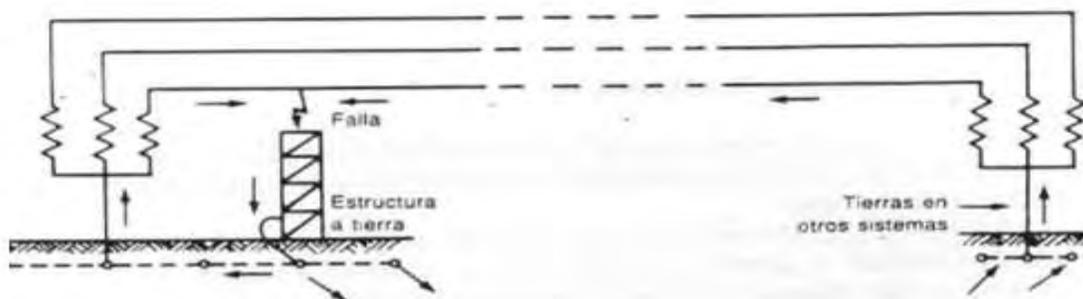


Caso 1. Falla dentro del local de la estación. Sistema de tierra local solamente. La corriente de falla sigue el camino metálico suministrado por la red de tierra. Ninguna corriente apreciable fluye en la tierra.

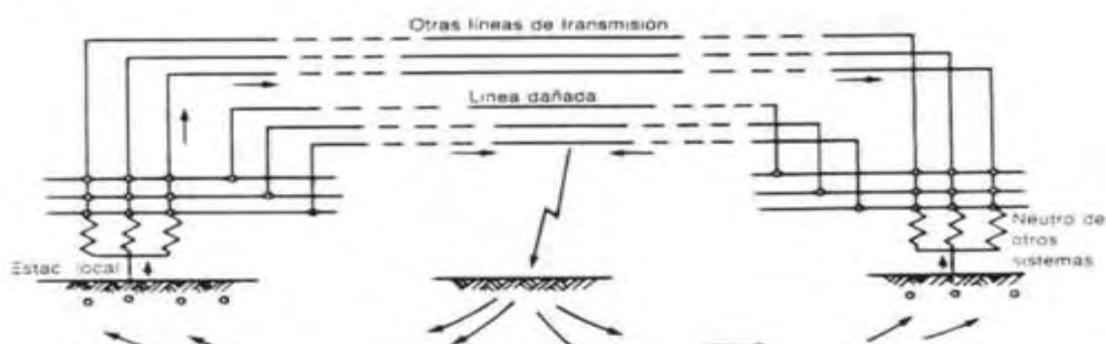


Caso 2. Falla en el local de la estación. Neutro conectado a tierra sólo en punto remoto. La corriente total de falla fluye de la red de tierra hacia la tierra.

Figura 2. 6. Tipos de fallas [9].



Caso 3. Falla en la estación. Sistema conectado a tierra tanto en la estación como en otros puntos. La corriente de falla regresa al neutro local a través de la red de tierras y a los neutros remotos a través de la tierra. Ésta es la componente que impera en el estudio de tensiones peligrosas.



Caso 4. Falla en la línea fuera de la estación. Sistema a tierra localmente y en otros puntos. Parte de la corriente regresa de la tierra al sistema local de tierras y determina el aumento de potencial y gradientes allí.

Figura 2. 7. Tipos de fallas [9].

### 2.6.6 Selección del conductor y las uniones.

Cada elemento del sistema de puesta a tierra, incluyendo conductores, uniones, cables de conexión, varillas, entre otros, debe ser diseñado teniendo en cuenta lo siguiente:

- Tener suficiente conductividad para no crear diferencias de tensiones locales peligrosas.
- Resistir la fusión y el deterioro mecánico bajo las condiciones más adversas de corriente de falla en cuanto a magnitud y duración.
- Ser mecánicamente confiable y fuerte, especialmente en áreas expuestas a corrosión y abuso físico.

El material más utilizado para los conductores y electrodos de las mallas de tierra es el cobre debido a su alta conductividad y a su resistencia a la corrosión cuando está enterrado.

▪ **Tamaño de los conductores.**

La fórmula de Sverak, incluida a continuación, evalúa la capacidad de corriente de cualquier conductor para el cual se conocen las características del material (Tabla 2.2):

$$I = A_{mm^2} \sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)} \quad (2.5)$$

Dónde:

$I$  : Es el valor rms de la corriente en kiloamperios.

$A_{mm^2}$ : Es la sección transversal del conductor en  $mm^2$ .

$T_m$ : Es la temperatura máxima permisible en °C.

$T_a$ : Es la temperatura ambiente en °C.

$T_r$ : Temperatura de referencia para el material, °C.

$\alpha_r$ : Es el coeficiente térmico de resistividad a la temperatura  $T_r$ ,  $1/^\circ\text{C}$ .

$\alpha_o$ : Coeficiente térmico de resistividad a  $0^\circ\text{C}$ ,  $1/^\circ\text{C}$ .

$\rho_r$ : Es la resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia  $T_r$ ,  $\mu\Omega\text{cm}$ .

$K_o$ :  $1/\alpha_o$  ó  $(1/\alpha_r) - T_r$ , °C.

$t_c$ : tiempo de despeje de la falla (tiempo del relé más tiempo del interruptor) en segundos.

TCAP: Factor de capacidad térmica en  $(J/(cm^3^\circ\text{C}))$ ; Tabla 1A.

## 2.7 EFECTO DE LA CORRIENTE EN EL CUERPO HUMANO.

El efecto de la corriente eléctrica en el cuerpo humano depende de múltiples factores dentro de los cuales se puede resaltar los siguientes:

- Camino de circulación de la corriente y distribución de la misma dentro del cuerpo humano.
- Intensidad de la corriente.
- Tiempo de la circulación de la corriente en el cuerpo.
- Tipo de onda de la corriente: impulso(rayos), corriente alterna, corriente continua.
- Frecuencia de la corriente alterna senoidal.
- Nivel de voltaje aplicado para la circulación de corriente.
- Humedad de la piel y superficie de contacto con los caminos de circulación de la corriente externos al cuerpo humano.
- Condiciones orgánicas de la persona bajo el efecto de una corriente eléctrica.

Debido a la naturaleza aleatoria de las variables que limitan la corriente por el cuerpo humano en una situación de riesgo, se hace difícil establecer un valor máximo de voltaje permitido. Por esta razón los criterios de riesgo para las personas están definidos por valores de corriente [10].

En la Tabla 2.2 se resumen los efectos producidos de acuerdo a la intensidad de corriente y la forma de onda. Sin embargo no existen criterios únicos para establecer los límites para cada efecto, también se debe entender que los valores suministrados son tendencias estadísticas centrales de valores aleatorios que por supuesto adolecen de algún grado de dispersión.

**Tabla 2. 2. Efectos de la Corriente Eléctrica sobre las Personas [10].**

	Corriente en mA					
	Corriente Continua		Corriente Alterna Onda Senoidal			
			60 Hz		10 kHz	
Efecto sobre la persona	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Sin sensación en la mano	1.0	0.6	0.4	0.3	7.0	5.0
Hormigueo ligero.Nivel de percepción.	5.2	3.5	1.1	0.7	12.0	8.0
Choque no doloroso. No se pierde el control muscular	9.0	6.0	1.8	1.2	17.0	11.0
Choque doloroso. Dolor sin perder el control muscular.	62.0	41.0	9.0	6.0	55.0	37.0
Choque doloroso.Nivel de imposibilidad de soltar un objeto energizado	76.0	51.0	16.0	10.5	75.0	50.0
Dolor.Choque severo. Contracción muscular. Dificultad para respirar.	90.0	60.0	23.0	15.0	94.0	63.0
Posible fibrilación ventricular debida a choques de corto tiempo.						
Duración del choque 0.03 s.	1300.0	1300.0	1000.0	1000.0	1100.0	1100.0
Duración del choque 3.0 s.	500.0	500.0	100.0	100.0	500.0	500.0

La norma IEEE-80-1986 da los siguientes valores para cada efecto de la corriente eléctrica sobre las personas:

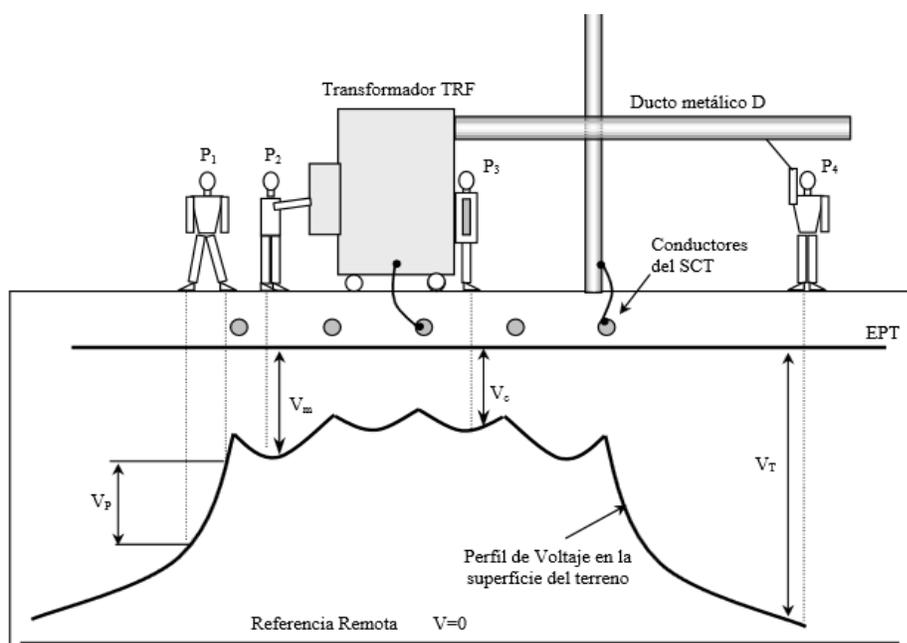
- **1 mA:** Nivel de percepción, ligera sensación de hormigueo.
- **1 – 6 mA:** Desagradable. No se pierde el control muscular.
- **9- 25 mA:** Dolor. Dificultad o imposibilidad del soltar un objeto energizado agarrado con la mano.
- **25 – 60 mA:** Aparecen contracciones musculares que pueden dificultar la respiración. Excepto en casos de paro respiratorio, los efectos desaparecen cuando la corriente se interrumpe. Cuando existe paro respiratorio con técnicas de resucitación se puede salvar a la persona.
- **60 – 100 mA:** Puede ocurrir fibrilación ventricular, paro cardíaco, paro respiratorio. Los daños causados son severos y puede morir la persona.

Un aspecto importante en los niveles de corriente y sus efectos colaterales sobre el cuerpo humano es el tiempo de exposición a la corriente. Desde el punto de vista práctico se ha asumido como criterio de diseño el mínimo valor de corriente que pueda producir fibrilación ventricular con una probabilidad dada de ocurrencia. Ya que esta es la condición mortal para una persona [10].

## **2.8 SITUACIONES DE RIESGO EN LAS INMEDIACIONES DE UN SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRA (SCT).**

En la Figura 2.8 se muestran diferentes tensiones de riesgo para personas ubicadas en las inmediaciones del Sistema de Conexión a Tierra de una instalación determinada. Al momento de ocurrir una falla que inyecte una corriente en el SCT que retorne por medio del

terreno hacia la fuente, el SCT eleva su potencial respecto a una referencia muy lejana a un valor GPR (Ground Potential Rise) o elevación de potencial de tierra.



**Figura 2. 8 Situaciones de riesgo en las inmediaciones de un SCT [10].**

Sobre la superficie del terreno aparece un perfil de voltajes que depende de la forma en que la corriente se distribuye en el terreno para retornar hacia la fuente. La distribución de corriente en el terreno depende de la resistividad del terreno y su heterogeneidad, y de la geometría del SCT.

### **2.8.1 Voltaje de Paso.**

Es la diferencia de potencial al cual se encuentra sometido una persona, cuyos pies se encuentran en contacto con la superficie del suelo, distanciados un metro entre sí, cuando una corriente eléctrica es dispersada a tierra, caracterizado por la persona P1 en la Figura 2.8.

Los voltajes de malla y los voltajes transferidos se pueden considerar como casos especiales de voltajes de contacto.

### ❖ Voltaje de malla:

Es el máximo voltaje de contacto encontrado dentro de una cuadrícula del SCT mallado. Entendiéndose por cuadrícula el cudrilátero limitado por conductores del SCT que se cruzan y están conectados eléctricamente de manera intensional en cada cruce [10], caracterizado por la persona P3 en la Figura 2.8.

### ❖ Voltaje Transferido:

Es un voltaje transferido dentro o fuera de la instalación. Ocurre cuando una persona ubicado en un punto lejano al SCT toca un conductor eléctrico (estructura, ductería, cable de guarda, entre otros), conectado al SCT que ha elevado su potencial de tierra por causa de una corriente inyectada al SCT y que retorna por el terreno hacia la fuente, caracterizado por la persona de la Figura 2.9.

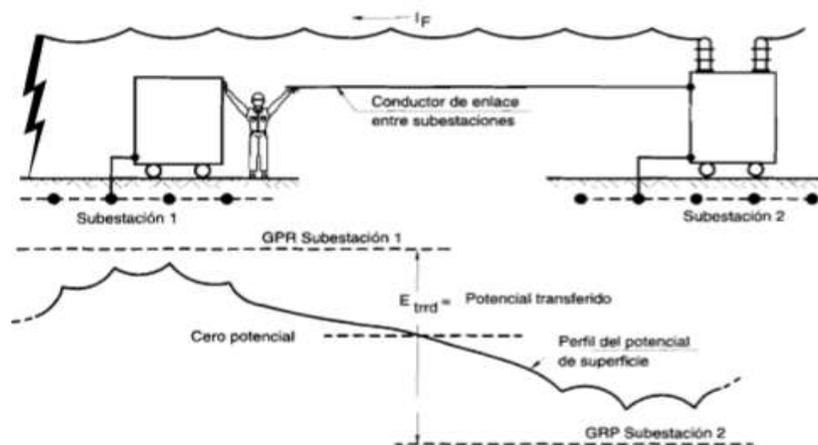


Figura 2. 9. Persona expuesta a un voltaje transferido [2].

### 2.8.2 Voltaje de Toque.

Es la diferencia de potencial al cual se encuentra sometida una persona que, tocando un equipo u objeto metálico puesto a tierra, está a una distancia horizontal de un metro del mismo, cuando una corriente eléctrica es dispersa a tierra, caracterizado por la persona P2 en la Figura 2.8.

### 2.8.3 Criterios de voltajes de toque y de contacto.

Para mantener la seguridad de las personas al momento de una descarga eléctrica es importante que el manejo del voltaje máximo de cualquier circuito accidental según la norma [1], no exceda los límites que se indican a continuación, estos son especificados para pesos corporales de 50 y 70 kg.

$$E_{PASO\ 50Kg} = (1000 + 6C_s\rho_s) \times \left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right) \quad (2.6)$$

$$E_{PASO\ 70Kg} = (1000 + 6C_s\rho_s) \times \left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}\right) \quad (2.7)$$

Similarmente para el voltaje de contacto:

$$E_{CONTACTO\ 50Kg} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \times \left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right) \quad (2.8)$$

$$E_{CONTACTO\ 70Kg} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \times \left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}\right) \quad (2.9)$$

Dónde:

$E_{PASO\ 50Kg}$ : Voltaje de paso para un peso corporal de 50 Kg.

$E_{PASO\ 70Kg}$ : Voltaje de paso para un peso corporal de 70 Kg.

$E_{CONTACTO\ 50Kg}$ : Voltaje de contacto para un peso corporal de 50 Kg.

$E_{CONTACTO\ 70Kg}$ : Voltaje de contacto para un peso corporal de 70 Kg.

$C_s$ : Factor de reducción de la capacidad nominal de la capa superficial.

$\rho_s$ : Resistividad del material superficial ( $\Omega\cdot m$ ).

$t_s$ : Duración del choque eléctrico.

#### 2.8.4 Perfiles de Voltaje.

Los perfiles de voltaje indican las diferencias de potencial que aparecen en el terreno cuando circula una corriente de falla a tierra en la malla, en porcentaje de la elevación del potencial de tierra o *Ground Potential Rise* (GPR), por sus siglas en inglés. Dependiendo de la zona del terreno donde se encuentre ubicada la persona puede ser diferente el valor de voltaje al que puede estar sometido. La norma IEEE 80- 2000 [1], en su apéndice F, explica ampliamente los diferentes casos que se pueden presentar [4].

En los conductores de la periferia de la malla a tierra la diferencia de potencial es más elevada, ya que en ellos la densidad de corriente es mayor. Los puntos centrales de las cuadrículas son zonas donde existe mayor diferencia de potencial, situación que se agrava si se trata de una cuadrícula ubicada en una esquina de la malla, considerándose entonces los puntos centrales de las cuadrículas en esquinas de la malla los puntos donde puede ocurrir a peor situación y el punto ubicado a una distancia de un metro en sentido diagonal de la esquina de la malla.

Las diferencias de potencial también dependen de la densidad de la malla, es decir, la cantidad de conductores en el área de la malla y el espaciamiento entre ellos. A menores dimensiones de las cuadrículas de la malla serán menores las diferencias de potencial que aparezcan en el terreno y la resistencia de la malla.

## 2.9 RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

Un sistema de tierra ideal debe tener una resistencia con respecto a la tierra remota cerca a cero. En la práctica, la elevación de potencial de tierra o Ground Potential Rise (GPR) en una subestación se incrementa proporcionalmente con la corriente de falla; mientras más grande sea la corriente, menor debe ser el valor de la resistencia total del sistema. Para la mayoría de subestaciones de un sistema de transmisión, la resistencia de tierra debe ser alrededor de  $1\Omega$  o menos. En subestaciones más pequeñas de distribución, el rango usualmente aceptado es de  $1\Omega$  a  $5\Omega$ , dependiendo del sitio [2].

Una vez que se construye un sistema de conexión a tierra, debe medirse la resistencia del mismo con la finalidad de comprobar que cumple con los valores exigidos. Por otro lado al verificar la integridad de un sistema de conexión a tierra, la resistencia de tierra es un indicador de cuan efectivo está el sistema para el retorno de las corrientes de falla. La prueba de medición de la resistencia a tierra no da información alguna sobre la seguridad que pueda ofrecer un SCT bajo una condición de falla, especialmente con referencia a los voltajes peligrosos que puedan aparecer en la superficie del terreno. Aún cuando el valor de la resistencia a tierra esté por debajo de los valores requeridos, puede darse el caso de que no cumpla con los límites de voltajes permitidos para la seguridad del personal y los equipos. En resumen:

¡ Un bajo valor de resistencia a tierra no garantiza la seguridad del personal en el terreno sobre el sistema de conexión a tierra o en sus inmediaciones !

Finalmente debido a los cambios que puedan ocurrir en el terreno y con fines de mantenimiento preventivo, se hace necesario medir periódicamente la resistencia a tierra para garantizar la adecuada conexión al terreno [11].

La norma [2] sugiere varios métodos para medir la resistencia del sistema de puesta a tierra, entre ellos:

- Método de dos puntos.
- Método de tres puntos.

- Método de la caída de potencial.

## **2.10 PROGRAMA CYMGRD PARA ANÁLISIS DE REDES DE TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.**

El programa CYMGRD es una aplicación de CYME International T&D que fue diseñado para realizar análisis y diseño de redes de tierra en subestaciones, sirviendo para optimizar el diseño de nuevas redes y reforzar las ya existentes. El programa sigue las premisas y criterios sugeridos por las normas IEEE80-2000 y 81-1983, realizando el estudio de cualquier configuración de redes de tierra, sean mallas simétricas o asimétricas de cualquier forma, las varillas de puesta a tierra se pueden colocar arbitrariamente. Realiza el cálculo de la elevación de potencial (GPR) y de la resistencia del sistema a tierra. Genera análisis de potenciales de paso, de contacto y de superficie. A continuación se resume una breve descripción de cada uno de los módulos que presenta el programa [4].

### **2.10.1 Módulo Análisis del suelo.**

En cuanto al modelo del terreno ofrece la opción entre el modelo de terreno uniforme o estratificado en dos capas. Entre métodos sugeridos por la norma [3] para la medición de la resistividad del terreno el programa sólo soporta el método Wenner. Para el cálculo del modelo óptimo y para minimizar el error medio cuadrático, usa técnicas de gradiente reducido. El término óptimo significa que el modelo de terreno que se deducirá será el que mejor encaje con las mediciones disponibles previamente introducidas. En los modelos estratificados en dos capas, el programa calcula la resistividad y espesor de las capas superior e inferior. La segunda capa se considera infinitamente profunda por lo que solo se muestra su resistividad. En cuanto al análisis de seguridad, se permite al usuario estimar la máxima tensión de paso y de contacto admisible, bajo condiciones específicas de superficie y de exposición. Los cálculos de evaluación de la seguridad respetan las prácticas normalizadas norteamericanas descritas en la norma [1]. Esta norma requiere los datos de peso corporal de la víctima de choque eléctrico (por omisión es 70kg, con una alternativa de 50kg). El espesor y la resistividad del material colocado sobre la superficie del suelo.

La resistividad del terreno de las capas superior e inferior y la duración del choque eléctrico cuyos valores típicos están en el rango de 0.25 segundo a 1 segundo.

### **2.10.2 Módulo Análisis de Malla.**

El módulo análisis de malla permite calcular la resistencia del sistema de puesta a tierra, la elevación del potencial de tierra (GPR) y los gradientes de potencial en la superficie del terreno. Estos resultados son necesarios para evaluar la conveniencia del diseño de la malla y la seguridad del personal que labora en el área. Generalmente, una subestación consta de dos o más barras, se debe identificar cada una de ellas con sus respectivos parámetros.

Para determinar el tamaño mínimo requerido del electrodo, se necesita conocer el factor de corrección (factor de decremento), los parámetros constantes del material del electrodo y el valor de la temperatura ambiental de la instalación. Luego de introducir los datos requeridos el programa genera un reporte que muestra los datos introducidos en el dimensionamiento del electrodo.

El programa clasifica los componentes de la malla en cinco categorías; los conductores de malla dispuestos simétricamente, los conductores de malla dispuestos asimétricamente y las varillas de puesta a tierra simétrica y asimétrica. Los conductores de malla dispuestos simétricamente son de forma rectangular con un número de conductores instalados a lo largo del eje largo y corto, creando así una malla. El programa supone que los conductores de malla dispuestos simétricamente están enterrados horizontalmente y orientados a lo largo de dos ejes perpendiculares (los ejes X e Y en la ventana gráfica). Se supone que la distancia entre los conductores es la misma a lo largo de cada eje pero la distancia del eje Y puede variar de la del eje X.

El conductor dispuesto asimétricamente es un conductor recto situado entre dos puntos definidos por las coordenadas  $(X1, Y1, Z1)$  Y  $(X2, Y2, Z2)$ . Los conductores asimétricos inclinados pueden ser representados con el modelo (coordenada Z). No es el caso de las disposiciones simétricas que se introducen con la misma profundidad de entierro  $(X,Y)$ . Cada conductor puede tener un diámetro diferente, lo que no es el caso en disposiciones simétricas que comparten un diámetro común. Las varillas, al igual que los electrodos se ubican de

acuerdo a sus coordenadas, la posición de las varillas es determinada por las coordenadas (X1, Y1, Z1).

Sobre la modelación de las estructuras de puesta a tierra el electrodo primario es la estructura de puesta a tierra que absorbe la corriente de falla. La hipótesis analítica que hace CYMGRD, basándose en las normas internacionales, es que el sistema entero de puesta a tierra que absorbe la corriente de falla y la difunde hacia el suelo elevándose a un solo potencial. Esta es la elevación de potencial de tierra calculado anteriormente. El programa supone que las estructuras de puesta a tierra poseen solo una resistencia (el programa no modela ningún componente reactivo en las mallas y estructuras de puesta a tierra).

### **2.10.3 Modulo de Graficado.**

El módulo de graficado sirve para calcular y visualizar los resultados del análisis de potencial de superficie, así como también evaluar los puntos de peligro en distintas zonas de la superficie y áreas de la subestación. Se generan, de acuerdo a la elección del usuario, representaciones en 2D y 3D ilustrando los contornos equipotenciales de contacto y superficie con el respectivo código de color. Los diagramas de potencial de paso y de contacto pueden generarse en direcciones lineares especificando los puntos inicial y final, así como también, el tamaño del paso. Cada vez que se genera un gráfico de contorno, el programa produce el reporte tabular correspondiente. Este reporte contiene, entre otros, el punto de máximo potencial encontrado dentro del área seleccionada. Este punto es interesante ya que representa para los contornos de tensión de contacto, el gradiente más escarpado encontrado en el análisis. Los diagramas de perfil son útiles cuando se desea que el análisis abarque solo un eje para evaluar los potenciales de contacto y de superficie y no toda el área de la malla o un simple punto de coordenada. Otra utilidad importante para generar estos diagramas es la evaluación de los potenciales de paso. El programa CYMGRD es una solución rápida y confiable, con su aplicación se optimiza gran cantidad de cálculo.

## CAPÍTULO III

### DESCRIPCIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA EXISTENTE EN LA SUBESTACIÓN TOVAR.

En este capítulo se dará una descripción detallada de la subestación Tovar y de su respectiva malla de puesta tierra, con el objeto de modelar y simular el sistema de puesta a tierra de la mencionada subestación mediante la herramienta computacional CYMGRD, y así evaluar su funcionamiento.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA SUBESTACIÓN TOVAR.

La subestación Tovar perteneciente a la Corporación Eléctrica Nacional Venezolana CORPOELEC, se encuentra ubicada en la población de Tovar estado Mérida, es una subestación de tipo Nodal II (115 TD) según las normas de clasificación de CADAPE 193-88, tiene una capacidad instalada de 76 MVA dividida en dos transformadores de 36 MVA cada uno, que reducen a niveles de tensión de 115kV a 34.5kV y de 115kV a 13.8kV. Es importante mencionar que el transformador de 115/34.5 kV de 36 MVA es una unidad móvil que se instaló el 23 de Mayo del 2017 debido que el anterior transformador de 115/34.5kV de 20 MVA presentó daños irreparables.

##### 3.1.1 Ubicación de la Subestación Tovar.

La subestación Tovar se encuentra ubicada en la parte baja del sector Sabaneta de la población Tovar del estado Mérida.



**Figura 3. 1. Ubicación de la Subestación Tovar, Edo Mérida.**

### 3.1.2 Áreas servidas.

A continuación se describen las zonas que se encarga de alimentar la subestación Tovar.

-Por el lado de 13.8 kV tenemos los siguientes circuitos:

- Salida 1: El Peñon.
- Salida 2: Bailadores.
- Salida 3: Hospital.
- Salida 4: Zea.

Es importante indicar que en este pórtico de 13.8 kV existe una barra de transferencia.

-Por el lado de 34.5 kV tenemos los siguientes circuitos:

- Salida 1: Reserva.
- Salida 2: Canagua.
- Salida 3: Santa Cruz

### 3.1.3 Impacto.

La subestación Tovar es la que alimenta de energía eléctrica a un conjunto de sectores de gran importancia, como lo son:

Salida 3 ( tensión de 13.8 kV): Hospital San José de Tovar el centro de salud más importante del municipio.

Salida 3 (tensión de 34.5 kV): Santa Cruz de Mora capital del municipio Antonio Pinto Salinas, la cual es una población con gran crecimiento económico y social [13].

### 3.1.4 Diagrama Unifilar.

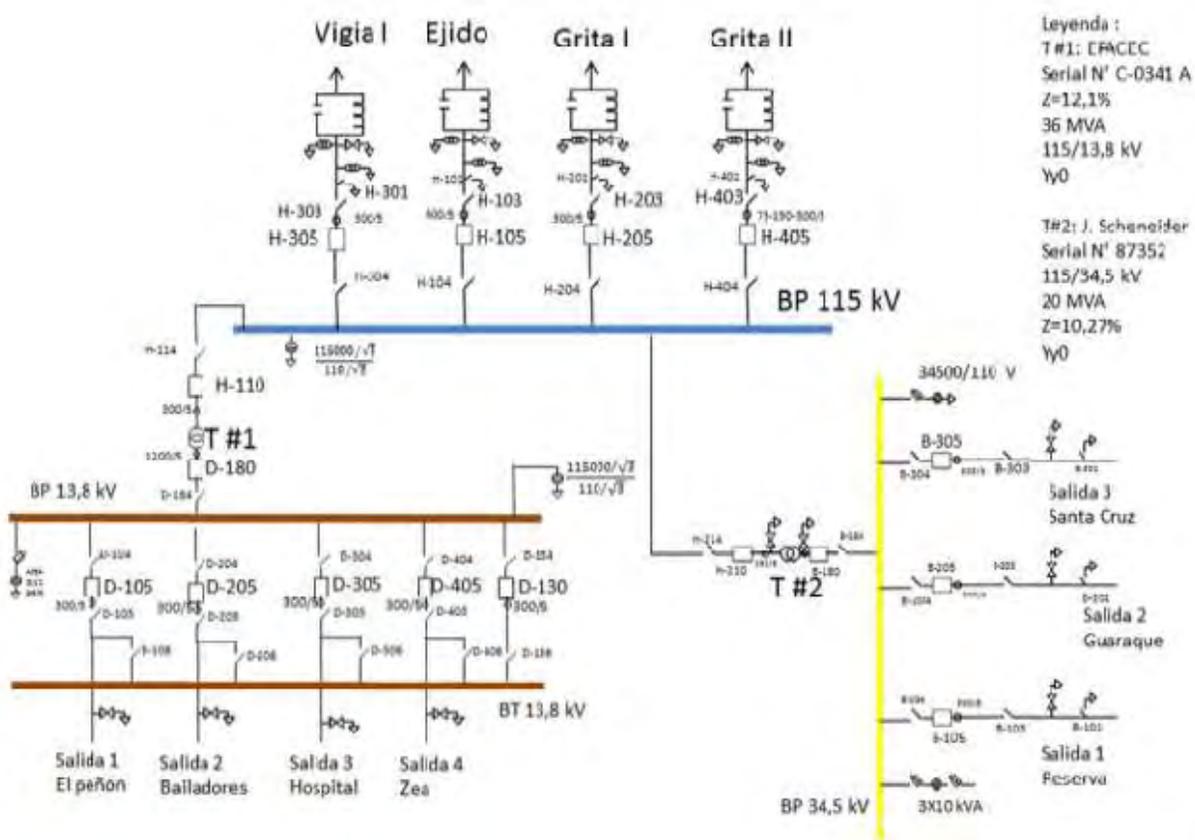


Figura 3. 2. Diagrama Unifilar [13].

### 3.1.5 Niveles de tensión.

- ✓ Nivel 115 kV.
  - Barra principal 115kV capacidad de corriente 600 a 800 A.
  - Llegada de línea de 115kV, siendo una subestación Nodal II.
  - Número de tramos de 115kV: 4.
  - Mando de disyuntores: Local y remoto.
  - Mando de seccionadores: Manual.
  
- ✓ Nivel 34.5 kV.
  - Barra principal 600 A: 1.
  - Número de tramos de 34.5kV: 4.
  - Número de tramos de salida de 34.5kV: 3.
  - Número de llegadas de transformador a barra: 1.
  - Número de tramos para servicios auxiliares: 1.
  - Mando de disyuntores: automático, manual y remoto.
  - Mando de seccionadores: Manual (tripolar).
  
- ✓ Nivel 13.8 kV.
  - 1 Barra principal, se encuentra al aire libre con una capacidad de 1200 A.
  - 1 Barra de transferencia con capacidad de 600 A.
  - Número de tramos de 13.8 kV: 4.
  - Número de tramos de salida de 13.8 kV: 4.
  - Número de llegadas de transformador a barra: 1.
  - Número de tramos de transferencia: 1.
  - Número de tramos para servicios auxiliares: 1.
  - Mando de disyuntores: automático, manual y remoto.
  - Mando de seccionadores: Manual (monopolares).

### **3.2 MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN TOVAR.**

Luego de una intensa búsqueda de en el Departamento de Mantenimiento de Subestaciones Mérida (Transmisión) sobre los planos de malla de puesta a tierra de la subestación Tovar, se halló un plano que data del año 1966 donde se especifica las fundaciones de los equipos en patio, la disposición de los conductores y el calibre de los conductores, este plano de malla de puesta a tierra fue diseñado para una subestación con niveles de tensión 115/13.8 kV con tres llegadas de líneas de alimentación en 115 kV denominadas en ese momento Vigía, Mérida y la Grita.

Debido a la demanda de las poblaciones adyacentes a la subestación se aumentó su capacidad, se encontró otro plano que data del año 1980 donde es aprobado el diseño de la malla de puesta a tierra de la ampliación de la subestación, se puede observar la malla de tierra del nuevo tramo de transformación de 115/34.5 kV, la disposición de los conductores, la conexión con la malla de tierra existente (la original), calibre del conductor, los tipos de conexión utilizados, las fundaciones de los equipos y las tanquillas donde se encuentran las barras Copperweld.

De igual manera se localizó un plano que fue diseñado en el año 1986 donde se emprende la ampliación de la malla de tierra para una nueva línea de llegada de alimentación en 115kV que se denominaría Grita II, este plano presenta una desventaja la cual es que no presenta las medidas y las distancias con un punto de referencia para determinar la posición exacta de la malla, sin embargo, este plano muestra fundaciones, el calibre del conductor y las conexiones utilizadas para la construcción de la ampliación de la malla. En la tabla 3.1 se muestran algunas características de la malla de tierra de la S/E Tovar.

**Tabla 3. 1 Características de la malla de la S/E Tovar.**

Área que cubre la malla en 115/13.8kV ( $m^2$ )	1500 aproximadamente
Área que cubre la malla en 115/34.5kV ( $m^2$ )	700 aproximadamente
Área que cubre la malla Ampliación en 115kV ( $m^2$ )	No se tiene información
Profundidad de la malla (m)	0.5
Conductor de la malla enterrada	Cobre desnudo calibre N° 1/0, 2/0 y 4/0 AWG
Barras Copperweld	5/8" de diámetro
Tipo de conexión entre conductores	Conectores atornillados y soldadura exotérmica auto fundente
Espesor de la capa de pedra picada (m)	0.10

www.bdigital.ula.ve

En el presente capítulo se dio conocer la estructura funcional de la subestación y su importancia para la comunidad a la que suministra energía eléctrica; así como también se manifestó las diferentes modificaciones a la malla de puesta a tierra de acuerdo al aumento de la capacidad de la subestación. Gracias a la información recaudada tanto en los planos como en el campo sobre las características específicas de la construcción de la malla de puesta a tierra se puede lograr un análisis más acertado de la misma.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA.

En este capítulo se modela todos los elementos y parámetros que conforman el sistema de conexión a tierra mediante el programa CYMGRD.

#### 4.1 ANÁLISIS DEL SUELO.

Lo más importante para realizar un análisis del suelo era medir su resistividad, la cual se realizó utilizando el método Wenner ó también conocido el método de los cuatro puntos, es un método recomendado por la norma [3] que puede ser ejecutado por cualquier persona con conocimientos básicos en sistemas de puesta a tierra y además el programa CYMGRD sólo soporta este método. Luego de tener definido el método a utilizar, se procedió a las mediciones en campo utilizando un Megger digital ó Telurómetro perteneciente a la Universidad de Los Andes, el mencionado instrumento solo muestra en pantalla valores de resistencia y se calcula la resistividad aplicando la ecuación (2.2). Algunas acotaciones importantes al momento de tomar las medidas es que realizaron en el mes de Junio del presente año en horas de la mañana con una temperatura ambiente de 23 °C, los instrumentos utilizados para las mediciones en campo se muestran en la Figura 4.1.



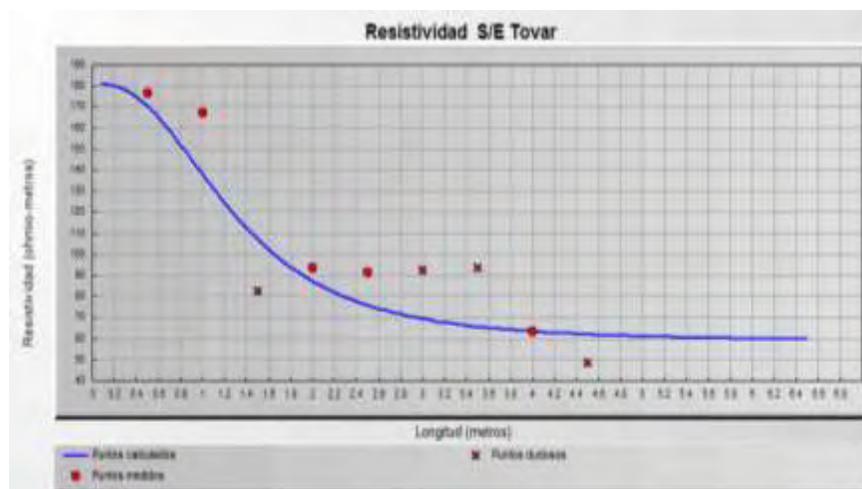
**Figura 4. 1. Instrumentos utilizados para las mediciones en campo.**

Las resistencia medida por el telurómetro y resistividad aparente calculada por la ecuación 2.2 se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4. 1. Medidas tomadas en campo con el Megger.**

Distancias "a" (m)	Resistencia ( $\Omega$ )	Resistividad ( $\Omega$ -m)
0.5	56.1	176.2433
1	26.6	167.1327
1.5	8.72	82.1841
2	7.43	93.3681
2.5	5.8	91.1062
3	4.9	92.3628
3.5	4.23	93.0226
4	2.51	63.0832
4.5	1.7	48.0664

Luego los datos expresados anteriormente en la Tabla 4.1 de la distancia entre electrodos "a" y los respectivos valores de resistividad se introdujeron en el Módulo de Análisis del Suelo en el programa CYMGRD, para determinar un modelo de terreno que se aproxime a las características de resistividad mediante estratos horizontales. El gráfico 4.1 muestra la curva de análisis del suelo usando CYMGRD.



**Gráfico 4. 1. Curva del análisis del suelo (programa CYMGRD).**

En esta curva se puede observar la distancia entre los electrodos con sus respectivos valores de resistividad, los puntos mostrados con una equis (x) son mediciones que se desvían de los errores medios cuadráticos, estas mediciones se pueden tomar o descartarse, para este estudio se van a tomar en cuenta todas las medidas. La curva resultante representa un suelo de dos estratos o conocido también como un suelo biestratificado.

En la tabla 4.2 se puede observar el reporte del análisis del suelo, donde se pueden observar algunos parámetros importantes para el análisis y, en los resultados de salida se muestran información como el espesor de la capa superior, resistividad de la capa superior e inferior, tensión de contacto y de choque. Es importante mencionar que en el módulo de análisis de suelo del programa CYMGRD se introdujeron los siguientes datos de entrada: un valor promedio de la capa superficial de 0.2 metros, peso corporal de 50 Kg y una duración del choque de 0.5 segundos.

**Tabla 4. 2 Reporte del análisis del suelo.**

Reporte del análisis del suelo	Thursday, June 22, 2017, 4:23:20
Nombre de la subestación	TOVAR
Proyecto	Tovar programa
Estudio	Tovar. Prueba 1
<b>Parámetros</b>	
Título	Resistividad S/E Tovar
Modelo de suelo	Estratificado en dos capas
Modelo securitario	IEEE Std 80-2000
Espesor de la capa superficial	0.2 metros
Resistividad de la capa superficial	2500 ohm-m
Duración del choque eléctrico	0.5 secs
Peso corporal	50 kg
<b>Resultados de salida</b>	
Espesor de la capa superior	0.84 metros
Resisividad de la capa superior	180.8 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	57.84 ohm-m
Tensión máxima de contacto	674.41 voltios
Tensión máxima de paso	2205.5 voltios
Factor Cs de reducción	0.82961
<b>Valores puestos en tabla</b>	
Error RMS	20.77%

**Tabla 4.2 Reporte del análisis del suelo (continuación).**

Distancia sondas (metros)	Resistividad medida (ohm-m)	Resistividad calculada (ohm-m)	Error (%)
0.5	176.2433	170.55	-3.23
1	167.1327	137.68	-17.62
1.5	82.1841	107.13	30.35
2	93.3681	87.36	-6.44
2.5	91.1062	75.9	-16.7
3	92.3628	69.38	-24.89
3.5	93.0226	65.6	-29.48
4	63.0832	63.33	0.39
4.5	48.0664	61.91	28.79

Fuente: Datos del Simulador CYMGRD.

En este reporte, los valores puestos en tabla muestra el valor en cada punto y los respectivos errores medios cuadráticos, los resultados en rojo muestra los posibles puntos dudosos que se observan en la curva del modelo de la resistividad del suelo.

## 4.2 PARÁMETROS DE CORTOCIRCUITO EN LA SUBESTACIÓN TOVAR.

Por medio de un estudio realizado [12] se determinaron los valores máximos de las corrientes de cortocircuito de cada una de las subestaciones del Estado Mérida, en concordancia con la norma IEC 60909-0 (2001) y se efectuó a través del software Power Factory. En dicho estudio se encuentran los valores de las corrientes de cortocircuito de las barras de 115/ 34.5/ 13.8 kV de la subestación Tovar, los cuales son necesarios para el análisis de la malla de la subestación y generar el digrama de contorno de potencial en el programa CYMGRD, estos valores son presentados en la tabla 4.3.

**Tabla 4. 3. Parámetros de cortocircuito de las barras de la Subestación Tovar [12].**

Nombre	Tensión nominal	$I_k''$	$I_k''$	$S_k''$	$I_{ch}$	X/R razón (pico)
		kV	kA	Ángulo Deg	MVA	
Tovar 115 kV	115	5.862	-76.142	1167.539	12.440	4.212
Tovar 34.5 kV	34.5	3.082	-87.835	184.144	8.269	27.153
Tovar 13.8 kV	13.8	10.969	-86.917	262.190	28.813	19.074

Los datos de corrientes de cortocircuito presentados en la tabla 4.3 fueron calculados para una capacidad de 56 MVA repartidos en dos transformadores, un transformador de 115/34.5 kV de 20 MVA y un transformador de 115/13.8 kV de 36 MVA. Como se mencionó anteriormente el transformador de 115/34.5 kV salió de servicio y en su lugar se instaló una subestación móvil que es utilizada para emergencias, mientras que se repone el transformador anterior; es decir, que la capacidad instalada puede variar y por lo tanto las corrientes de cortocircuito también se modifican.

### 4.3 ANÁLISIS DE LA MALLA DE LA SUBESTACIÓN TOVAR.

Por medio de planos existentes de la subestación se pudo tener conocimiento sobre la configuración de la malla de puesta a tierra y por ende se obtuvo información sobre las modificaciones que ha presentado. La malla de puesta a tierra está formada por conductores de calibre 1/0, 2/0 y 4/0, cuyo diámetros son de 9.45 mm, 10.6 mm y 13.462 mm respectivamente, la ubicación de los conductores está representado por coordenadas del punto inicial (X1, Y1 ,Z1) y el punto final (X2, Y2 ,Z2) de cada uno de los conductores introducidas

en el programa CYMGRD, en el anexo A3 se puede visualizar las mencionadas coordenadas. La malla cuenta con cuatro barras Copperweld de una longitud de 3.04 m y su ubicación se puede observar en el anexo A4. En la figura 4.2 se muestra la configuración total existente de la subestación en una vista en 2D y 3D.

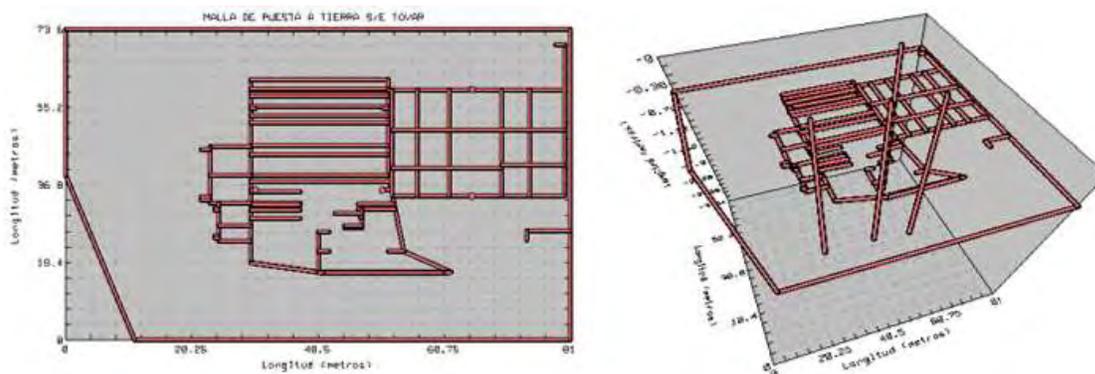


Figura 4. 2. Configuración de la malla de puesta a tierra de la S/E Tovar.

Tabla 4. 4 Reporte de análisis de la malla, S/E Tovar.

Reporte de análisis de la malla										Thursday, October 12, 2017, 05:47:44
Nombre de la subestación		MALLA DE PUESTA A TIERRA S/E TOVAR.								
Proyecto		Malla de puesta a tierra Sub. Tovar								
Estudio		Simulación Tovar								
<b>Parámetros</b>										
Spec. Z paralelo equivalente		Z infinito								
Frecuencia nominal		60 hz								
Nombre de la barra		Barra 13.8 kV								
Corriente de falla LG		10969 amps								
Contribución a distancia		100 %								
Espesor de la capa superior		0.84 metros								
Resistividad de la capa superior		180.6 ohm-m								
Resistividad de la capa inferior		57.84 ohm-m								
<b>Resultados de salida</b>										
<b>Elementos del electrodo primario</b>										
X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Longitud	Radio	Corriente	Electrodo	
			(metros)				(mm)	(amps)	(#)	
11	0	0.5	81	0	0.5	70	4.7	1146.0723	Asy_1	
11	0	0.5	0	39	0.5	40.5216	4.7	679.0662	Asy_2	
0	39	0.5	0	73.6	0.5	34.6	4.7	594.6528	Asy_3	
0	73.6	0.5	81	73.6	0.5	81	4.7	1232.3211	Asy_4	
81	73.6	0.5	81	0	0.5	73.6	4.7	940.8686	Asy_5	
29.6	18.4	0.5	29.6	61.8	0.5	43.4	6.7	343.4719	Asy_6	
29.6	61.8	0.5	51.8	61.8	0.5	22.2	6.7	210.3838	Asy_7	
51.8	61.8	0.5	51.8	39	0.5	22.8	6.7	101.1982	Asy_8	
51.8	39	0.5	54.2	21	0.5	18.1593	6.7	129.7256	Asy_9	
54.2	21	0.5	61.8	16.2	0.5	8.9889	6.7	97.097	Asy_10	
61.8	16.2	0.5	40.6	16.2	0.5	21.2	6.7	190.4195	Asy_11	
40.6	16.2	0.5	29.6	18.4	0.5	11.2178	6.7	136.8871	Asy_12	
29.6	59.6	0.5	51.8	59.6	0.5	22.2	5.3	151.0017	Asy_13	
29.6	58.2	0.5	51.8	58.2	0.5	22.2	5.3	114.7779	Asy_14	
29.6	57.8	0.5	51.8	57.8	0.5	22.2	5.3	115.8029	Asy_15	
29.6	55.4	0.5	51.8	55.4	0.5	22.2	5.3	137.7195	Asy_16	
29.6	55	0.5	30.4	55	0.5	0.8	5.3	5.5986	Asy_17	
51	55	0.5	51.8	55	0.5	0.8	5.3	2.7886	Asy_18	
29.6	53.2	0.5	51.8	53.2	0.5	22.2	5.3	134.1401	Asy_19	
29.6	51.6	0.5	51.8	51.6	0.5	22.2	6.7	147.4629	Asy_20	
29.6	46.2	0.5	51.8	46.2	0.5	22.2	5.3	145.5474	Asy_21	
29.6	44	0.5	51.8	44	0.5	22.2	5.3	144.4773	Asy_22	
29.6	39	0.5	51.8	39	0.5	22.2	6.7	138.9604	Asy_23	

Tabla 4.4 Reporte de análisis de la malla, S/E Tovar (continuación).

29.6	37.6	0.5	52	37.6	0.5	22.4	5.3	131.2452	Asy 24
29.6	35.6	0.5	30.4	35.6	0.5	0.8	5.3	1.1766	Asy 25
50.8	35.6	0.5	52.22	35.6	0.5	1.42	5.3	3.2043	Asy 26
29.6	35.2	0.5	37.6	35.2	0.5	8	5.3	46.652	Asy 27
29.6	32.6	0.5	37.6	32.6	0.5	8	5.3	42.3526	Asy 28
29.6	32	0.5	37.6	32	0.5	8	5.3	41.6632	Asy 29
29.6	30.8	0.5	37.6	30.8	0.5	8	5.3	50.2806	Asy 30
29.6	28.8	0.5	37.6	28.8	0.5	8	5.3	62.6843	Asy 31
40.6	16.2	0.5	40.6	25.6	0.5	9.4	5.3	88.3564	Asy 32
40.6	25.6	0.5	42.2	25.6	0.5	1.6	5.3	16.0136	Asy 33
40.6	21	0.5	42.2	21	0.5	1.6	5.3	15.1897	Asy 34
54.2	21	0.5	51.8	21	0.5	2.4	5.3	24.56	Asy 35
47	32.2	0.5	52.68	32.2	0.5	5.68	6.7	35.8251	Asy 36
47	31	0.5	52.8	31	0.5	5.8	6.7	37.4964	Asy 37
47.6	31	0.5	47.6	26.6	0.5	4.4	6.7	29.0027	Asy 38
44.8	26.6	0.5	47.6	26.6	0.5	2.8	5.3	22.8268	Asy 39
43.2	30	0.5	47.6	30	0.5	4.4	5.3	34.2671	Asy 40
44.8	27.2	0.5	47.6	27.2	0.5	2.8	5.3	20.8411	Asy 41
47.2	29	0.5	47.6	29	0.5	0.4	5.3	2.5275	Asy 42
41.4	15.8	0.5	61	15.8	0.5	19.6	5.3	174.076	Asy 43
40.6	16.2	0.5	41.4	15.8	0.5	0.8944	5.3	5.4962	Asy 44
61.8	16.2	0.5	61	15.8	0.5	0.8944	5.3	7.8681	Asy 45
74	25.8	0.5	81	25.8	0.5	7	4.7	86.4842	Asy 46
74	25.8	0.5	74	23.6	0.5	2.2	4.7	30.2092	Asy 47
51.82	59.4	0.5	80.05	59.4	0.5	28.23	6.7	258.1261	Asy 48
80.05	70	0.5	80.05	34.2	0.5	35.8	6.7	342.0594	Asy 49
78.65	70	0.5	80.05	70	0.5	1.4	6.7	21.7692	Asy 50

80.05	34.2	0.5	52.398	34.2	0.5	27.652	6.7	232.8941	Asy 51
74.45	59.4	0.5	74.45	34.2	0.5	25.2	6.7	222.6268	Asy 52
70	59.4	0.5	70	34.2	0.5	25.2	6.7	210.0615	Asy 53
61.6	59.4	0.5	61.6	34.2	0.5	25.2	6.7	187.1278	Asy 54
56.4	59.4	0.5	56.4	34.2	0.5	25.2	6.7	162.3725	Asy 55
52.4	59.4	0.5	52.4	34.2	0.5	25.2	6.7	109.9839	Asy 56
52.4	49.8	0.5	80.05	49.8	0.5	27.65	6.7	195.1352	Asy 57
52.4	40.8	0.5	70	40.8	0.5	17.6	6.7	113.3794	Asy 58
70	41.6	0.5	80.05	41.6	0.5	10.05	6.7	76.8431	Asy 59
23.2	46	0.5	29.6	46	0.5	6.4	6.7	61.3562	Asy 60
23.2	46	0.5	23.2	32.6	0.5	13.4	6.7	135.5261	Asy 61
23.2	32.6	0.5	29.6	32.6	0.5	6.4	6.7	46.9132	Asy 62
23.2	39	0.5	29.6	39	0.5	6.4	6.7	51.6581	Asy 63
24.6	32.6	0.5	24.6	23.4	0.5	9.2	6.7	86.9497	Asy 64
24.6	23.4	0.5	29.6	23.4	0.5	5	6.7	55.2591	Asy 65
24.6	27.2	0.5	29.6	27.2	0.5	5	6.7	44.387	Asy 66
21.8	45.2	0.5	23.2	45.2	0.5	1.4	5.3	15.7279	Asy 67
21.8	34	0.5	23.2	34	0.5	1.4	5.3	12.7442	Asy 68
21.8	33.2	0.5	23.2	33.2	0.5	1.4	5.3	12.9023	Asy 69
24	31.2	0.5	24.6	31.2	0.5	0.6	5.3	4.2804	Asy 70
24	30.8	0.5	24.6	30.8	0.5	0.6	5.3	4.5288	Asy 71
24	24.8	0.5	24.6	24.8	0.5	0.6	5.3	6.0903	Asy 72
24	24.2	0.5	24.6	24.2	0.5	0.6	5.3	6.3055	Asy 73

Longitud total de los conductores primarios								1118.36 metros	
65.2	34.2	0	65.2	34.2	0.84	0.84	8	3.3643	Asy 1
65.2	34.2	0.84	65.2	34.2	3.04	2.2	8	65.0293	Asy 1
65.2	59.4	0	65.2	59.4	0.84	0.84	8	3.6946	Asy 2
65.2	59.4	0.84	65.2	59.4	3.04	2.2	8	70.8605	Asy 2
50.8	35.6	0	50.8	35.6	0.84	0.84	8	3.3067	Asy 3
50.8	35.6	0.84	50.8	35.6	3.04	2.2	8	44.2508	Asy 3
30.4	35.6	0	30.4	35.6	0.84	0.84	8	2.3409	Asy 4
30.4	35.6	0.84	30.4	35.6	3.04	2.2	8	48.1204	Asy 4
Longitud total de las varillas primarias								12.16 metros	
Número total de elementos	81								
Elevación del potencial de tierra	6024.26 voltios								
Resistencia de tierra calculada	0.523393 ohmios								
Impedancia equivalente	0.523366 ohmios								

Fuente: Datos del Simulador CYMGRD

El reporte que arroja el programa CYMGRD de la tabla 4.4 muestra la frecuencia con la que se trabaja, el nombre de la barra que ha seleccionado el simulador con su respectiva corriente, debido que el programa toma la mayor corriente de cortocircuito que presenta la subestación. De igual forma se puede evidenciar en el reporte una lista de las coordenadas de cada uno de los conductores con su referida corriente que emiten a tierra. En la parte inferior del reporte se señala el valor de la resistencia calculada, donde presenta un valor dentro de los límites que establece la norma, como se explicó en el Capítulo II.

$$R_{\text{malla,Tovar}} = 0.523393 \Omega < 1\Omega$$

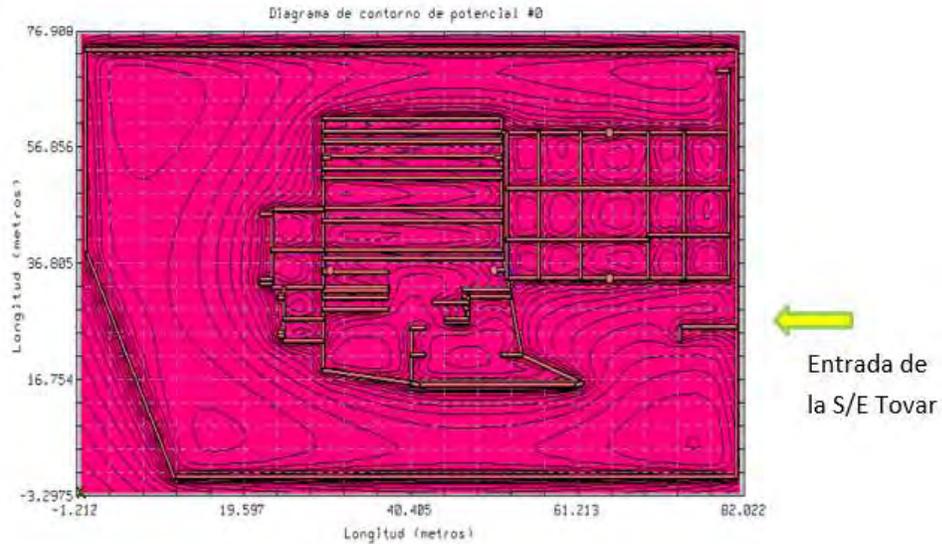
#### **4.3.1 Diagramas de Contorno de Potencial de Contacto y Superficie, S/E Tovar.**

La malla de la subestación Tovar está formada por conductores de diferentes calibres (1/0, 2/0 y 4/0), los cuales forman una configuración de la malla en su mayoría asimétrica como se muestra en la figura 4.2, de igual manera es importante mencionar que cuenta con cuatro barras Copperweld de 3.04 m de longitud. Debido a las características antes mencionadas y con los datos de corriente de cortocircuito mostrados en la tabla 4.3 el programa genera los diagramas de potencial de contacto y superficie en las inmediaciones de la malla.

##### **✓ Diagrama de Contorno de Contacto.**

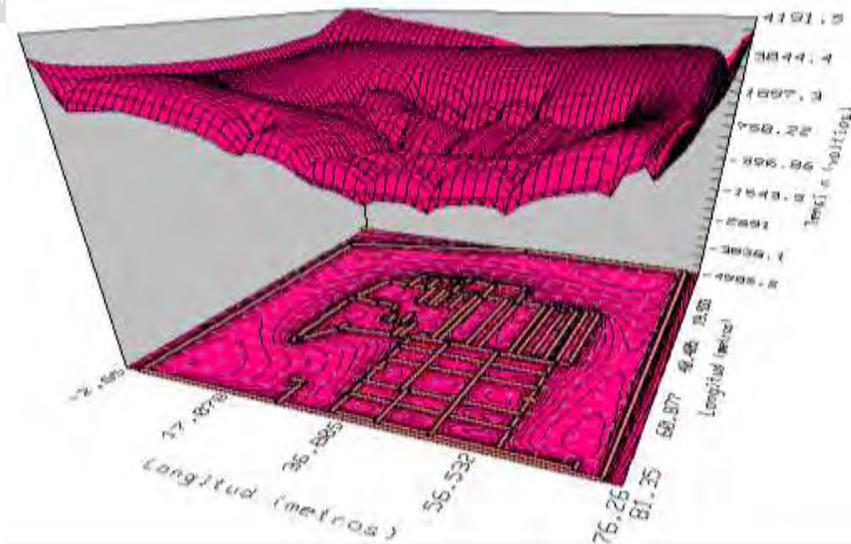
En el momento en que se genera un gráfico de contorno, el programa produce el reporte tabular correspondiente. Este reporte contiene, el punto de máximo potencial encontrado dentro del área seleccionada. Este punto es interesante ya que representa para los contornos de tensión de contacto, el gradiente más escarpado encontrado en el análisis. El mismo punto se indica con una cruz amarilla en el gráfico de contorno, en la figura 4.3 y la figura 4.4.

En la figura 4.3 se puede observar la cruz amarilla en el lateral opuesto de la entrada de la subestación, en la parte inferior de la mencionada figura.

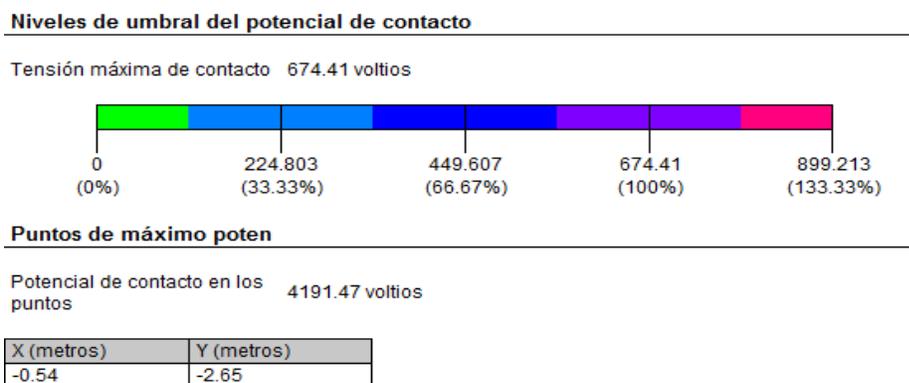


**Figura 4. 3. Diagrama de Potenciales de Contacto 2D, S/E Tovar.**

En la figura 4.4 se puede visualizar el punto de máximo potencial de contacto alcanzado a 4191.5 V



**Figura 4. 4. Diagrama de Potencial de Contacto en 3D, S/E Tovar.**



**Figura 4. 5. Reporte de Contorno de Potencial de Contacto, S/E Tovar.**

El programa considera cuatro umbrales para los potenciales de contacto y cuatro para los potenciales de superficie. Los umbrales considerados de potenciales de contacto son 25%, 50%, 75% y 100% de la máxima tensión de contacto admisible. Cualquier valor superior a la máxima tensión de contacto admisible aparece en rojo designado las áreas de peligro. En el reporte de contorno de potencial que se muestra en la figura 4.5, se indica que la tensión máxima de contacto para la subestación Tovar es de 674.41 voltios.

En las figuras 4.3 y 4.4, se puede percibir que el área total de la subestación presenta el color rojo de manera uniforme, lo cual indica que supera la tensión máxima de contacto permitida.

✓ **Diagrama de Contorno de Superficie.**

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran la elevación de potencial de tierra (GPR) de la malla cuando se le inyecta la máxima corriente de falla que puede existir en la subestación. El sistema eleva su potencial (GPR) respecto a una referencia muy lejana.

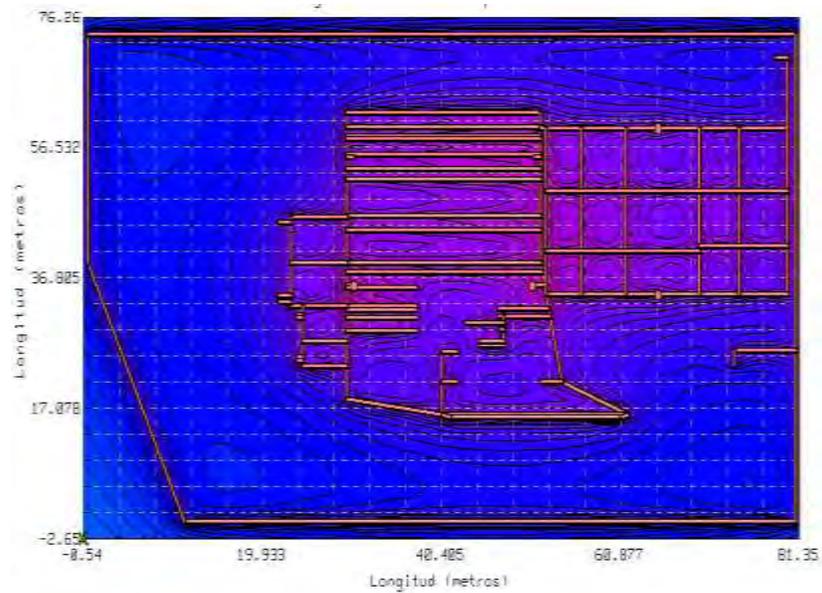


Figura 4. 6. Diagrama de potencial de superficie 2D, S/E Tovar.

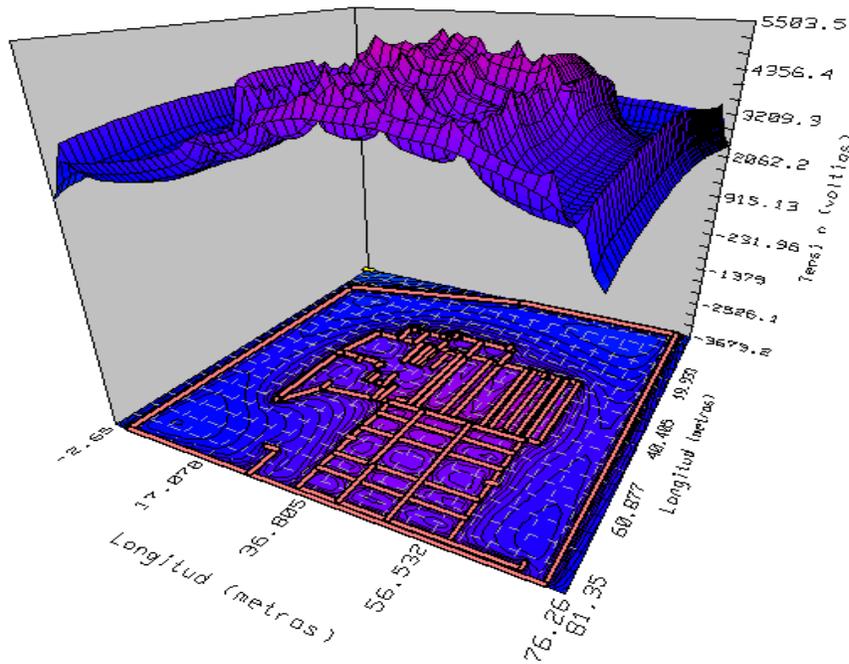
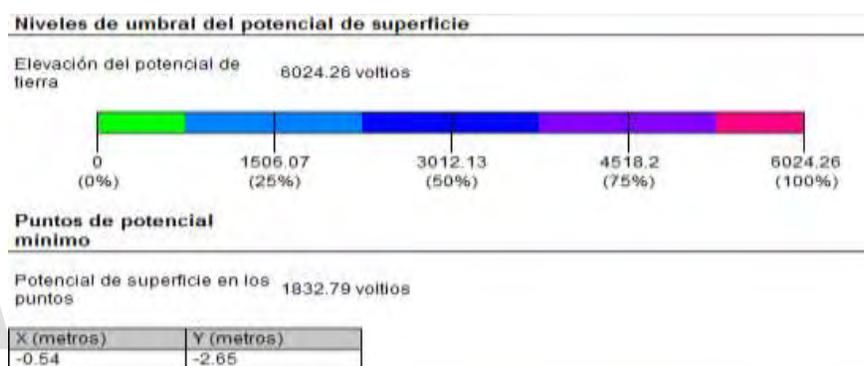


Figura 4. 7. Diagrama de potencial de superficie en 3D, S/E Tovar.

En el reporte generado para el potencial de superficie mostrado en la figura 4.8, se observa que al momento que ocurre una falla en la subestación se eleva el potencial de tierra a 6024.26 voltios, es decir, excede en pequeña proporción el admitido, es por ello que se denotan algunos matices de color rojo en las figuras 4.6 y 4.7. De igual forma en el reporte se puede observar el potencial de superficie mínimo que es de 1832.79 voltios.

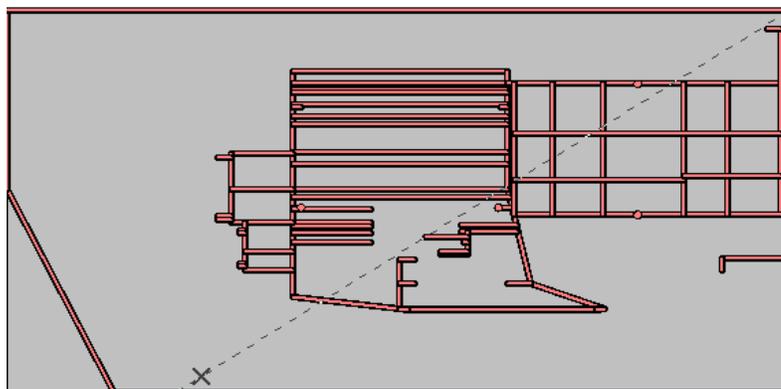
Un aspecto importante entre el digrama de contorno de potencial y el diagrama de potencial de superficie es que presentan modelos de estrés invertidos, esto se debe a que las áreas con alto potencial de contacto se caracterizan por tener bajos potenciales de superficie.



**Figura 4. 8. Reporte de contorno de potencial de superficie, S/E Tovar.**

✓ **Diagrama de perfil de potencial.**

El diagrama de perfil permite representar un análisis que abarca un solo eje para evaluar los potenciales de contacto y de superficie y no toda el área de la malla o un simple punto de coordenada, asimismo dicho digrama genera una evaluación de los potenciales de paso.



**Figura 4. 9. Diagrama de perfil de potencial.**

La figura 4.9 muestra la dirección que se eligió para generar el diagrama de perfil, debido a que en esa dirección se formó el gradiente de potencial y de superficie más encarpado. Luego de definir la dirección en la simulación se muestra un cuadro para establecer los parámetros del perfil, en el mismo, se define el tamaño del paso para las evaluaciones de potencial de paso. El intervalo de paso define la distancia entre los pies de la víctima de un potencial choque eléctrico, el cual la norma [3] establece que debe cumplir con un metro de separación entre los pies de la persona.



**Gráfico 4. 2. Diagrama de perfil de potencial, S/E Tovar.**

En el gráfico 4.2 se indican las curvas de los potenciales de contacto, de paso y de superficie, distinguiéndose por su color azul, verde y rojo respectivamente. Las curvas segmentadas con los mismos colores pertenecen a los valores limitativos; es decir la elevación de potencial de tierra y los valores máximos admisibles, que resultan de los análisis que arroja el programa.

<b>Niveles de umbral del potencial de contacto</b>	
Elevación del potencial de tierra	6024.26 voltios
Tensión máxima de paso	2205.5 voltios
Tensión máxima de contacto	674.41 voltios
<b>Puntos de máximo potencial</b>	
Potenciales de superficie	5346.19 voltios
Potenciales de paso	645.51 voltios
Potenciales de contacto	3234.57 voltios

**Figura 4. 10. Reporte de perfil de potencial, S/E Tovar.**

En el reporte de perfil de potencial se establecen los niveles umbrales de los potenciales y los puntos de máximo potencial de cada uno de ellos.

Es de gran importancia hacer énfasis que por medio del programa CYMGRD, se logró determinar que el terreno donde se encuentra la subestación Tovar es un suelo de dos estratos, y conjuntamente con la configuración que presenta la malla y la alta corriente de cortocircuito presente en la barra de 13,8 kV de la subestación resultó que las tensiones de contacto excediera el límite máximo permitido. En conclusión, toda el área de la subestación presenta tensiones de contacto peligrosas para el personal que la labora en dichas instalaciones.

## CAPÍTULO V

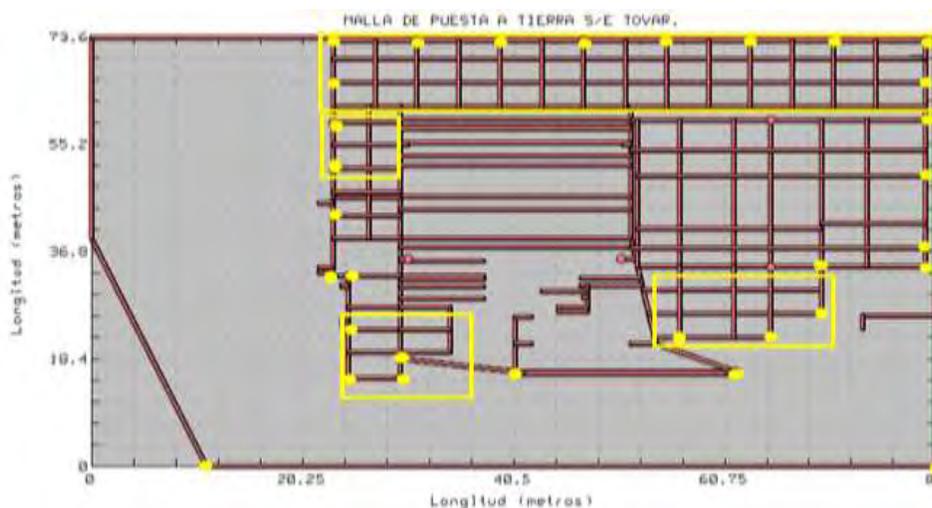
### PROPUESTA DE MEJORA A LA MALLA DE TIERRA DE LA SUBESTACIÓN TOVAR.

Conforme a los resultados obtenidos en el capítulo anterior, específicamente en los del digrama de contorno de contacto donde se muestra un alto potencial de contacto que presenta la subestación, dicha condición es un gran riesgo para las personas que se encuentren en la subestación o en sus adyacencias al momento de ocurrir una falla. La propuesta que se plantea en este capítulo para mejorar la malla de tierra es la de anexar conductores de tal manera que formen una cuadrícula uniforme en zonas de la subestación donde carecía de los mismos, por otra parte se propone la instalación de barras copperweld en la periferia de la malla.

#### 5.1 MEJORA A LA MALLA

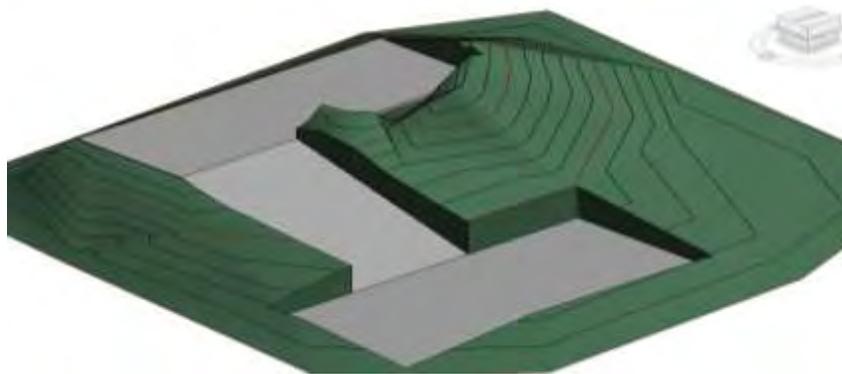
Con el fin de mejorar la malla de tierra de la subestación Tovar se propone incorporar conductores espaciados de manera uniforme para formar una cuadrícula equilibrada, en la figura 5.1 se puede observar cuatro cuadros amarillos que representa el conjunto de conductores que se anexaron en zonas específicas a la malla existente. Los puntos amarillos que se muestran en la mencionada figura representan las barras Copperweld que se añadieron en la periferia de la malla y los cuatro puntos rojos que allí se manifiestan son cuatro barras Copperweld que presenta la malla existente. Para la instalación de las barras copperweld de 5/8" y 2.4m de longitud se consideran las recomendaciones de la norma IEEE 80-2000 [1], que expresa que se coloque un electrodo en cada esquina de la malla y luego de manera

intercalada a lo largo de la periferia, clavadas verticalmente. Se recomienda utilizar conectores del tipo auto fundente.



**Figura 5. 1. Mejora de la malla de puesta a tierra de la S/E Tovar.**

La subestación Tovar manifiesta en su terreno una característica importante la cual es que presenta dos niveles de terreno, en el lado derecho de la figura 5.1 en donde se encuentra la malla de tierra es un plano nivelado a una cierta altura y es allí donde se encuentran todos los equipos instalados y en funcionamiento que conforman la subestación; ahora en la parte izquierda de la figura 5.1 no se encuentra malla existente y tampoco se incorporaron conductores en el diseño planteado, esta superficie de terreno presenta otro nivel de altura con respecto al mencionado anteriormente y en esta zona no se encuentra ningún equipo. En el gráfico 5.1 muestra una representación de lo que se quiere explicar cuando se hace referencia de que en la subestación se manifiestan dos niveles de terreno. Para evaluar la propuesta de la mejora de la malla se usa la herramienta CYMGRD.



**Gráfico 5. 1. Terreno con dos plataformas de diferentes alturas.**

## 5.2 VERIFICACIÓN DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR

La norma IEEE80-2000 [1] recomienda como conductor mínimo el de calibre 4/0 AWG de cobre desnudo.

Los datos del conductor 4/0 AWG se encuentran en la tabla 1 de la sección 11.3 de la norma IEEE80-2000 [1].

- Diámetro ( $d_c$ )= 13,462 mm.
- Sección ( $A$ )= 107,3 mm<sup>2</sup>.
- $t_s$ = 0,5 s
- TCAP= 3,42
- $\rho_r$  (20 °C)= 1,78
- $\alpha_r$  (20 °C)= 0,00381
- $K_o$ =242
- $T_a$ =40 °C
- $T_m$ = 450 °C

Con los parámetros de la malla y los datos del conductor se procede a verificar que la elección del conductor 4/0 AWG sea capaz de soportar la corriente de falla que circulará por el

mismo, para este cálculo se hace uso de la ecuación 2.5 indicada por la norma [1] y descrita en el Capítulo 2 de este trabajo.

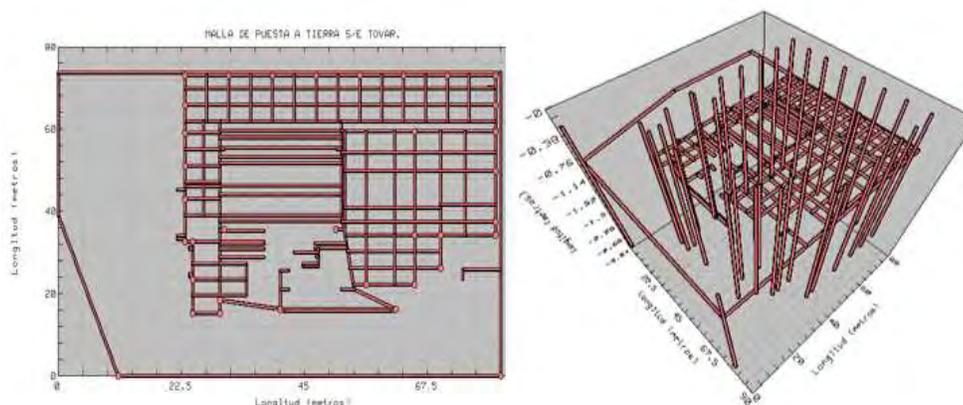
$$I = A_{mm^2} \sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c * \alpha_r * \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)} = 107,3 \sqrt{\left(\frac{3,42 \times 10^{-4}}{0,5 * 1,78 * 0,00381}\right) \ln\left(\frac{234 + 450}{234 + 40}\right)}$$

$$I = 32,59 \text{ kA} > 10,969 \text{ kA}$$

La corriente que soporta el conductor de calibre 4/0 AWG es mayor al de la corriente de falla máxima en la barra de 13,8 kV de la S/E Tovar, por lo tanto el conductor es adecuado para el diseño. Al comparar ambas corrientes se podría asumir sobredimensionado pero se debe tener en cuenta que el conductor 4/0 AWG aporta la resistencia mecánica necesaria para soportar las condiciones de una malla enterrada.

### 5.3 ANÁLISIS DE LA MALLA

Se introducen en el programa CYMGRD los conductores que se anexan a la malla existente con sus respectivas coordenadas y del igual forma se introducen las coordenadas de las varillas verticales que se incorporaron en el perímetro de la malla, como se muestra en la figura 5.2, con el fin de generar el reporte del análisis de la malla mejorada, se consideraron conductores de calibre 4/0 AWG cuyo diámetro es de 13,462 mm de cobre recocido duro al 97%. Los parámetros del terreno siguen siendo los mismos, así como también los valores de las corrientes de cortocircuito de las barras de la subestación.



**Figura 5. 2. Malla modificada, propuesta para la mejora de la malla de puesta a tierra de S/E Tovar.**

**Tabla 5. 1. Reporte del análisis de la Malla Modificada de la S/E Tovar.**

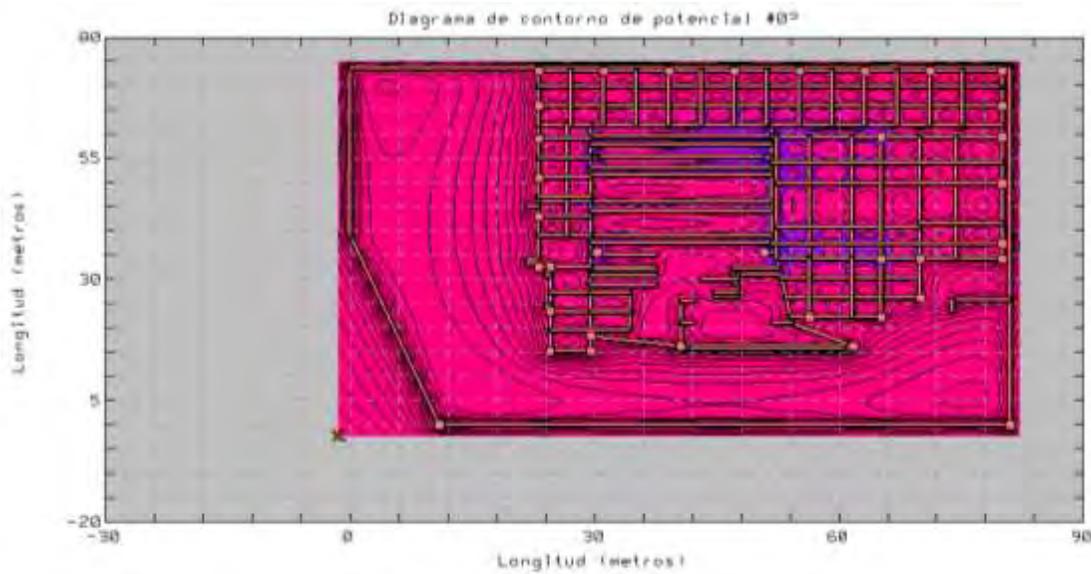
Reporte de análisis de la malla		Thursday, October 12, 2017, 05:00:13
Nombre de la subestación	MALLA DE PUESTA A TIERRA S/E TOVAR.	
Proyecto	malla mejorada Sub. Tovar	
Estudio	Simulación Tovar	
<b>Parámetros</b>		
Spec. Z paralelo equivalente	Z infinito	
Frecuencia nominal	60 hz	
Nombre de la barra	Barra 13.8 kV	
Corriente de falla LG	10969 amps	
Contribución a distancia	100 %	
Espesor de la capa superior	0.84 metros	
Resistividad de la capa superior	180.8 ohm-m	
Resistividad de la capa inferior	57.84 ohm-m	
<b>Resultados de salida</b>		
Longitud total de las varillas primarias	86.56 metros	
Número total de elementos	187	
Elevación del potencial de tier	5214.86 voltios	
Resistencia de tierra calculad	0.453068 ohmios	
Impedancia equivalente	0.453048 ohmios	

En la tabla 5.1 se muestra el reporte del análisis realizado por la herramienta CYMGRD sobre la mejora de la malla existente de la subestación Tovar, la malla existente se simuló añadiéndole una cantidad considerable de conductores y de barras Copperweld con el fin de disminuir los potenciales de contacto presentes en la subestación al momento de una falla, debido que superan el potencial de contacto máximo admisible. En la parte inferior del reporte se puede observar los valores de la elevación del potencial de tierra, la resistencia de tierra calculada y la impedancia equivalente, estos tres valores mencionados anteriormente se encuentran dentro de las premisas y criterios sugeridos por las normas internacionales IEEE80-2000 y la IEEE81-1983 que rigen el programa CYMGRD .

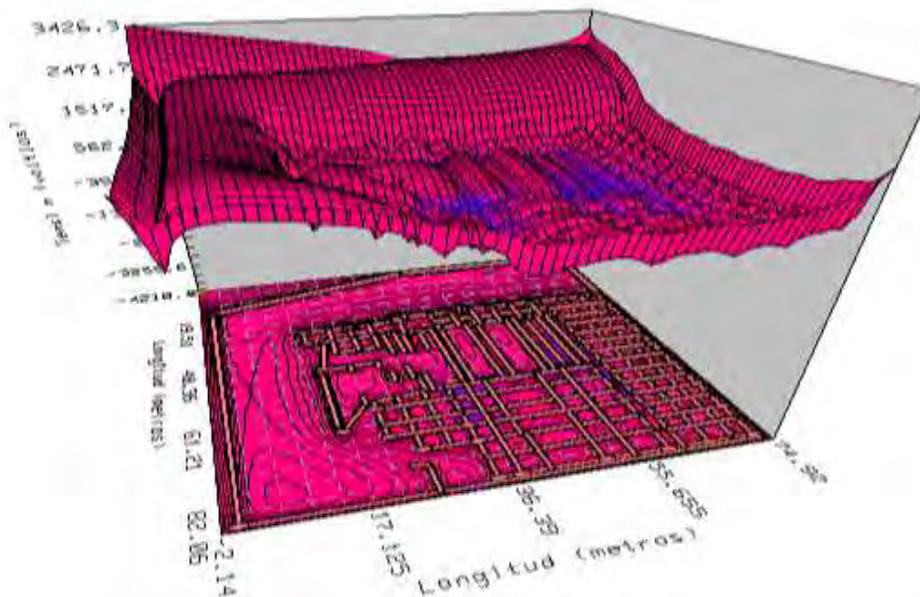
$$R_{\text{malla modificada,Tovar}} = 0.453068 \Omega$$

### **5.3.1 Diagrama de Contorno de Potencial de Contacto.**

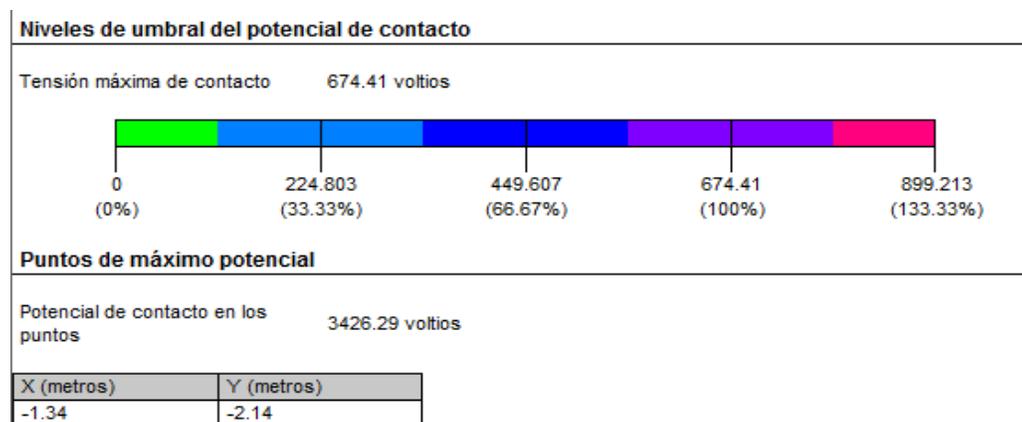
El diseño para la mejora de la malla de tierra de la subestación se muestra en las figuras 5.3 y 5.4, donde se anexaron una cantidad relevante de conductores y de barras Copperweld para mejorar los potenciales de contacto que se venían manifestando en la subestación, a pesar de las modificaciones no se logra controlar los potenciales de contacto. En las figuras antes mencionadas se pueden observar pequeñas áreas en color azul que significa que cumplen con los potenciales de contacto permitidos.



**Figura 5. 3. Diagrama de contorno de potencial de contacto de la malla modificada de la S/E Tovar.**



**Figura 5. 4. Diagrama de contorno de potencial de contacto de la malla modificada de la S/E Tovar.**

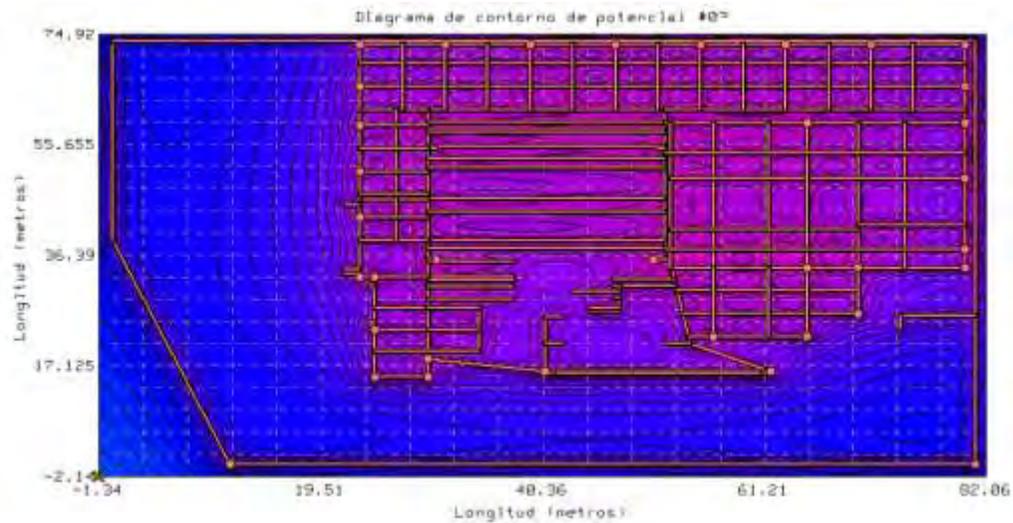


**Figura 5. 5. Reporte del contorno de potencial de contacto,malla modificada de la S/E Tovar.**

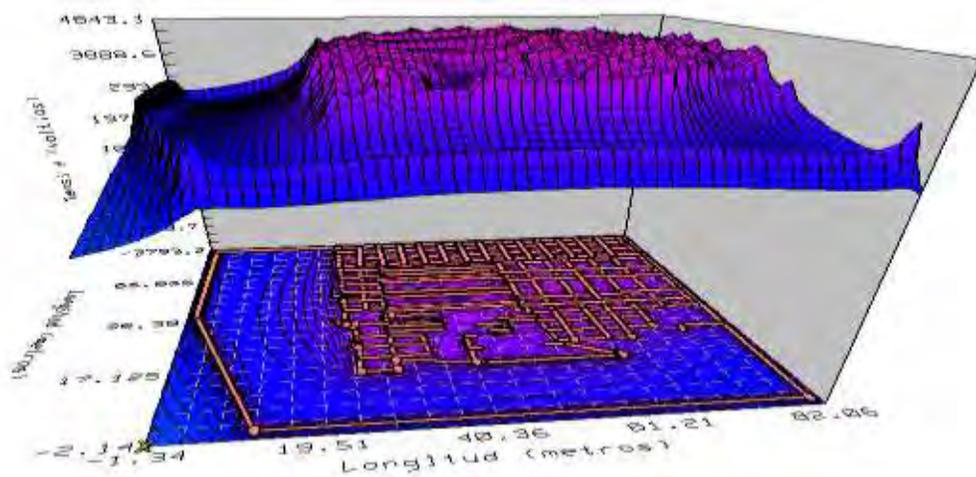
En la figura 5.5 se muestra que el potencial de contacto mas alto que se puede presentar en la malla mejorada es de 3415.04 voltios, pero sigue siendo muy alto ya que no debería ser mayor a 674.41 voltios que es el permitido.

### 5.3.2 Diagrama de Contorno de Potencial de Superficie.

A pesar de las considerables modificaciones que se plantearon a la malla existente de la subestación, sigue arrojando características inestables en cuanto a la diferencia de potencial de superficie cuando se inyecta la máxima corriente de cortocircuito de la barra de 13.8 kV. En la figura 5.6 y 5.7 se pueden observar el diagrama de contorno de potencial de superficie en 2D y 3D respectivamente.

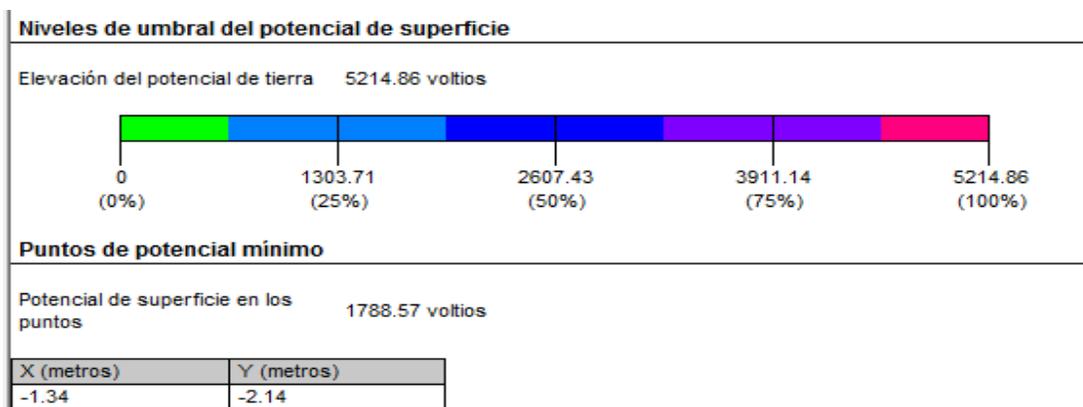


**Figura 5. 6. Diagrama de contorno de potencial de superficie de la malla modificada de la S/E Tovar.**



**Figura 5. 7. Diagrama de contorno de potencial de superficie de la malla modificada de la S/E Tovar.**

En la figura 5.7 se pueden observar con más detalle las características inestables antes mencionadas, en la cual se percibe una cantidad considerable de picos que representa diferencias de potenciales y por ende se generan tensiones de malla peligrosos para el personal que labora en la subestación.



**Figura 5. 8. Reporte del contorno de potencial de superficie de la malla modificada de la S/E Tovar.**

En la figura 5.8 se indica el reporte del diagrama de contorno del potencial de superficie, que evidencia que al momento de ocurrir una falla en el sistema de puesta a tierra planteado se eleva su potencial de tierra a 5214.86 voltios.

### 5.3.3 Diagrama de Perfil de Potencial.

La figura 5.9 muestra la dirección que se eligió para generar el diagrama de perfil, debido a que en esa dirección se formó el gradiente de potencial y de superficie más encarpado.

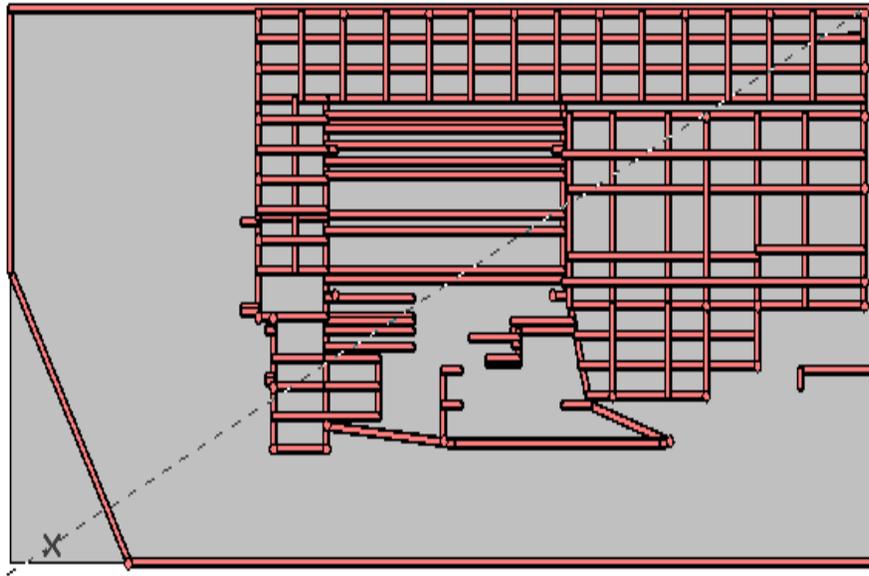


Figura 5. 9. Dirección del perfil de potencial de la malla modificada de la S/E Tovar.

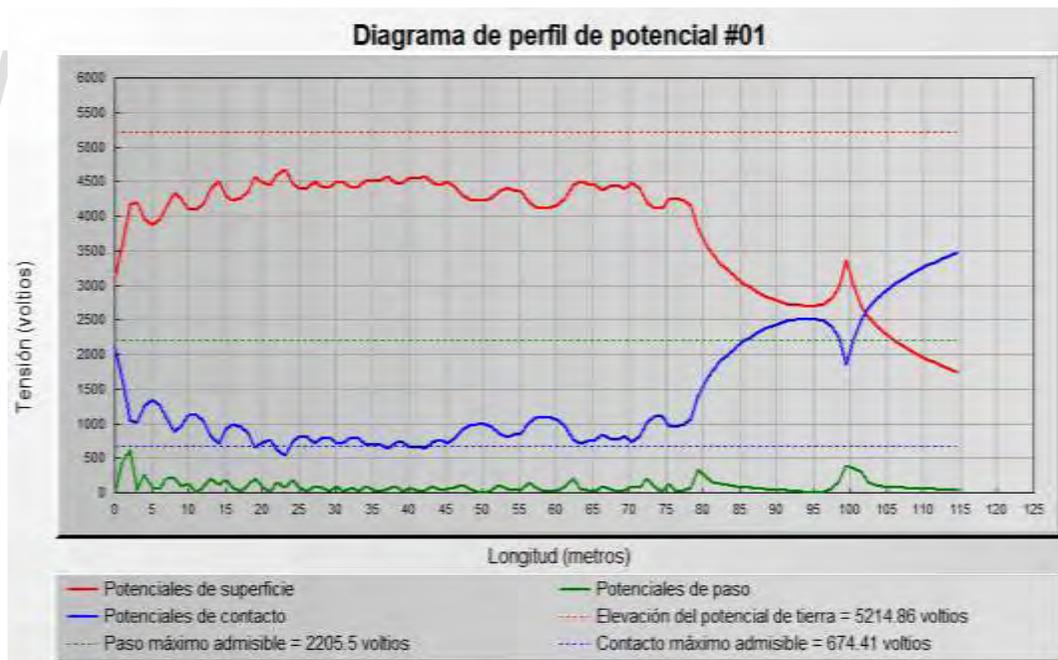


Gráfico 5. 2. Diagrama de perfil de potencial de la malla modificada de la S/E Tovar.

En el gráfico 5.2 se indican las curvas de los potenciales de contacto, de paso y de superficie, distinguiéndose por su color azul, verde y rojo respectivamente. Las curvas

segmentadas con los mismos colores pertenecen a los valores limitativos; es decir los valores máximos admisibles. De igual forma se puede visualizar que la curva de potenciales de superficie se encuentra por debajo del valor límite pero ésta se muestra con varios picos que representan diferencias de potenciales; por el contrario la mencionada curva así como las demás que se encuentran graficadas deberían tratar de formar una línea recta horizontal y estar por debajo de su respectiva línea segmentada.

<b>Niveles de umbral del potencial de contacto</b>	
Elevación del potencial de tierra	5214.86 voltios
Tensión máxima de paso	2205.5 voltios
Tensión máxima de contacto	674.41 voltios
<b>Puntos de máximo potencial</b>	
Potenciales de superficie	4671.6 voltios
Potenciales de paso	620.97 voltios
Potenciales de contacto	3482.44 voltios

Figura 5. 10. Reporte de perfil de potencial de la malla modificada de la S/E Tovar.

#### **5.4 COMPARACIÓN DE SEGURIDAD ENTRE LA MALLA ACTUAL Y LA PROPUESTA.**

En el gráfico 5.3 se muestra una comparación de ambos estudios, en el lado izquierdo se encuentra el diagrama de perfil de potenciales de la malla existente y en el lado derecho se encuentra el diagrama de perfil de potenciales de la malla mejorada. De igual manera se puede visualizar que los potenciales han disminuido con la mejora de la malla propuesta en el presente trabajo, sin embargo los potenciales de contacto (curva azul del gráfico derecho) aún están por encima del valor máximo permitido por la norma bajo las condiciones constructivas de la malla.

Diagrama de Perfil de Potencial de la malla existente.

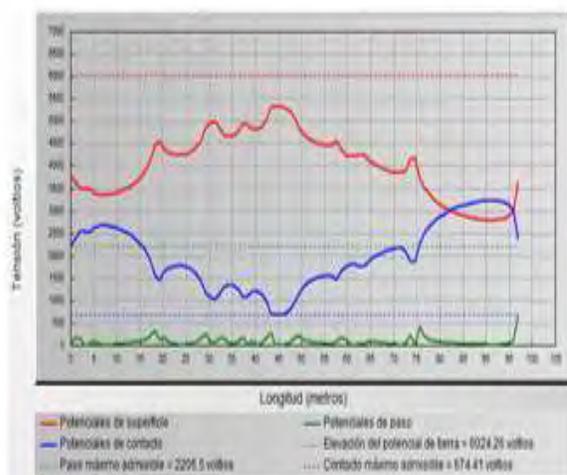
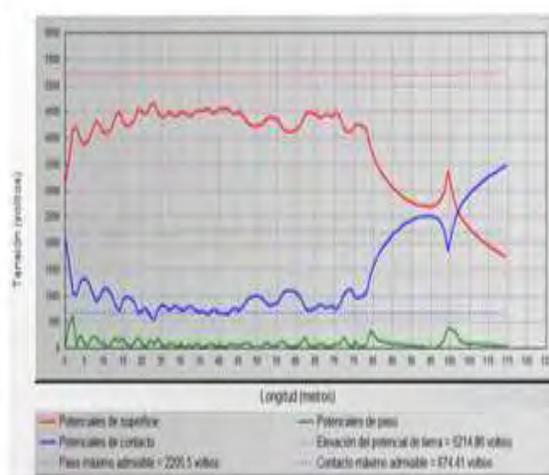


Diagrama de Perfil de Potencial de la malla mejorada.



**Gráfico 5. 3. Perfiles de los potenciales de la malla existente y la malla mejorada.**

Los valores de potenciales máximos permitidos por la norma bajo las condiciones constructivas de la malla y las disminuciones de los valores en las simulaciones dada la propuesta de la mejora de la malla existente se muestran en la tabla 5.2.

A pesar que la propuesta de la mejora de la malla no abarcó todo el área de la subestación, debido a que hay construcciones establecidas como por ejemplo oficinas y fundaciones para el soporte de equipos, se logró disminuir los valores de la elevación del potencial de tierra, la tensión de paso y la resistencia de puesta a tierra. La tensión de contacto se logró disminuir pero no se encuentra por debajo del valor máximo permitido.

**Tabla 5. 2. Valores de Comparación del Estudio de la Malla de la S/E Tovar.**

Valores Máximos		Malla Existente S/E Tovar	Malla Mejorada S/E Tovar
Elevación del Potencial de tierra (V)	6024,26	5346,19	4671,6
Tensión Máxima de Paso (V)	2205,5	645,51	620,97
Tensión Máxima de Contacto (V)	674,41	4191,47	3482,44
Resistencia de Puesta a Tierra ( $\Omega$ )	1	0,523393	0,453068

En el planteamiento de la mejora a la malla de puesta a tierra se le anexaron una cantidad de conductores y de barras Copperweld considerables, con lo cual se logró disminuir los potenciales de paso y la elevación del potencial de tierra, sin embargo los potenciales de contacto se encuentra muy por encima del valor permitido; por consiguiente, se recomienda bajar las altas corrientes que presenta la subestación para reducir las diferencias de tensiones presentes en la superficie del terreno que son perjudiciales para las personas y para los equipos.

## CONCLUSIONES

Es importante al momento de realizar un estudio de puesta a tierra conocer las características del suelo donde se encuentra establecida la subestación, así como también se debe conocer las características constructivas de la malla de puesta a tierra. Se debe estar al tanto sobre las normas internacionales que provienen de instituciones de larga trayectoria y de alta credibilidad en el mercado como por ejemplo la IEEE, que establecen criterios para el diseño de un buen sistema de puesta a tierra.

El objetivo de cualquier diseño o estudio de puesta a tierra será en primer lugar la seguridad del personal que trabaja en la subestación o de personas que se encuentran en sus adyacencias, y en segundo lugar salvaguardar cada uno de los equipos que conforman la subestación.

Es imprescindible contar un programa que permita analizar y diseñar redes de tierra en subestaciones, y así optimizar el diseño de nuevas redes y reforzar las ya existentes; el programa CYMGRD cuenta con las propiedades antes mencionadas y, además, se rige por las normas IEEE.

Por medio del estudio realizado a la malla de puesta a tierra existente en la subestación Tovar, se dio a conocer que la resistencia de puesta a tierra se encuentra por debajo de la que establece la norma para este tipo de subestaciones, la elevación del potencial de tierra y las tensiones de paso, se hallan por debajo de los valores permitidos pero presentan diferencias de potenciales de gran importancia en toda el área de la malla perjudiciales para el personal que labora en la mencionada subestación. Las tensiones de contacto están muy por encima del valor permitido.

La propuesta que se sugiere en el presente trabajo de ampliar la malla de puesta a tierra anexando conductores y colocando barras Copperweld en el perímetro de la malla siguiendo las normas de IEEE, la cual fue simulada en el programa CYMGRD, dio como resultado que la tensión de paso y la elevación del potencial de tierra se redujeran y se mantengan por debajo de los valores permitidos pero aún se manifiesta la variación de voltaje en diferentes puntos de

la superficie del terreno. Es importante resaltar que la tensión de contacto en dicha propuesta no disminuyó lo suficiente y sigue estando muy por encima del valor permitido.

El valor de resistencia de tierra en la mejora sugerida se sigue manteniendo por debajo del valor que sugiere la norma, aún cuando un bajo valor de resistencia a tierra no garantiza la seguridad del personal en el terreno sobre el sistema de conexión a tierra o en sus inmediaciones.

Gracias al estudio realizado en el presente trabajo se recabó información sobre la configuración de la malla; de igual manera se realizó un análisis del suelo donde se encuentra la subestación y, se descartó que la resistencia de tierra se encontrara por encima del valor permitido, la cual era una de las principales incertidumbres que presentaba la empresa CORPOELEC. Se plasmaron mediante gráficos las tensiones peligrosas que presenta la subestación Tovar, que son originados por las altas corrientes que presenta cada una de las barras que conforman la subestación. El rediseño planteado de la malla de puesta a tierra logró disminuir las tensiones considerablemente, pero no se alcanzó a disminuir las tensiones de contacto al valor permitido; esto permite plantear otras alternativas para disminuir dichas tensiones.

## RECOMENDACIONES

Conforme con los resultados obtenidos del análisis de la malla de puesta a tierra de la subestación Tovar, se recomienda la ampliación de la malla existente añadiendo conductores y barras copperweld ya que se demostró que disminuye las tensiones de malla, aún sabiendo que se mantiene las tensiones de contacto por encima del valor recomendado según la norma. Es por ello, que se recomienda instalar un reactor en línea para energía eléctrica en tres fases, el cual consta de tres inductores aislados conectados en serie con cada una de las tres fases, donde su función será oponerse a los cambios rápidos de la corriente y la frecuencia, y además disminuir las corrientes que presenta la subestación en cada una de sus barras, de esta manera las tensiones de malla serán reducidas considerablemente.

Las conexiones de los nuevos tramos se recomienda el de tipo exotérmica autofundente, la cual provee una conexión sólida, eficiente y duradera.

Se recomienda aumentar el espesor de la capa de piedra picada en la superficie del terreno, ya que cubrir la superficie con una capa de material de alta resistividad es valioso a la hora de reducir las corrientes de choques y ayuda a que las tensiones de toque y paso tolerables aumenten.

Se sugiere el programa CYMGRD para el análisis y diseño de mallas de puesta a tierra, dado a que los resultados de las simulaciones son numéricos y gráficos, resultando factible para cualquier usuario.

Es importante realizar una evaluación a las conexiones de los equipos y estructuras de la subestación que deben estar conectados al sistema de puesta a tierra, ya que puede existir un daño por condición de falla o por deterioro ambiental.

Al momento de considerar un aumento en la capacidad de transformación de la subestación Tovar se recomienda estudiar el efecto del aumento de la corriente de cortocircuito sobre el sistema de puesta a tierra, para garantizar la seguridad de las personas y equipos dentro de las instalaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *IEEE Guide For Safety in AC Substation Grounding*. IEEE Standard 80, 2000.
- [2] Mejía Villegas S.A. *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión*. 2da Ed. Mejía Villegas S.A. Colombia, 2003.
- [3] *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potential of a Ground System*, IEEE Standard 81, 2012.
- [4] Carrillo D. Pedro E. *Estudio y Evaluación de La Malla de Puesta a Tierra Existente en La Subestación Mérida I 115/13.8 kV y Subestación del trolebús 115/13.8 kV*. Trabajo de Grado para obtener el Título de Ingeniero Electricista. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2017.
- [5] Código Eléctrico Nacional Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad. Comité de Electricidad-Codelectra. Caracas: Fondonorma 200: 2004.
- [6] Izarra Ingrid K. *Desarrollo de un Software Interactivo que Permita Obtener un Modelo del Suelo Estratificado y El Valor de Resistencia a Tierra para un Sistema de Conexión a Tierra Seleccionado*. Trabajo de Grado para obtener el Título de Ingeniero Electricista. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2008.
- [7] Briceño M. Hildemaro: *Guía y Procedimientos para La Medición de la Resistividad Aparente e Interpretación de los Resultados*. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida-Venezuela, 1999.
- [8] Medina. Jexelin C. *Estudio y Evaluación de la Malla de Puesta a Tierra existente en la Subestación Caja Seca 115/34.5/13.8 kV utilizando como herramienta el software CYMGRD*. Trabajo de Grado para obtener el Título de Ingeniero Electricista. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2009.
- [9] Martín, José Raúl. *Diseño de Subestaciones Eléctricas*. 1era Ed. Mc Graw-Hill. México, 1987.

[10] Briceño M. Hildemaro: *Sistema de Conexión a Tierra en 60 Hz*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida-Venezuela 1999.

[11] Briceño M. Hildemaro: *Manual para La Medición de la Resistencia a Tierra de Sistemas de Conexión a Tierra*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida – Venezuela 1999.

[12] Zerpa E. Elis R. *Impacto en El Sistema de Transmisión a 115 kV Debido al Cambio de Los Transformadores de Potencia en La Subestación Mérida I*. Trabajo de Grado para obtener el Título de Ingeniero Electricista. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2013.

[13] Molina A. Victor A. *Manual de Operación y Funcionamiento de la S/E Tovar, Edo Mérida..* Trabajo de Grado para obtener el Título de Ingeniero Electricista. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2013.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve) **ANEXOS**

### Anexo 1: Tabla de las constantes de los materiales (IEEE80-2000).

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor $\alpha_r$ a 20°C (1/°C)	Ko en °C	Temperatura de fusión <sup>a</sup> Tm (°C)	$\rho_r$ 20 °C ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ )	Capacidad Termica TCAP[J/(cm <sup>3</sup> ·°C)]
Cobre destemplado de suave trenzado	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Cobre comercial de duro trenzado	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Varilla <sup>b</sup> de Acero con revestimiento de Cobre	20.0	0.0078	245	1084	8.62	3.85
Aluminio de grado EC	61.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aleación de Aluminio 5005	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aleación de Aluminio 6201	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Alambre de Acero con revestimiento de Aluminio	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Acero 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Varilla <sup>c</sup> de Acero con revestimiento Inoxidable	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Varilla de Acero con capa de Zinc	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Acero inoxidable 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

### Anexo 2: Características físicas, mecánicas y eléctricas de los conductores.

Calibre AWG o MCM	N° de hilos	Diámetro De cada hilo (mm)	Diámetro Del cable (mm <sup>2</sup> )	Sección (mm <sup>2</sup> )	Peso (kg/km)	Capa de Rotura (kg)	Resistencia			
							Corriente continua 20°C (ohm/km)	Corriente alterna 60 Hz		
								25°C	50°C	75°C
2	7	2.47	7.42	33.62	92.70	1.087	0.995757	1.0254	1.0991	1.182
1/0	7	3.12	9.36	53.51	147	1.734	0.6263	0.6376	0.6917	0.7458
2/0	7	3.50	10.51	67.44	186	2.091	0.5054	0.5054	0.5486	0.5915
4/0	7	4.42	13.25	107.2	296	3.335	0.3182	0.3182	0.3452	0.3722

### Anexo 3: Coordenadas de conductores dispuestos en la mejora de la malla de puesta a tierra de la S/E Tovar.

	Activado	Tipo	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Número de elementos conductores	Diámetro (mm)
2	✓	Primario	11	0	0.5	0	39	0.5	1	9.45
3	✓	Primario	0	39	0.5	0	73.6	0.5	1	9.45
4	✓	Primario	0	73.6	0.5	81	73.6	0.5	1	9.45
5	✓	Primario	81	73.6	0.5	81	0	0.5	1	9.45
6	✓	Primario	29.6	18.4	0.5	29.6	61.8	0.5	1	13.462
7	✓	Primario	29.6	61.8	0.5	51.8	61.8	0.5	1	13.462
8	✓	Primario	51.8	61.8	0.5	51.8	39	0.5	1	13.462
9	✓	Primario	51.8	39	0.5	54.2	21	0.5	1	13.462
10	✓	Primario	54.2	21	0.5	61.8	16.2	0.5	1	13.462
11	✓	Primario	61.8	16.2	0.5	40.6	16.2	0.5	1	13.462
12	✓	Primario	40.6	16.2	0.5	29.6	16.4	0.5	1	13.462
13	✓	Primario	29.6	59.6	0.5	51.8	59.6	0.5	1	10.6
14	✓	Primario	29.6	58.2	0.5	51.8	58.2	0.5	1	10.6
15	✓	Primario	29.6	57.8	0.5	51.8	57.8	0.5	1	10.6
16	✓	Primario	29.6	55.4	0.5	51.8	55.4	0.5	1	10.6
17	✓	Primario	29.6	55	0.5	30.4	55	0.5	1	10.6
18	✓	Primario	51	55	0.5	51.8	55	0.5	1	10.6
19	✓	Primario	29.6	53.2	0.5	51.8	53.2	0.5	1	10.6
20	✓	Primario	29.6	51.6	0.5	51.8	51.6	0.5	1	13.462
21	✓	Primario	29.6	46.2	0.5	51.8	46.2	0.5	1	10.6
22	✓	Primario	29.6	44	0.5	51.8	44	0.5	1	10.6
23	✓	Primario	29.6	39	0.5	51.8	39	0.5	1	13.462
24	✓	Primario	29.6	37.8	0.5	52	37.8	0.5	1	10.6
25	✓	Primario	29.6	35.6	0.5	30.4	35.6	0.5	1	10.6
26	✓	Primario	50.8	35.6	0.5	52.22	35.6	0.5	1	10.6
27	✓	Primario	29.6	35.2	0.5	37.6	35.2	0.5	1	10.6
28	✓	Primario	29.6	32.6	0.5	37.6	32.6	0.5	1	10.6
29	✓	Primario	29.6	32	0.5	37.6	32	0.5	1	10.6
30	✓	Primario	29.6	30.8	0.5	37.6	30.8	0.5	1	10.6
31	✓	Primario	29.6	28.8	0.5	37.6	28.8	0.5	1	10.6
32	✓	Primario	40.6	16.2	0.5	40.6	25.6	0.5	1	10.6
33	✓	Primario	40.6	25.6	0.5	42.2	25.6	0.5	1	10.6
34	✓	Primario	40.6	21	0.5	42.2	21	0.5	1	10.6
35	✓	Primario	54.2	21	0.5	51.8	21	0.5	1	10.6
36	✓	Primario	47	32.2	0.5	52.68	32.2	0.5	1	13.462
37	✓	Primario	47	31	0.5	52.8	31	0.5	1	13.462
38	✓	Primario	47.6	31	0.5	47.6	26.6	0.5	1	13.462
39	✓	Primario	44.8	26.6	0.5	47.6	26.6	0.5	1	10.6
40	✓	Primario	43.2	30	0.5	47.6	30	0.5	1	10.6
41	✓	Primario	44.8	27.2	0.5	47.6	27.2	0.5	1	10.6
42	✓	Primario	47.2	29	0.5	47.6	29	0.5	1	10.6
43	✓	Primario	41.4	15.8	0.5	61	15.8	0.5	1	10.6
44	✓	Primario	40.6	16.2	0.5	41.4	15.8	0.5	1	10.6
45	✓	Primario	61.8	16.2	0.5	61	15.8	0.5	1	10.6
46	✓	Primario	74	25.0	0.5	81	25.0	0.5	1	9.45
47	✓	Primario	74	25.8	0.5	74	23.6	0.5	1	9.45

### Anexo 3: Coordenadas de conductores dispuestos en la mejora de la malla de puesta a tierra de la S/E Tovar (continuación).

48	✓	Primario	51.82	59.4	0.5	80.05	59.4	0.5	1	13.462
49	✓	Primario	80.05	70	0.5	80.05	34.2	0.5	1	13.462
50	✓	Primario	78.65	70	0.5	80.05	70	0.5	1	13.462
51	✓	Primario	80.05	34.2	0.5	52.398	34.2	0.5	1	13.462
52	✓	Primario	74.45	59.4	0.5	74.45	34.2	0.5	1	13.462
53	✓	Primario	70	59.4	0.5	70	34.2	0.5	1	13.462
54	✓	Primario	61.6	59.4	0.5	61.6	34.2	0.5	1	13.462
55	✓	Primario	56.4	59.4	0.5	56.4	34.2	0.5	1	13.462
56	✓	Primario	52.4	59.4	0.5	52.4	34.2	0.5	1	13.462
57	✓	Primario	52.4	49.8	0.5	80.05	49.8	0.5	1	13.462
58	✓	Primario	52.4	40.8	0.5	70	40.8	0.5	1	13.462
59	✓	Primario	70	41.6	0.5	80.05	41.6	0.5	1	13.462
60	✓	Primario	23.2	46	0.5	29.6	46	0.5	1	13.462
61	✓	Primario	23.2	46	0.5	23.2	32.6	0.5	1	13.462
62	✓	Primario	23.2	32.6	0.5	29.6	32.6	0.5	1	13.462
63	✓	Primario	23.2	39	0.5	29.6	39	0.5	1	13.462
64	✓	Primario	24.6	32.6	0.5	24.6	23.4	0.5	1	13.462
65	✓	Primario	24.6	23.4	0.5	29.6	23.4	0.5	1	13.462
66	✓	Primario	24.6	27.2	0.5	29.6	27.2	0.5	1	13.462
67	✓	Primario	21.8	45.2	0.5	23.2	45.2	0.5	1	10.6
68	✓	Primario	21.8	34	0.5	23.2	34	0.5	1	10.6
69	✓	Primario	21.8	33.2	0.5	23.2	33.2	0.5	1	10.6
70	✓	Primario	24	31.2	0.5	24.6	31.2	0.5	1	10.6
71	✓	Primario	24	30.8	0.5	24.6	30.8	0.5	1	10.6
72	✓	Primario	24	24.8	0.5	24.6	24.8	0.5	1	10.6
73	✓	Primario	24	24.2	0.5	24.6	24.2	0.5	1	10.6
74	✓	Primario								

### Anexo 4: Coordenadas de las barras Copperweld de la malla existente.

	Activado	Tipo	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Número de varillas de tierra a lo largo del eje	Elementos por varilla en la capa superior de suelo	Elementos por varilla en la capa inferior de suelo	Longitud (m)	Díámetro (mm)
1	✓	Primario	65.2	34.2	0	65.2	34.2	3.04	1	1	1	3.04	16
2	✓	Primario	65.2	59.4	0	65.2	59.4	3.04	1	1	1	3.04	16
3	✓	Primario	50.8	35.6	0	50.8	35.6	3.04	1	1	1	3.04	16
4	✓	Primario	30.4	35.6	0	30.4	35.6	3.04	1	1	1	3.04	16
5	✓	Primario											

## Anexo 5: Coordenadas de las barras Copperweld de la mejora de la malla existente.

	Activado	Tipo	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Número de varillas de tierra a lo largo del eje	Elementos por varilla en la capa superior de suelo	Elementos por varilla en la capa inferior de suelo	Longitud (m)	Diametro (mm)
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	65.2	34.2	0	65.2	34.2	3.04	1	1	1	3.04	16
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	65.2	59.4	0	65.2	59.4	3.04	1	1	1	3.04	16
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	50.8	35.6	0	50.8	35.6	3.04	1	1	1	3.04	16
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	30.4	35.6	0	30.4	35.6	3.04	1	1	1	3.04	16
5	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	24.6	15.2	0	24.6	15.2	2.4	1	1	1	2.4	16
6	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	24.6	23.4	0	24.6	23.4	2.4	1	1	1	2.4	16
7	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	24.6	32.6	0	24.6	32.6	2.4	1	1	1	2.4	16
8	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	23.2	32.6	0	23.2	32.6	2.4	1	1	1	2.4	16
9	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	23.2	43	0	23.2	43	2.4	1	1	1	2.4	16
10	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	23.2	50.993	0	23.2	50.993	2.4	1	1	1	2.4	16
11	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	23.2	59	0	23.2	59	2.4	1	1	1	2.4	16
12	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	23.2	65.8	0	23.2	65.8	2.4	1	1	1	2.4	16
13	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	23.2	73	0	23.2	73	2.4	1	1	1	2.4	16
14	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	31.2	73	0	31.2	73	2.4	1	1	1	2.4	16
15	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	39.2	73	0	39.2	73	2.4	1	1	1	2.4	16
16	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	47.2	73	0	47.2	73	2.4	1	1	1	2.4	16
17	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	55.2	73	0	55.2	73	2.4	1	1	1	2.4	16
18	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	63.2	73	0	63.2	73	2.4	1	1	1	2.4	16
19	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	71.2	73	0	71.2	73	2.4	1	1	1	2.4	16
20	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	80.05	73	0	80.05	73	2.4	1	1	1	2.4	16
21	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	80.05	65.8	0	80.05	65.8	2.4	1	1	1	2.4	16
22	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	80.05	59.4	0	80.05	59.4	2.4	1	1	1	2.4	16
23	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	80.05	49.8	0	80.05	49.8	2.4	1	1	1	2.4	16
24	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	80.05	37.4	0	80.05	37.4	2.4	1	1	1	2.4	16
25	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	80.05	34.2	0	80.05	34.2	2.4	1	1	1	2.4	16
26	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	70	34.2	0	70	34.2	2.4	1	1	1	2.4	16

**Anexo 5: Coordenadas de las Barras Copperweld de la mejora de la malla existente (continuación).**

27	<input checked="" type="checkbox"/>	Primerio	70	26.2	0	70	26.2	24	1	1	1	24	16
28	<input checked="" type="checkbox"/>	Primerio	65.2	22.2	0	65.2	22.2	24	1	1	1	24	16
29	<input checked="" type="checkbox"/>	Primerio	56.4	22.2	0	56.4	22.2	24	1	1	1	24	16
30	<input checked="" type="checkbox"/>	Primerio	61.8	16.2	0	61.8	16.2	24	1	1	1	24	16
31	<input checked="" type="checkbox"/>	Primerio	40.6	16.2	0	40.6	16.2	24	1	1	1	24	16
32	<input checked="" type="checkbox"/>	Primerio	29.6	15.2	0	29.6	15.2	24	1	1	1	24	16
33	<input checked="" type="checkbox"/>	Primerio	29.6	18.4	0	29.6	18.4	24	1	1	1	24	16
34	<input checked="" type="checkbox"/>	Primerio	81	0	0	81	0	24	1	1	1	24	16
35	<input checked="" type="checkbox"/>	Primerio	11	0	0	11	0	24	1	1	1	24	16
36	<input checked="" type="checkbox"/>	Primerio											

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)