



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**“Diseño de Sistema de Puesta a Tierra Para la Nave de  
Fundición de Una Empresa Siderúrgica con Hornos de  
Arco Eléctrico Trifásico.”**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
CON OPCIÓN TERMINAL EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

**Aislinn Díaz Martínez**

Asesor de tesis:

**M.C. Carlos Morán Ramírez**

Co-asesor de tesis:

**Dr. Wilfredo Ibarra Hernández**

Puebla, Pue.

Marzo 2022

# OFICIO DE APROBACIÓN TEMA DE TESIS



Oficio No. SIEP/0198/2022

**C. Aislín Díaz Martínez**

Matrícula 220470060

Pasante de la Maestría en Ingeniería

con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia

Facultad de Ingeniería, BUAP.

Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Diseño de malla de tierras para la nave de fundición de una empresa siderúrgica con hornos de arco eléctrico trifásico**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia, asignándose como Director de tesis al M.C. Carlos Morán Ramírez y Codirector al Dr. Wilfredo Ibarra Hernández.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, febrero 09 de 2022.

  
**M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
Director

C.c.p. M.C. Carlos Morán Ramírez y Dr. Wilfredo Ibarra Hernández, Director y Codirector del Tema de Tesis  
C.c.p. Archivo  
AEPS/JCES/sco\*

Facultad  
de Ingeniería

Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
222 229 55 00 Ext. 7610

# ACTA RESOLUTIVA DE IMPRESIÓN DE TESIS

## DEDICATORIA

A María Magdalena, mi madre.

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre, María Magdalena Martínez, por su constante motivación, por ser una mujer ejemplar, por su esfuerzo, dedicación y sacrificio y por siempre creer en mí y en lo que puedo lograr si me lo propongo.

A Jorge y la familia Moreno Romero, por el apoyo invaluable que me han brindado a lo largo de estos años, por ser mi refugio y soporte en los momentos más críticos de mi vida y por celebrar conmigo mis logros como si fueran suyos.

A mi asesor, el M.C. Carlos Morán Ramírez, por su valioso aporte en la realización de este trabajo, por sus enseñanzas y por la enorme cantidad de conocimiento y experiencias que me ha compartido a lo largo de casi 5 años.

A mi co-asesor, el Dr. Wilfredo Ibarra Hernández, por el apoyo brindado en la revisión de esta tesis, por su paciencia, conocimiento y opiniones brindadas.

A mis compañeros de maestría, Estefanía, Moisés y Enrique, por brindarme su amistad sincera y su conocimiento sin esperar nada a cambio.

Al CONACYT, por la beca que me fue otorgada y sin la cual no habría podido culminar con mis estudios de posgrado.

# DISEÑO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA LA NAVE DE FUNDICIÓN DE UNA EMPRESA SIDERÚRGICA CON HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO TRIFÁSICO.

## CONTENIDO

Oficio De Aprobación Tema De Tesis .....	I
Acta Resolutiva De Impresión De Tesis .....	II
Dedicatoria .....	III
Agradecimientos.....	IV
Tabla De Acrónimos.....	VII
Índice De Figuras .....	VIII
Índice De Tablas .....	XI
Resumen.....	XII
Abstract .....	XII
Capítulo I Introducción .....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Planteamiento Del Problema.....	1
1.3 Justificación.....	2
1.4 Hipótesis.....	2
1.5 Objetivos .....	2
1.6 Antecedentes .....	3
1.7 Estado Del Arte .....	4

Capítulo II Normativa Para Sistema De Puesta A Tierra .....	7
2.1 Normativas Aplicables Al Diseño De Sistemas De Puesta Tierra .....	7
2.2 Capacidades Del Sistema De Puesta A Tierra .....	8
2.3 Parámetros De Diseño De Un Sistema De Puesta A Tierra Y Sus Componentes. ....	13
2.4 Características De Los Materiales Empleados En El Diseño Del Sistema De Puesta A Tierra .....	25
Capítulo III Modelado Del Sistema De Puesta A Tierra.....	46
3.1 Generalidades .....	46
3.2 Métodos De Cálculo Para El Modelado Del Sistema De Puesta A Tierra .....	46
3.3 Diseño Del Sistema De Puesta A Tierra Por Elemento Finito .....	50
3.4 Modelado Del Sistema De Puesta A Tierra Con Software Etap 21.0.0 .....	56
Capítulo IV Aplicación Del Diseño De Malla De Tierras .....	75
4.1 Generalidades .....	75
4.2 Recopilación De Datos Preliminares, Mediciones En Sitio.....	75
4.3 Modelado En Etap Del Sistema De Puesta A Tierra .....	81
4.4 Resultados .....	87
Conclusiones.....	94
Trabajos A Futuro.....	96
Anexos .....	97
Bibliografía .....	98

## TABLA DE ACRÓNIMOS

ETAP	Programa Analizador de Transitorios Electromagnéticos
FEM	Método de Elemento Finito
GPR	Elevaciones de Potencial de Tierra
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
NEC	Código Eléctrico Nacional
NOM	Norma Oficial Mexicana
RCP	Reanimación Cardiopulmonar

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Voltajes presentes en un sistema de puesta a tierra.....	23
Figura 2.2 Conector tipo GAR .....	35
Figura 2.3 Conector tipo GB .....	36
Figura 2.4 Conector tipo GBM.....	36
Figura 2.5 Conector tipo GK .....	37
Figura 2.6 Conector tipo GC.....	37
Figura 2.7 Conector tipo GCM.....	38
Figura 2.8 Conector tipo GX .....	38
Figura 2.9 Conector tipo GKP o GRC .....	39
Figura 2.10 Conector tipo YGL-C .....	39
Figura 2.11 Conector tipo YGHC-C .....	40
Figura 2.12 Conector tipo YGHP-C .....	40
Figura 2.13 Conector tipo YGHR-C.....	41
Figura 2.14 Ejemplo de molde para soldadura exotérmica .....	42
Figura 2.15 Ejemplo de soldaduras exotérmicas realizadas con moldes.....	42
Figura 2.16 Ejemplo de carga o soldadura y disco metálico .....	43
Figura 2.17 Chispero para soldadura exotérmica .....	43
Figura 2.18 Cepillo de fibras suaves .....	44
Figura 2.19 Cepillo de alambre .....	44
Figura 3.1 Configuración de malla de tierras cuadrada sin varillas.....	48
Figura 3.2 Configuración de malla de tierras cuadrada con varillas perimetrales .....	49
Figura 3.3 Configuración de malla de tierras rectangular con varillas aleatorias.....	49
Figura 3.4 Configuración de malla de tierras con forma de “L” .....	50
Figura 3.5 Diagrama de bloques del procedimiento de diseño [9]. .....	52
Figura 3.6 Diagrama de metodología de elemento finito .....	54
Figura 3.7 Crear nuevo proyecto .....	56
Figura 3.8 Ventana para ingresar datos del proyecto.....	57
Figura 3.9 Información del usuario .....	57
Figura 3.10 Selección de nivel de acceso .....	58
Figura 3.11 Plano de dibujo.....	58
Figura 3.12 Barra de módulos.....	59
Figura 3.13 Pestaña Project .....	59
Figura 3.14 Estándares del proyecto .....	59
Figura 3.15 Parámetros generales del proyecto .....	60
Figura 3.16 Módulo “Editar” .....	60
Figura 3.17 Elementos de CA .....	61
Figura 3.18 Ícono de malla de tierras.....	61
Figura 3.19 Representación de malla de tierras.....	61
Figura 3.20 Selección de método de cálculo de la malla de tierras .....	62
Figura 3.21 Módulo GGS .....	62
Figura 3.22 Pestaña “Home” .....	62
Figura 3.23 Opción “Grid” .....	63

Figura 3.24 Pestaña “View” .....	63
Figura 3.25 Editor de grupo .....	63
Figura 3.26 Modificar las propiedades de un elemento .....	64
Figura 3.27 Configuración de características del suelo .....	65
Figura 3.28 Editor de suelo .....	65
Figura 3.29 Tipo de material de la superficie exterior del suelo .....	66
Figura 3.30 Tipo de material de las capas superior e inferior del suelo .....	66
Figura 3.31 Ejemplo de configuración de la pestaña “Analysis” .....	67
Figura 3.32 Ícono de “Ground Grid Study” .....	67
Figura 3.33 Barra de opciones del “Ground Grid Study” .....	67
Figura 3.34 Ventana Editor de caso de estudio .....	68
Figura 3.35 Botón “Ground Grid Calculation” .....	68
Figura 3.36 Asignación de nombre para el reporte de resultados .....	69
Figura 3.37 Pantallas de resultados con y sin advertencias .....	69
Figura 3.38 Ícono “Plot Selection” .....	70
Figura 3.39 Parámetros por graficar .....	70
Figura 3.40 Ejemplo de gráfica visualizada en el explorador de internet .....	71
Figura 3.41 Botón para guardar la gráfica en la computadora .....	71
Figura 3.42 Ícono “Report Manager” .....	71
Figura 3.43 Ventana de opciones “Report Manager” .....	72
Figura 3.44 Ejemplo de visualización del reporte en Word .....	72
Figura 3.45 Diseño de la malla de tierras en formato PDF .....	73
Figura 3.46 Guardar proyecto .....	74
Figura 4.1 Transformador de 100 MVA, de 230 KV a 13.8 KV .....	76
Figura 4.2 Vista lateral del transformador de 100 MVA, de 230 KV a 13.8 KV .....	76
Figura 4.3 Esquema de conexión del medidor y electrodos .....	77
Figura 4.4 Direcciones para medición de resistividad .....	78
Figura 4.5 Zona frontal del edificio de acería .....	79
Figura 4.6 Transformador de 80 MVA, de 13.8 KV a 0.715 KV .....	80
Figura 4.7 Diseño propuesto del sistema de tierras .....	81
Figura 4.8 Creación del proyecto .....	82
Figura 4.9 Ícono de malla de tierras en plano de dibujo .....	82
Figura 4.10 Selección de método de elemento finito .....	82
Figura 4.11 Mediciones de resistividad del suelo introducidas en el software .....	83
Figura 4.12 Configuración editor de suelo .....	83
Figura 4.13 Configuración de las características de los conductores .....	84
Figura 4.14 Configuración de las características de las varillas o electrodos .....	84
Figura 4.15 Vistas diferente del modelo .....	85
Figura 4.16 Configuración de datos para el estudio .....	86
Figura 4.17 Cálculo en proceso .....	86
Figura 4.18 Configuraciones de la gráfica .....	87
Figura 4.19 Resultados del cálculo del sistema de tierras .....	87
Figura 4.20 Gráfica de voltaje absoluto .....	88
Figura 4.21 Gráfica de voltaje de contacto .....	88
Figura 4.22 Gráfica de voltaje de paso .....	89

Figura 4.23 Selección de formato para el reporte .....	89
Figura 4.24 Carátula de resumen del proyecto .....	90
Figura 4.25 Listado de conductores en el reporte.....	91
Figura 4.26 Conductores, varillas empleadas en el diseño y su costo .....	92
Figura 4.27 Resumen final del sistema de puesta a tierra.....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efectos fisiológicos de la exposición a diversos niveles de corriente.....	10
Tabla 2. Mediciones de resistividad del terreno en subestación 230 KV .....	79
Tabla 3. Mediciones de resistividad del terreno en acería.....	80

## RESUMEN

Un sistema de puesta a tierra bien diseñado es fundamental para garantizar la seguridad de los operarios y de las instalaciones industriales, es exigida por diversas normas y su cálculo puede representar dificultad cuando la malla es muy grande o cuenta con una forma irregular.

En este trabajo se describen las principales características con las que debe contar una malla de tierras adecuada para conducir las corrientes de falla a tierra y se presenta el procedimiento para realizar el cálculo del sistema mediante el software ETAP y el Método de Elemento Finito. Se analiza el diseño propuesto de un sistema de puesta a tierra para el edificio de acería de una empresa de fundición y se define si los parámetros de la malla cumplen con las condiciones de seguridad necesarias para su implementación.

## ABSTRACT

A well-designed grounding system is critical to ensuring operator safety and industrial facilities, is required by various standards and its calculation can represent difficulty when the mesh is very large or has an irregular shape.

This paper describes the main characteristics that a suitable earth mesh must have to conduct ground fault currents and the procedure to perform the calculation of the system using the ETAP software and the Finite Element Method is presented. The proposed design of a grounding system for the steel mill building of a foundry company is analyzed and defines whether the mesh parameters meet the security conditions necessary for its implementation.

## CAPÍTULO I Introducción

### 1.1 GENERALIDADES

El diseño adecuado de un sistema de puesta a tierra en las instalaciones eléctricas industriales es de gran relevancia debido a las funciones que desempeña dicho sistema al momento de ocurrir una falla a tierra, durante una descarga a tierra o durante el proceso natural de un centro de carga. La implementación de un sistema de tierras, además de ser un requerimiento normativo en las instalaciones eléctricas, conlleva diversos beneficios, sobre todo en instalaciones que implican el empleo de grandes corrientes en sus procesos como lo es la industria acerera, en la cual, se emplean distintos tipos de hornos para fundir los materiales y obtener un número amplio de aleaciones. Durante el proceso de fundición las corrientes suelen alcanzar valores muy altos y existe una corriente de fuga que se descarga a tierra volviéndose necesaria la implementación de un buen diseño del sistema de tierras que pueda disipar las corrientes de manera adecuada, evitando daños a la instalación o al personal.

Debido a todo lo mencionado anteriormente, resulta fundamental la elaboración de un sistema de tierras con un diseño adecuado y proyectado bajo las normas aplicables, con el propósito de garantizar seguridad eléctrica a la instalación y al personal, además de extender la vida útil de los equipos y máquinas eléctricas evitándoles sobretensiones causadas por grandes descargas a tierra. La NOM-001-SEDE-2012 y el estándar IEEE-80-2013 serán las normativas aplicables en el desarrollo del modelo de esta tesis.

### 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una empresa siderúrgica ubicada en el estado de Tlaxcala presenta un problema referente a que las corrientes de falla no cuentan con un camino efectivo para su descarga a tierra. Los errores en el dimensionamiento de un sistema de puesta a

tierra o inclusive no contar con un sistema de puesta a tierra conlleva problemas eléctricos y de seguridad en las instalaciones, como es el caso presente. El correcto diseño de un sistema de puesta a tierra sigue siendo un elemento que se pasa por alto pero que resulta ser de suma importancia para el correcto funcionamiento de un sistema eléctrico.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Garantizar la integridad de los equipos e instalaciones, así como el bienestar de los trabajadores ante un choque eléctrico debe convertirse en la mayor prioridad.

El beneficio directo que se obtiene de la protección de la inversión en maquinaria y materiales mediante la implementación de un sistema de tierras eficiente aunado a la reducción de riesgos hace indispensable el dimensionamiento adecuado de una red de tierras.

### 1.4 HIPÓTESIS

El diseño adecuado de una red de tierras puede lograrse mediante la recopilación de datos específicos, desarrollo de cálculos adecuados y simulación en una herramienta de diseño eléctrico.

### 1.5 OBJETIVOS

Objetivo general: calcular y diseñar el sistema de tierras adecuado para conducir las corrientes de falla de la nave de fundición de una empresa siderúrgica con hornos de arco eléctrico trifásico, garantizando la seguridad e integridad de las personas y las instalaciones.

Objetivos particulares:

- Calcular el sistema de puesta a tierra a partir de datos recolectados en campo
- Modelar el sistema de tierras en un software eléctrico especializado
- Simular el comportamiento del sistema de puesta a tierra ante una falla en un software especializado
- Implementar el diseño del sistema de puesta a tierra en planta para proporcionarle a las fallas un medio físico y eficiente para que se descarguen a tierra.

## 1.6 ANTECEDENTES

El diseño de los sistemas de tierra siempre ha sido un tema controversial, al inicio de los sistemas eléctricos industriales no existía norma alguna que exigiera la implementación de dichos elementos, pero con el paso de los años diversas instituciones han ido desarrollando estudios, especificaciones y normas que señalan como requisito la instalación de un sistema de tierras correctamente diseñada.

La IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) publicó en 1961 [1] la primera versión del estándar Std 80 titulado como Guía de seguridad en la conexión a tierra de subestaciones de corriente alterna. Esta primera edición, así como las tres que la sucedieron, definieron las ecuaciones necesarias para calcular los voltajes de contacto y paso presentes en los diferentes tipos de sistemas de tierras, introdujeron curvas para ayudar a determinar la división de corriente eléctrica a lo largo de la red, cambiaron los criterios para la selección de conductores y conexiones y proporcionaron más información sobre la interpretación de la medición de resistividad, además se abordó el tema de los suelos multicapa y su importancia en el cálculo del sistema de tierras.

La versión más reciente de este estándar es la Std 80-2013, en esta se considera el efecto de las diferentes combinaciones de electrodos bimetálicos usados en sistemas de tierra. Además, se desarrollan métodos de cálculo para el diseño y verificación de resultados obtenidos mediante software. Esta última edición se basa

en más de 50 años de trabajo de miembros que integran los distintos grupos de trabajo dedicados al estudio de este tema en específico.

Por otro lado, en México se publicó el Reglamento de Instalaciones Eléctricas en 1981, dicho reglamento es un esbozo en el cual se contemplaban muchos aspectos de seguridad en las instalaciones eléctricas [2], posteriormente en 1993 se creó la Ley Federal de Metrología y Normalización, la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y se crea por primera vez una Norma de Emergencia cuyo propósito era transitar a una norma oficial mexicana definitiva. Luego de una serie de modificaciones y normas, en 1999 se publica la NOM-001-SEDE-1999 la cual daba forma a la Norma Oficial Mexicana como la conocemos hoy en día.

La versión actualizada es la NOM-001-SEDE-2012, aplicable a hospitales, centros de trabajo, comercios, lugares de concentración pública, etc., su propósito es garantizar condiciones adecuadas de seguridad para las personas y sus propiedades [3]. En su capítulo 250 se describen las características y materiales de construcción para un sistema de puesta a tierra de manera adecuada.

Es importante señalar que además del estándar IEEE Std 80-2013 y la NOM-001-SEDE-2012 existe la norma NOM-022-STPS-2015 Electricidad estática en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad [4], en dicha norma se especifican las condiciones de seguridad para trabajadores, se enlistan valores permisivos de resistencia a tierra para evitar daños a la salud y se describen métodos para la medición de la resistencia a tierra del sistema, siendo así que es necesario mencionarla puesto que se hará referencia a ella a lo largo del presente documento.

## 1.7 ESTADO DEL ARTE

La adaptación de las antiguas instalaciones eléctricas para cumplir con las normas actuales es un trabajo gradual, un requisito que anteriormente no era solicitado es la implementación de una red de tierras capaz de funcionar como medio de

conducción para las corrientes de falla por lo tanto las empresas con más años de antigüedad han funcionado por más de 50 años sin este sistema de puesta a tierra.

En muchas ocasiones el personal de mantenimiento, del área eléctrica e inclusive los directivos, desconocen los requisitos con los que debería cumplir la instalación para estar en norma y contar con la mayor seguridad eléctrica, por lo que es responsabilidad del ingeniero que ofrece asesoría eléctrica el mencionar cuando se incumple con algún requisito para propiciar la implementación de las soluciones adecuadas y contribuir al desarrollo de un sistema de potencia seguro y confiable.

Para verificar que una instalación cuenta con red de tierras es necesario identificar si existen registros eléctricos en la subestación o en el edificio de interés. Si no se encuentran registros es necesario realizar una investigación en planta referente al mismo tema, solicitando información a los ingenieros de mantenimiento o solicitando el proyecto o diagramas eléctricos, si sí se localizan registros con varillas de tierra es necesario recopilar información de las últimas mediciones que se le realizaron al sistema de tierras, si ha pasado más de un año de su última medición es importante verificar que el valor de la resistencia a tierra no haya incrementado y sobrepasado los valores permitidos.

Si se llega a la conclusión de que no existe un sistema de tierras y se pretende implementarla es necesario obtener mediciones de campo como la resistividad del suelo, realizar cálculos para obtener los voltajes de paso y de contacto soportados por el ser humano, realizar un diseño preliminar del sistema de puesta a tierra para obtener valores aproximados de la resistencia, calcular el nivel de cortocircuito máximo que deberá soportar el sistema de tierras, dimensionar el calibre del conductor a utilizar, calcular los voltajes de paso y contacto del sistema de puesta a tierra, modificar el diseño previo si es necesario, corroborar el diseño final y proceder a su instalación.

Durante el proceso de diseño es importante no pasar por alto ninguna característica de los materiales ya que de ellos depende el desempeño eficiente del sistema de tierra, además es indispensable la utilización de los medios de conexión adecuados para unir conductores y varillas y respetar el diseño al momento de la

implementación ya que cualquier cambio puede resultar en consecuencias para la integridad de los trabajadores y los equipos.

## CAPÍTULO II Normativa para sistema de puesta a tierra

### 2.1 NORMATIVAS APLICABLES AL DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA TIERRA

Desde el inicio de los sistemas eléctricos existió la incógnita de si los sistemas debían ponerse a tierra o no, dicha interrogante fue solucionada en 1913 por el National Electric Code (NEC), el cual comenzó a obligar a que los sistemas con una tensión mayor a 150 volts entre fase y tierra fueran puestos a tierra.

Durante 1961 se publicó la primera versión del estándar IEEE-80, el cual se desarrolló del análisis e informes elaborados por diversos autores enfocados en el estudio de los sistemas de tierra, entre ellos se destacan: Sverak Balder Tapar, S. J. Schwarz, E. D. Sunde, F. Dawalibi, A. P. Meliopoulos y R. Rundenburg [5]. Dicho estándar sigue siendo utilizado para el diseño de sistemas de puesta a tierra y su versión más reciente es la Guía IEEE para seguridad en la conexión a tierra de subestaciones de corriente alterna (IEEE-STD-80-2013).

En 1991 se publicó el estándar Prácticas recomendadas por IEEE para la conexión a tierra de sistemas eléctricos industriales y comerciales (IEEE-142), cuya versión más reciente es el estándar IEEE-142-2007 también llamado Libro Verde de la IEEE, en él se determinan los aspectos prácticos de puesta a tierra y funciona en conjunto con el estándar Guía IEEE para medir la resistividad de la tierra, la impedancia a tierra y los potenciales de la superficie de la tierra de un sistema de puesta a tierra (IEEE-81-2012) en el cual se encuentran los procedimientos para la medición de la resistividad, la resistencia de sistemas de puesta a tierra, los gradientes de superficie y continuidad de los conductores del sistema de tierra [5]. Además, se relaciona con el Estándar IEEE para la Calificación de Conexiones Permanentes Utilizadas en la Puesta a Tierra de Subestaciones (IEEE-837-2014) en el que se describen las pruebas y criterios que deben seguirse para seleccionar los tipos de conexiones a ser utilizados en los sistemas de tierras.

En México, la Norma Oficial Mexicana Instalaciones Eléctricas, Utilización (NOM-001-SEDE-2012) es la norma que dicta los requerimientos mínimos que deben

cumplir las instalaciones para funcionar de manera correcta, eficiente y segura. En su artículo Puesta a Tierra y Unión (artículo 250) se indican los lineamientos que se deben seguir para realizar la conexión del sistema de puesta a tierra, los tipos de conectores, los tipos de materiales permitidos para su utilización, entre otros.

## 2.2 CAPACIDADES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El sistema de puesta a tierra es un elemento fundamental en los sistemas eléctricos. Consiste en interconectar todo aquel objeto que pudiera actuar como conductor en caso de presentarse una falla eléctrica, sin importar su origen (descarga atmosférica, falla en aislamiento de los conductores, corrientes transitorias, etc.) [5]. Su propósito es garantizar un camino efectivo a tierra evitando así un choque eléctrico por lo que su importancia radica en proporcionar seguridad a los operadores y a los equipos.

Entre las capacidades más importantes con las que debe contar el sistema de tierras se encuentra la capacidad de evitar sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas, por la operación o maniobras de interruptores; proporcionar una vía rápida de descarga de baja impedancia con el fin de mejorar y asegurar el funcionamiento de protecciones; y proporcionar seguridad al personal de la instalación [6]. Además, algunos de los requisitos con los que debe cumplir un sistema de puesta a tierra son: tener una resistencia lo suficientemente baja como para que el sistema se considere sólidamente puesto a tierra (la corriente de falla busca el camino más fácil para regresar a la fuente y por lo tanto una baja resistencia en el sistema de puesta a tierra garantiza que ese será el camino que tomarán las corrientes de falla), la variación de la resistencia del sistema de tierra debida a cambios ambientales debe ser despreciable de tal forma que la falla a tierra tenga la capacidad de ejecutar el disparo de las protecciones a tierra, se deben conducir las corrientes de falla sin provocar voltajes críticos en el área en que se encuentra instalada, debe soportar las corrientes de falla durante el máximo tiempo establecido

sin presentar sobrecalentamientos ni daño en los conductores del sistema de puesta a tierra, y debe ser resistente a la corrosión.

Para que el diseño de un sistema de tierras sea seguro y confiable es necesario que se proporcione un medio físico para llevar a tierra las corrientes eléctricas que se producen bajo condiciones normales o de falla, sin exceder los límites operativos de los equipos y procurando dar continuidad al servicio [7], también debe asegurarse que una persona que transite o permanezca dentro o cerca de las instalaciones que tienen equipo eléctrico energizado no se vea expuesta a potenciales peligrosos que pudieran causarle una descarga eléctrica y por consiguiente un daño a la salud e inclusive la muerte.

En las subestaciones eléctricas el sistema de puesta tierra se construye antes de cimentar el cuarto eléctrico, sin embargo, en instalaciones con más de 50 años de antigüedad o en instalaciones que han sido construidas y aprobadas mediante entidades que no verifican de manera correcta las instalaciones eléctricas, el sistema de puesta a tierra no se encuentra proyectado ni construido en ningún lugar, lo que ocasiona que derivado de diversos problemas presentados por la ausencia de trayectorias a tierra se tenga que construir un sistema de tierras de la instalación principal que se desea aterrizar.

El sistema de puesta a tierra es el conjunto de conductores y electrodos unidos mediante diversos medios para crear una cuadrícula o forma con espacios distribuidos uniformemente en la cual se interconectarán los conductores de puesta a tierra de los elementos y equipos de la instalación eléctrica.

Uno de los objetivos más importantes de un sistema de puesta a tierra es garantizar la seguridad e integridad del personal, debido a esto es de suma importancia conocer los efectos y consecuencias de la circulación de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano [5]. La exposición a altas corrientes puede causar quemaduras eléctricas severas, aunque la consecuencia más peligrosa de tal exposición es una condición cardíaca conocida como fibrilación ventricular o descrito de otra forma, paro de los latidos del corazón.

Los efectos de una corriente eléctrica que circula a través de las partes vitales del cuerpo humano dependen de la duración de la exposición, de la magnitud y de la frecuencia de esta. En la siguiente tabla [8] se muestran los principales efectos fisiológicos derivados de la exposición a distintos niveles de corriente eléctrica.

<b>MAGNITUD DE LA CORRIENTE</b>	<b>EFFECTOS FISIOLÓGICOS DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN</b>
0-0.5 mA	No se presentan sensaciones ni efectos. El umbral de percepción se sitúa en 0.5 mA.
0.5-10 mA	Calambres y movimientos reflejos musculares. El umbral de no soltar se sitúa en 10 mA.
10-25 mA	Contracciones musculares, agarrotamiento de brazos y piernas con dificultad de soltar objetos, aumento de la presión arterial y dificultades respiratorias.
25-40 mA	Fuerte tetanización, irregularidades cardíacas, quemaduras, asfixia si el tiempo de exposición es mayor a 4 segundos.
40-100 mA	Efectos anteriores con mayor intensidad y gravedad, fibrilación y arritmias cardíacas.
100 mA-1 A	Fibrilación y paro cardíaco, quemaduras muy graves, alto riesgo de muerte.
1-5 A	Quemaduras muy graves, paro cardíaco con elevada probabilidad de muerte.

Tabla 1. *Efectos fisiológicos de la exposición a diversos niveles de corriente [8].*

Los efectos fisiológicos más comunes de la corriente eléctrica pasando a través del cuerpo humano conforme aumenta la magnitud de esta corriente, son la percepción en el valor umbral de la corriente, la contracción muscular, pérdida del conocimiento, la fibrilación del corazón, el bloqueo nervioso de la respiración, y las quemaduras eléctricas.

La corriente tolerable por el cuerpo humano es de 0.5 mA correspondiente al umbral de percepción; es decir la magnitud mínima de corriente a la que una persona puede ser capaz de detectar una ligera sensación de hormigueo o cosquilleo en las manos o dedos causado por el paso de la corriente [8]. En general las corrientes de 1 mA a 9 mA son las corrientes que se pueden soltar; aun cuando la sensación es desagradable al sostener esas corrientes, no se encuentra en peligro la vida de ninguna persona.

En el rango de 9 mA a 25 mA, las corrientes son dolorosas y puede ser difícil o imposible soltar los objetos energizados que se están sujetando con la mano. Si las corrientes son aún mayores las contracciones musculares dificultan la respiración. Los efectos antes mencionados no suelen ser permanentes, desaparecen cuando se interrumpe la corriente, a menos que la contracción sea muy severa y la respiración se detenga durante algunos minutos en lugar de segundos. En ese tipo de casos, a menudo la persona afectada responde positivamente a la resucitación [9].

Para estos casos después de retirar la fuente de corriente, una persona capacitada en reanimación cardiopulmonar (RCP) debe administrar RCP hasta que la víctima pueda ser trasladada a algún centro de salud.

Otro factor para tomar en cuenta es la importancia de la duración de la falla ya que el despeje de fallas a tierra en un tiempo corto puede ser ventajoso tomando en cuenta que la probabilidad de la exposición a una descarga eléctrica puede ser reducida por el rápido tiempo de despeje de fallas, en contraste con situaciones en las que las corrientes de falla podrían persistir durante varios minutos [6]. El riesgo de lesiones graves o la muerte pueden ser reducidos si la duración del flujo de corriente a través del cuerpo es muy breve.

Los valores de magnitud y duración de la corriente conducida a través del cuerpo humano a 60 Hz deben ser menores que aquellos que puede ocasionar fibrilación ventricular del corazón. Este valor puede, por lo tanto, estar basado en el tiempo de despeje de las protecciones primarias, o de la protección de respaldo. La siguiente ecuación puede ser usada para conocer el límite de la corriente tolerable por el cuerpo humano para pesos promedio de 50 kg, limitada a un rango de tiempo entre 0.03 s y 3.0 s, es obvio que no es válida para duraciones muy cortas o largas.

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Para pesos promedio de cuerpos de 50 kg [1].} \quad (2.1)$$

Donde:

$I_B$  Es el límite de la corriente tolerable por el cuerpo humano

$t_s$  Es el tiempo de duración de la falla en segundos.

Generalmente las trayectorias de las corrientes a través del cuerpo se consideran de mano a pies o de un pie a otro. También cabe mencionar que la resistencia del cuerpo humano se reduce por el daño de la piel en el punto de contacto. Una tensión entre los dos pies es dolorosa pero no fatal, y podría dar lugar a una caída que podría causar un flujo de corriente mayor a través de la zona del pecho. El grado de este riesgo dependerá también de la duración de la falla y de la posibilidad de otro choque.

Típicamente se toma 1000  $\Omega$  como el valor promedio de la resistencia del cuerpo humano para todas las trayectorias de la corriente, de mano a pies y de mano a mano o de un pie a otro, etc. [1]. Siempre y cuando la piel donde se realice el contacto se encuentre seca.

### 2.3 PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y SUS COMPONENTES.

Dentro del diseño correcto de un sistema de puesta a tierra es importante conocer u obtener distintas variables que van directamente relacionadas con cualquier sistema de puesta a tierra. No existen dos sistemas de tierra iguales, cada uno es diseñado de acuerdo con las necesidades y características del sitio al que va a aplicarse. Conociendo ciertos parámetros se garantiza que el diseño será correcto y que se desempeñará de manera eficiente ante cualquier falla.

#### ***RESISTIVIDAD DEL TERRENO.***

El tipo de terreno, y las características eléctricas del lugar en que se va a montar el sistema de puesta a tierra constituye una parte importante para estudiar antes de elaborar cualquier diseño, las corrientes de falla se disipan mediante la tierra a través del sistema de puesta a tierra, pero, así como los conductores y las varillas cuentan con resistencias también la tierra cuenta con ese parámetro y es necesario estudiarlo y conocerlo.

Existe una gran diversidad de suelos con características tan diferentes que algunos conducen mayor electricidad que otros, por lo tanto, la resistividad del terreno puede ser muy diferente de un punto a otro, aun estando en la misma ubicación [5]. Cuando se tiene un valor de resistividad alto se considera que el suelo es un mal conductor. Sin embargo, la mayoría de estos son buenos conductores, especialmente en épocas de lluvia.

La resistividad del terreno depende de diversos factores tales como la naturaleza química del suelo, de la humedad de la tierra y la temperatura de la localidad. Es posible obtener un valor normalizado de resistividad del terreno consultando tablas predeterminadas que indican valores para cada uno de los terrenos, sin embargo, al ser valores normalizados no contemplan las condiciones especiales que pudieran presentarse en el sitio de estudio. No es recomendable utilizarlas debido a que son valores promedio derivados de estadísticas por lo que emplear dichos valores compromete la eficiencia del sistema a diseñarse.

Es aconsejable realizar las mediciones de resistividad del terreno para obtener datos certeros referentes a los valores de resistividad de este y evitar errores derivados del uso de tablas normalizadas. La resistividad del terreno se expresa con la letra  $\rho$  y sus unidades son  $\Omega\cdot m$ .

Conocer la resistividad de la tierra es útil para determinar la mejor ubicación y profundidad para instalar los electrodos que conforman el sistema de puesta a tierra. Normalmente este tipo de mediciones se realizan antes de construir subestaciones, torres de transmisión, etc., pero en algunos casos dichas mediciones no fueron realizadas al inicio de las construcciones y por lo tanto deben ser hechas cuando se quiere construir un sistema de puesta a tierra.

Para realizar la medición de resistividad del terreno es necesario emplear un telurómetro, terrómetro o un megger de tierras certificado y calibrado, es recomendable calibrar los equipos de medición anualmente para garantizar que los valores que se obtienen de ellos son correctos. También deben revisarse los accesorios del equipo de medición como las picas o puntas de prueba que generalmente vienen incluidas con el instrumento, además de emplear el equipo de protección adecuado para efectuar las mediciones sin poner en riesgo al personal que tomará las lecturas. Para obtener los datos de la resistividad del terreno puede emplearse cualquiera de los métodos descritos a continuación.

### ***Método de Wenner***

Este método de prueba consiste en insertar cuatro electrodos correspondientes al equipo de medición en el suelo. Deben ser colocados en línea recta y enterrados a una misma profundidad debido a que las mediciones de resistividad dependen de la distancia existente entre electrodos y de la resistividad propia del terreno, dependen del contacto que se haga con tierra y son independientes del tamaño o material de los electrodos de prueba.

El funcionamiento de este método se debe a la inyección de corriente directa o de baja frecuencia mediante la tierra entre los dos electrodos localizados en los extremos del arreglo, mientras que el potencial se mide entre los electrodos

centrales. La resistividad aparente se encuentra descrita por la siguiente fórmula [10]:

$$\rho = \frac{4 * \pi * A * R}{1 + \left( \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} \right) - \left( \frac{2A}{\sqrt{4A^2 + 4B^2}} \right)} \quad (2.2)$$

Donde:

$\rho$  es la resistividad aparente del terreno en ohms-metro ( $\Omega$ -m).

A es la distancia de separación entre los electrodos de prueba.

R es la resistencia medida por el instrumento de medición.

B es la longitud de las varillas

Si B es pequeña en comparación con A, la ecuación anterior se puede simplificar como

$$\rho = 2\pi AR \quad (2.3)$$

### ***Método de Schulmbeger-Palmer***

En este método, igual que con el anterior, los electrodos de emisión de la corriente y los de medición de la tensión están en línea recta, se diferencia en la separación entre electrodos. La distancia entre los electrodos centrales correspondientes a la medición de potencial se mantiene constante y las mediciones se efectúan modificando la distancia de los electrodos de emisión de corriente.

La resistividad aparente calculada con este método se encuentra descrita por la siguiente fórmula [5]:

$$\rho = \frac{\pi C(C + D)R}{D} \quad (2.4)$$

Donde:

$\rho$  es la resistividad aparente del terreno en Ohm-metro

C es el distanciamiento entre el electrodo de corriente y su correspondiente de potencial

D es el distanciamiento entre los electrodos de potencial

R es la resistencia a tierra medida.

### ***Método de la Caída Porcentual***

Este método es el más utilizado a la hora de realizar la medición de la resistividad de sistemas de tierras y también es conocido como el método de los 3 puntos o el método del 62%. El método consiste en inducir una corriente conocida que circule por la tierra entrado por un electrodo C2 y saliendo por el electrodo bajo prueba.

La metodología para seguir para realizar la medición de la resistencia de un electrodo de puesta a tierra es la siguiente, primero que nada, hay que desenergizar la instalación eléctrica en el punto donde se realizara la medición. Después se desconecta el conductor del electrodo de puesta a tierra que se pondrá bajo prueba y se procede a realizar la medición.

Se deberá colocar el electrodo C2 a la distancia máxima disponible que se tenga para realizar la medición, en línea recta desde el electrodo bajo prueba. La razón por la cual esté método es conocido como del 62% es porque el electrodo C1 se entierra a una distancia del 62% de la distancia total del electrodo C2. La medida de potencial entre los electrodos C2 y C1 se toma como el voltaje V para hallar la resistencia desconocida por medio de la relación V/I. con esta resistencia se procede a calcular la resistividad [5].

$$\rho = \frac{2\pi LrR}{\ln\left(\frac{8Lr}{d}\right) - 1} \quad (2.5)$$

Donde:

$\rho$  es la resistividad aparente.

Lr es la longitud del electrodo bajo prueba

R es la resistencia medida

d es el diámetro de la varilla.

En México la NOM-022-STPS Vigente exige que se realicen mediciones una vez al año de resistencia a tierra de los electrodos de equipos que producen electricidad estática y del sistema de protección contra descargas atmosféricas (Pararrayos). Exigiendo que los electrodos de puesta a tierra de equipos cumplan con máximo 25  $\Omega$  y para el sistema de pararrayos no mayor a 10  $\Omega$  [4].

Para el caso de las subestaciones eléctricas, la NOM-001-SEDE 2012 en el art. 921(D) dice que deben efectuarse pruebas periódicamente durante la operación, anotando los registros para comprobar que los valores del sistema de tierra se ajustan a los valores de diseño, de la misma forma se verifica que las condiciones originales se han conservado a lo largo del tiempo.

### ***VARIABLES QUE AFECTAN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.***

Existen diversas condiciones que modifican la resistividad de un suelo o terreno de forma significativa y deben ser tomados en cuenta al momento de diseñar el modelo del suelo, entre ellos se encuentran la humedad, la temperatura, la compactación del suelo, la concentración de sales disueltas y los cambios climáticos en el terreno.

Estratigrafía del terreno: La resistividad del terreno cambia dependiendo de la orientación en sentido horizontal o en sentido vertical. Los terrenos están formados por diferentes capas de agregados y por lo tanto de distintas resistividades [11].

Humedad: La humedad que posee un terreno es un factor que determina su resistividad. Siempre que el terreno se encuentre húmedo o mojado disminuirá su resistividad respecto a la que tendría si estuviera seco [11]. El contenido de humedad depende en mayor parte de los cambios climáticos en las diferentes épocas del año.

Temperatura: La temperatura del terreno es otro factor importante por considerar, el aire, el sol y las capas de arena seca de la superficie hacen que un suelo se

vuelva aislante [11], es decir, que su resistividad sea muy grande y no permita el flujo de la corriente.

El enterramiento de los electrodos debe ser profundo con la finalidad de volver más efectivo el sistema de puesta a tierra tomando en cuenta que las variables de humedad y temperatura del suelo suelen ser más uniformes a mayor profundidad. Este es uno de los motivos del porque se entierran a 3 metros las varillas (electrodos), puesto que cuando se llega a la capa freática la resistencia no solo es baja, sino que también es estable.

Concentración de sales: El grado de concentración de sales en el suelo es un factor importante en la resistividad de este. La conductividad del suelo mejora notablemente al existir una mayor concentración de sal en el mismo [12]. De forma general, para mejorar la conductividad de un terreno se deben agregar sales, lo cual se consigue suministrando electrolitos.

Compactación del terreno: La compactación del suelo también influye en la resistividad del terreno, cuanto más compacto se encuentre mejor será la conductividad de este. Cuando se colocan los electrodos de puesta a tierra y los conductores del sistema de puesta a tierra, la vibración al ir enterrando va creando pequeños espacios en entre los electrodos y el terreno por lo que después habrá que compactar de nuevo para tener un mejor contacto electrodo-terreno.

Entonces se entiende que cuando la compactación del terreno es grande, la resistividad disminuye. Ya que una mayor compactación del suelo disminuye la distancia entre las partículas como las sales contenidas y se logra una mejor conducción a través de la humedad, por ello siempre se procura colocar los electrodos de puesta a tierra en terrenos muy compactos.

### ***ELEVACIONES DE POTENCIAL DE TIERRA (GPR).***

Una elevación del potencial de tierra (GPR), es el potencial eléctrico máximo que puede alcanzar un electrodo de puesta a tierra en relación con un punto de puesta a tierra distante que se supone está al potencial de tierra remota. Este voltaje, es

igual a la corriente máxima de la red, multiplicado por la resistencia de la red de tierra [1].

Las elevaciones de potencial de tierra comúnmente son causadas por descargas atmosféricas, pero también se presentan durante las condiciones típicas de falla a tierra. Durante el tiempo que ocurre la falla el flujo de corriente a tierra produce gradientes de potencial dentro y alrededor de la subestación.

Si no se realiza el diseño adecuado del sistema de puesta a tierra existe la posibilidad de que los gradientes de potencial en el suelo pongan en riesgo la vida humana durante una falla a tierra. Por lo tanto, una baja resistencia a tierra no garantiza la seguridad de las personas y las instalaciones.

El sistema de puesta a tierra tiene como finalidad proporcionar una trayectoria física adecuada para conducir la corriente eléctrica hacia la tierra, tanto en condiciones normales como en condiciones de falla sin exceder los límites de seguridad que pudieran poner en riesgo la integridad de quienes se encuentren alrededor de la zona de interés.

En un sistema de puesta a tierra interactúan la tierra intencional, que involucra los electrodos de puesta a tierra, y la tierra accidental, que consiste en una persona expuesta a un gradiente de potencial.

Algunos factores que juegan un papel importante para contar con un gradiente de potencial muy grande son la geometría, la ubicación de los electrodos de puesta a tierra, las características del suelo, entre otros. Por lo cual, es importante realizar el cálculo del gradiente de potencial además de los cálculos necesarios para identificar si el sistema podrá conducir las corrientes de falla a tierra.

Efecto de una capa superficial ( $\rho_s$ ): Una capa de material de alta resistividad, como puede ser grava o roca, a menudo se distribuye en la superficie de la tierra arriba de la red de puesta a tierra del sistema de puesta a tierra con un espesor ( $h_s$ ) de 0.08 m a 0.15 m para incrementar la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación [13].

La profundidad del material superficial, comparada con el radio equivalente de los pies, excluye la suposición de una resistividad uniforme en la dirección vertical cuando se calcula la resistencia de las personas [13]. Para una persona en el área de la subestación, se puede asumir el material superficial de extensión ilimitada en dirección lateral [13].

La corriente a través del cuerpo se disminuirá considerablemente con la adición del material aislante por la gran resistencia de contacto entre la tierra y los pies, esta reducción depende de los valores relativos de las resistividades del suelo y del material superficial, así como del grosor de dicho material superficial [13].

La siguiente ecuación se utiliza para calcular el factor de disminución de la capa superficial  $C_s$ , el cual es un factor correctivo para calcular la resistencia efectiva de los pies en la presencia de una capa superficial  $h_s$  con grosor infinito [1].

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (2.6)$$

Donde:

$\rho$  es la resistividad aparente del terreno

$\rho_s$  es la resistividad superficial del terreno

### **TENSIONES ELÉCTRICAS EN EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.**

Cuando una corriente de falla circula por el terreno se origina una serie de caídas de tensión a lo largo del sistema de puesta a tierra, debido a que el sistema se considera equipotencial. Debido a esta superficie equipotencial creada, el o los electrodos conectados al sistema de puesta a tierra tomarán el valor de la superficie equipotencial a la que están conectados.

Al ir variando la superficie correspondiente a cada electrodo de puesta a tierra el área que afecta la corriente de falla se vuelve cada vez mayor, por lo que el valor de la resistividad crece conforme incrementa el área de la superficie equipotencial

considerada para cada varilla, con lo que se llega a la conclusión de que a cierta distancia del electrodo las caídas de tensión generadas por la corriente de falla y la resistividad del terreno no serán apreciables [14].

Esto desde un punto de vista práctico ya que físicamente las caídas de tensión se darán a través de toda la superficie por la cual fluya la corriente de falla, pero pueden ser despreciables después de cierta distancia.

El potencial más elevado será el del electrodo ya que al aumentar el área de la superficie las caídas de tensión van disminuyendo, en el electrodo de puesta a tierra se encontrará el valor de potencial de tierra o potencial absoluto, mismo potencial que tomaran las masas metálicas conectadas a estos.

En un sistema de puesta a tierra existen diversos voltajes implicados que es importante conocer debido a que son parte esencial de la implementación de este:

- Voltaje de paso: es la diferencia de potencial entre dos puntos diferentes, a una distancia de un paso (1 metro).

El voltaje de paso se calcula de la siguiente manera:

Para personas de 50 kg [1]

$$E_{PASO} = (1000 + 6C_S * \rho_S) * \frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \quad (2.7)$$

Donde:

$E_{PASO}$  es el voltaje de paso tolerable por una persona en V

$C_S$  es el factor de disminución de la capa superficial

$\rho_S$  es la resistividad del material superficial en  $\Omega$ -m

$t_S$  es la duración de la corriente de choque en segundos

- Voltaje de contacto: es la diferencia de potencial entre un elemento metálico puesto a tierra y un punto cualquiera de la superficie del terreno a una distancia horizontal respecto al elemento metálico al alcance de una persona, si un individuo localizado en un punto de la subestación toca con la mano alguna masa metálica y se genera una diferencia de potencial, un voltaje recorre el cuerpo de la persona desde la mano hasta el pie para descargarse a tierra.

El voltaje de contacto se calcula de la siguiente manera:

Para personas de 50 kg [1]

$$E_{CONTACTO} = (1000 + 1.5c_s * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.8)$$

Donde:

$E_{CONTACTO}$  es el voltaje de contacto tolerable por una persona en V

$C_s$  es el factor de disminución de la capa superficial

$\rho_s$  es la resistividad del material superficial en  $\Omega$ -m

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

- Elevación del potencial a tierra (GPR): es el voltaje máximo que la red de tierras puede alcanzar en relación con un punto de puesta a tierra distante que se supone está al potencial de tierra remota. Es equivalente a la corriente máxima de la red multiplicada por la resistencia de la red [1].
- Voltaje de malla: es el voltaje de contacto máximo dentro de la malla del sistema de tierras [1].
- Voltaje de contacto de metal a metal: es la diferencia de potencial entre objetos o estructuras metálicas dentro del sitio de la subestación que se

presenta por contacto directo de mano a mano o de mano a pie [1]. Se presenta entre equipos o elementos metálicos que no se encuentran puestos a tierra.

- Voltaje transferido: es una forma particular del voltaje de paso o de contacto, en este caso el voltaje es transmitido por un elemento metálico desde el sistema de tierras hasta otro lugar de la instalación [1]. En condiciones de falla, el voltaje transferido es igual al GPR.

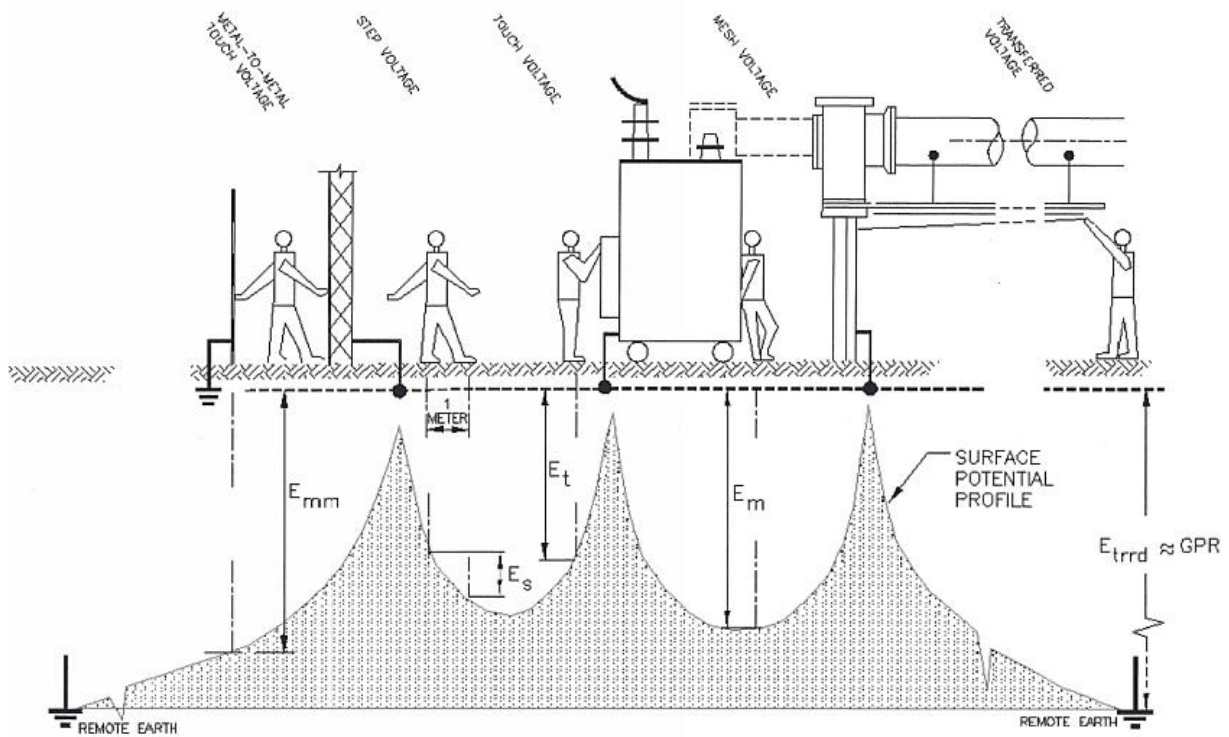


Figura 2.1 Voltajes presentes en un sistema de puesta a tierra

De acuerdo con la norma IEEE-80 existen diversos requerimientos además del GPR, los voltajes de paso y contacto, la resistividad del terreno y la corriente tolerable que deben calcularse y/o cumplirse para que un sistema de puesta a tierra sea considerado seguro y efectivo dentro de los que se encuentra:

- Corriente máxima por disipar en la malla  $I_G$ : se define como el valor máximo de corriente que fluye a través de la malla hacia el suelo [9], se calcula mediante la ecuación

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p \quad (2.9)$$

En donde:

$I_F$  Corriente simétrica de falla a tierra en amperes

$D_f$  Factor de decremento de la componente DC, determina el equivalente RMS de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada, representa el efecto de desplazamiento inicial de DC y su atenuación durante la falla [9]

$S_f$  Factor de división de corriente, representa la relación inversa de la corriente de falla simétrica a la porción de corriente que fluye entre la red de tierra y el suelo circundante [9]

$C_p$  Factor de crecimiento, se considera como 1 cuando la subestación o el lugar de aplicación no pretende crecer

- Duración de la falla  $t_f$  y duración del choque  $t_s$ : se suponen de la misma magnitud a menos que existan recierres. La magnitud  $t_f$  refleja el tiempo de despeje de la falla relacionado con el tiempo de disparo del interruptor asociado para liberarla [9], si se considera que para una falla a tierra un interruptor actúa en 3 ciclos y sabiendo que un ciclo equivale a 16 milisegundos (0.016 segundos) entonces la falla será liberada en 48 milisegundos (0.048 segundos), por lo que  $t_f$  puede tomar el valor aproximado de 0.1 segundos. Mientras más grande sea  $t_f$  más grande es la corriente de falla.

- Geometría del sistema de tierra: el espaciamiento entre conductores tiene un valor típico de entre 3 y 15 metros, las profundidades típicas para la instalación de la cuadrícula van desde 0.5 metros hasta 1.5 metros dependiendo de las características del suelo y la facilidad para excavar en sitio. Los conductores empleados típicamente en el desarrollo de un sistema de tierra van desde 2/0 AWG (67 mm<sup>2</sup>) a 500 KCM (253 mm<sup>2</sup>). El factor geométrico más importante en la determinación de la resistencia del sistema de puesta a tierra es el área de la malla. Mientras más grande es el área del sistema menor es la resistencia de la red y por lo tanto menor es el GPR [9].

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN EL DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Un concepto básico que se debe entender es el de la tierra física como parte de un sistema de puesta a tierra. Se asume que el planeta tierra tiene un potencial cero, que puede ser un excelente o pésimo conductor eléctrico, esto dependerá de ciertas características, como el grado de humedad, tipo de terreno y otras consideraciones naturales.

Si se asume que el planeta tierra cuenta con un potencial de cero, todas las partes metálicas de los equipos que no conducen energía eléctrica deben igualarse al potencial del planeta tierra.

Los principales componentes de un sistema de puesta a tierra son:

- Electrodo de puesta a tierra
- Conductores
- Conectores

### ***ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA***

La NOM-001-SEDE-2012 define al electrodo de puesta a tierra como el objeto conductor mediante el cual se establece una conexión directa a tierra [3]. Mientras que el estándar IEEE-80-2013 nos dice que es un conductor incrustado en la tierra

y usado para recolectar la corriente de tierra, o la disipación de corriente de tierra hacia el suelo. Entonces un electrodo de puesta a tierra es un elemento conductor, generalmente metálico, el cual se entierra en el terreno con el fin de drenar las corrientes de falla además de mantener un potencial de tierra (cero) en todos los conductores que estén conectados a él.

Estos electrodos de puesta a tierra se fabrican de acero, acero galvanizado, acero inoxidable, cobre, o de una combinación de éstos (copperweld). La selección de alguno de estos dependerá de las características del terreno, tomando en cuenta que son mucho más importantes en terrenos con poca vegetación, donde casi no llueve o terrenos secos. A continuación, se presentan los electrodos de puesta a tierra más comúnmente utilizados.

- Varilla Copperweld: Es el electrodo de puesta a tierra más comúnmente debido a su bajo costo, dicho electrodo al ser una varilla no cuenta con un área de contacto amplia, sin embargo, al poseer una longitud considerable hace contacto con gran cantidad de tierra al ser instalado y de esta forma se obtienen valores bajos de resistencia. Son elaborados de acero recubierto de cobre (copperweld) obteniendo así las ventajas de conductividad del cobre con la alta resistencia mecánica del acero, su longitud típica es de 3.05 metros y sus diámetros comerciales son: 5/8" y 3/4" o 14.3 mm<sup>2</sup> y 19 mm<sup>2</sup> respectivamente [11]. La NOM-001-SEDE-2012, en su artículo 250-53(3) (g). Especifica que este tipo de electrodo se debe de enterrar a una profundidad mínima de 2.44 metros, excepto cuando se encuentre roca en la parte baja, entonces el electrodo se deberá enterrar en un ángulo oblicuo no mayor a 45 grados en una zanja de por lo menos 75 centímetros de profundidad.
- Electrodo tipo Placa: Según la NOM-001-SEDE-2012 Art. 250-52(7). Cada electrodo de placa debe contener mínimo 0.20 m<sup>2</sup> de superficie expuesta al suelo. Los electrodos de placas de hierro o acero, desnudos o con recubrimiento conductivo, deben de tener como mínimo 1.52 milímetros de espesor [3], además en el art. 250-53(3) (h) se especifica que este tipo de electrodo se debe de instalar a una distancia mínima de 75 centímetros por

debajo de la superficie de la tierra. Estos electrodos al tener una gran área de contacto se recomiendan ser utilizados en terrenos que tengan una gran resistividad.

- Anillo de tierra: Es un anillo en contacto directo con la tierra, que rodea el edificio o estructura, con una longitud mínima de 6 metros de conductor de cobre desnudo de tamaño 33.6 mm<sup>2</sup> (2 AWG) o mayor. Este tipo de electrodo se deberá enterrar a una profundidad mínima de 75 centímetros de acuerdo con los Art. 250-52(4) y Art. 250-53(3) (f) de la NOM-001-SEDE-2012 [3].

Los electrodos de puesta a tierra siguientes son los existentes en el mercado, pero no están especificados por la NOM-001-SEDE-12.

- Rehilete: Este electrodo se conforma de dos placas cruzadas, las cuales son soldadas con el conductor de puesta a tierra, mediante soldadura exotérmica, la ventaja de este tipo de electrodo es que tiene mucha área de contacto por lo que es bueno para terrenos donde es difícil excavar.
- Electrodos químicos: Estos electrodos son compuestos químicos que se adiciona a los electrodos para aumentar su conductividad y de esta forma disminuir el valor de resistencia, la ventaja al usar este tipo de electrodos es que se obtienen resultados favorables de inmediato sin embargo requieren ser vigilados semestralmente para garantizar su efectividad, estos electrodos químicos se componen de:
  - Carbón mineral: Este material sustituye al carbón vegetal por tener mejores cualidades, aunque requiere de cierta forma de la humedad.
  - Grafito rígido: La ventaja de este material es que al estar constituido de grafito es que no le afecta tanto la corrosión a diferencia de los metales.
- Otros electrodos: la NOM-001-SEDE-2012, en su artículo 250-52(a) establece que además de los electrodos ya antes mencionados también se pueden usar como electrodo de puesta a tierra los siguientes [3]:
  - Tuberías metálicas para agua: siempre y cuando estén en contacto directo con la tierra 3 metros o más.

- Estructuras metálicas de los edificios: solo si está conectada a tierra mediante alguno de los siguientes métodos:
  - Cuando menos un elemento metálico estructural está en contacto directo con la tierra 3 metros o más, con o sin recubrimiento.
  - Los tornillos de sujeción de alguna estructura están conectados a un electrodo recubierto en concreto, y este está localizado en los pilotes o la cimentación.
  - Estos tornillos deberán estar conectados por medio de soldadura autógena, eléctrica o por soldadura exotérmica.
- Electrodo recubierto en concreto: siempre y cuando consistan al menos de:
  - Una o más barras o varillas reforzadas de acero, desnudas o galvanizadas con zinc u otro recubrimiento eléctricamente conductor, de al menos 13 milímetros de diámetro e instaladas en una longitud continua de 6 metros.
  - Conductor desnudo de cobre no menor que 21.2 mm<sup>2</sup> (4 AWG). No permitido para uso como electrodo de puesta a tierra. Los siguientes materiales no podrán ser usados como electrodos de puesta a tierra de acuerdo con el Art. 250-52(b):
    - Sistemas de tubería metálica subterránea para gas.
    - Aluminio.

Un electrodo de puesta a tierra contiene tres características importantes: la resistencia del electrodo de puesta a tierra y sus conectores, la resistencia de contacto entre el electrodo de puesta a tierra y la tierra adyacente a él y la resistencia de la tierra alrededor del electrodo.

La resistencia del electrodo de puesta a tierra es la resistencia propia del elemento seleccionado ya sea varilla, anillo, estructura, etc. Estos son generalmente de una sección transversal para que su resistencia sea una parte menor de la resistencia total del sistema de tierra.

Cuando el electrodo de puesta tierra se encuentra libre de pintura y grasa o de cualquier otro recubrimiento y la tierra se encuentra compactada, se puede concluir que la resistencia de contacto es despreciable y por lo tanto la resistencia de contacto entre el electrodo de puesta a tierra y la tierra es cero.

La resistencia de la tierra alrededor del electrodo de puesta a tierra depende de factores naturales como el tipo de terreno, el grado de humedad y de la temperatura. Los valores que generalmente se manejan son de 50 a 50000 ohms-m.

Para instalaciones eléctricas la NOM-001-SEDE-2012 en su artículo 250-50 dice que todos los electrodos de puesta a tierra, que estén presentes en cada edificio o estructura alimentada se deben unir entre sí para así formar el sistema de electrodos de puesta a tierra. Cuando no existe ninguno de estos electrodos de puesta a tierra, se debe instalar y usar uno o más de los electrodos de puesta a tierra [3].

En ningún caso, el valor de resistencia a tierra del sistema de electrodos de puesta a tierra puede ser mayor que 25 ohms, sin embargo, se debe de entender que 25 ohms no es el valor óptimo, lo que se desea es que el valor de la resistencia a tierra sea el más bajo posible. Para lograr esto se pueden aplicar las siguientes soluciones:

- Aumento de la sección transversal de un electrodo: aunque normalmente se obtiene muy poco valor en reducción de resistencia a tierra aumentando la sección transversal de los electrodos, es muy necesario hacerlo de acuerdo con los requisitos mecánicos y de corrosión.
- Profundidad de enterramiento: mientras más grande sea la profundidad de enterramiento, menor será el valor obtenido de resistencia. Esto es uno de los motivos por lo que generalmente se entierran a 3 metros del nivel del suelo.
- Proximidad entre electrodos: si se utilizan 2 o más electrodos de puesta a tierra conectados al mismo sistema (asumiendo que son de la misma longitud y están enterrados a la misma profundidad) el artículo 250-53(3) (b) especifica que se deben espaciar mínimo 1.80 metros entre ellos, sin embargo, lo óptimo sería espaciarlos por lo menos la longitud de estos [3].

Por ejemplo, si se cuenta con 2 electrodos espaciados a 3 metros de distancia, la resistencia se reducirá en aproximadamente 60%, si el espacio se incrementa a 6 metros, la reducción será aproximadamente del 50%.

Cuando se unen varios electrodos mediante un cable de cobre se forma un sistema de puesta a tierra. Dicho sistema es una malla o rejilla formada por la unión de conductores horizontales y perpendiculares espaciados de manera uniforme, interconectados a su vez con electrodos verticales. Los sistemas de puesta a tierra, también llamados mallas de tierras debido a la forma en que están constituidos, se emplean especialmente cuando el objetivo principal de la puesta a tierra es mantener un control de potenciales en la superficie del terreno, con un bajo valor de resistencia.

Este tipo de arreglo es muy usado en subestaciones eléctricas ya que reduce los gradientes de potencial y los voltajes de paso y contacto que puedan ocurrir durante una descarga atmosférica.

### ***CONDUCTORES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.***

Para formar un sistema de puesta a tierra eficiente, se debe interconectar el conductor de puesta a tierra de equipos al conductor del electrodo de puesta a tierra formando puentes de unión. El Material del conductor del electrodo de puesta a tierra debe ser de cobre.

El material seleccionado debe ser resistente a cualquier condición corrosiva existente en la instalación o debe estar protegido adecuadamente contra la corrosión de acuerdo con el artículo 250-62 de la NOM-001-SEDE-2012. El conductor del electrodo de puesta a tierra debe estar dimensionado según la tabla 250-66 de la NOM-001-SEDE-2012.

Para el caso del conductor de puesta a tierra de equipos, el material usado puede ser cobre o aluminio según la NOM-001-SEDE-2012. Puede ser sólido o cableado, aislado, cubierto o desnudo, en forma de un alambre o una barra de cualquier forma. En caso de emplear conductores cubiertos o aislados individualmente deben tener un acabado exterior continuo color verde.

El tamaño de los conductores de puesta a tierra de equipos no debe ser menor a los mostrados en la tabla 250-122 de la NOM-001-SEDE-2012 pero en ningún caso se exigirá que sean mayores a los conductores que alimentan al equipo.

Un conductor de puesta a tierra de equipo no se debe utilizar como conductor del electrodo de puesta a tierra. Cuando se incrementa el tamaño de los conductores de fase, también se debe incrementar el tamaño de los conductores de puesta a tierra de equipos [11].

Cabe señalar que la selección adecuada del material del conductor mantendrá en buenas condiciones la integridad del sistema de puesta a tierra durante años, si los conductores son de tamaño adecuado y las condiciones del suelo no son corrosivas para el material utilizado [9]. Cada elemento del sistema de puesta a tierra, incluyendo conductores de la cuadrícula, conexiones, cables de conexión, y todos los electrodos primarios se debe evaluar y definir el material a emplear y el calibre a utilizar.

Las siguientes características deben ser evaluadas al seleccionar un elemento:

- Debe tener conductividad suficiente, por lo que no contribuirá sustancialmente a las diferencias de voltaje locales.
- Resistir la fusión y el deterioro mecánico bajo la combinación más desfavorable de magnitud y duración de falla.
- Ser mecánicamente confiable y robusto en un alto grado.
- Ser capaz de mantener su función, incluso cuando se expone a la corrosión o abuso físico.

Para el caso del conductor del sistema de puesta a tierra los materiales más usados son el cobre y el cobre estañado o copperweld. Podría usarse cualquier metal, pero la mayoría de los metales comunes se corroen fácilmente a diferencia del cobre que ha destacado en ese aspecto, además de ser un buen conductor. Otro material muy usado para los sistemas de puesta a tierra es el acero revestido de cobre y acero chapado en cobre, especialmente en ambientes en los que el robo de materiales es un problema.

Para la selección de un correcto calibre para el conductor del sistema de puesta a tierra se debe tomar en cuenta que además de la corrosión el conductor del sistema también sufrirá un esfuerzo mecánico y térmico. A continuación, se muestran las fórmulas para obtener el calibre del conductor [1].

$$A_{mm^2} = I * \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP * 10^4}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (2.10)$$

Donde:

$A_{mm^2}$  es el área del conductor en  $mm^2$

$I$  es la corriente de falla en kA

TCAP es la capacidad térmica por unidad de volumen

$T_m$  es la temperatura máxima permitida en °C

$T_r$  es la temperatura de referencia para las constantes de material en °C

$T_a$  es la temperatura ambiente en °C

$t_c$  es el tiempo de la falla en segundos

$\rho_r$  es la resistividad del conductor a la temperatura de referencia  $T_r$

$K_0$  es  $(1/\alpha_r) - T_r$  en °C

$\alpha_r$  es el coeficiente térmico de la resistividad a la temperatura de referencia  $T_r$ .

De donde la tabla 1 de la IEEE- STD-80-2013 proporciona varios de estos valores. Si el tamaño del conductor se da en Kcmil ( $A_{mm^2} \times 1.974 = A_{kcmil}$ ). La ecuación anterior se convierte en:

$$A_{kcmil} = I * \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (2.11)$$

También se pueden emplear las fórmulas simplificadas para calcular el calibre del conductor utilizando la tabla 2 de constantes de materiales del mismo estándar previamente mencionado. A continuación, se muestra la fórmula simplificada para obtener el área en mm<sup>2</sup>.

$$A_{mm^2} = \frac{I * K_f * \sqrt{t_c}}{1.97352} \quad (2.12)$$

Para obtener el área del conductor en Kcmil se puede utilizar la siguiente fórmula simplificada.

$$A_{kcmil} = I * K_f * \sqrt{t_c} \quad (2.13)$$

Donde:

$I$  es la corriente de falla a tierra

$t_c$  es el tiempo de duración de la falla.

$K_f$  es una constante para diversos materiales dada en la Tabla 2 de la IEEE-STD-80- 2013.

Aunque el tamaño del conductor seleccionado sea correcto es necesario elegir un tamaño mayor del conductor para compensar la reducción gradual de la sección del conductor durante la vida de diseño de la instalación donde el ambiente del suelo tiende a fomentar la corrosión.

Las conexiones derivadas del equipo a la malla pueden estar sometidas a la corriente total de falla a tierra del sistema, mientras que la cuadrícula divide esta corriente de manera que cada segmento de conductor en la red solamente se somete a una fracción de la corriente total de falla [9]. Por lo tanto, los conductores de tierra bajantes pueden tener que ser más grandes que los conductores de la cuadrícula o pueden ser múltiples desde los equipos al sistema de puesta a tierra para tener una corriente admisible suficiente a la corriente de falla total.

## **CONECTORES**

Los conectores son los elementos que se utilizan para unir los conductores de puesta a tierra del sistema, a los electrodos y a los conductores de puesta a tierra de equipos. La NOM-001-SEDE-2012 en su artículo 250-8 [3] establece los métodos permitidos para conectar los conductores de puesta a tierra, los conductores del electrodo de puesta a tierra y los puentes de unión, a continuación, se enlistan dichos medios permitidos:

- Conectores a presión.
- Barras terminales.
- Conectores a presión aprobados para puesta a tierra de equipos y para unión.
- Procesos de soldadura exotérmica.
- Abrazaderas tipo tornillo que enrosquen por lo menos dos hilos o que se aseguren con una tuerca.
- Pijas que entren cuando menos dos hilos en la envolvente.
- Conexiones que son parte de un ensamble.
- Otros medios aprobados.

Características de los conectores. Los conectores deben ser de cobre o aleación de cobre y deben ser aptos para usar a la intemperie, además deben tener un buen agarre sobre los conductores después de ser instalados de acuerdo a las instrucciones del fabricante, es decir que si un conector está especificado para unir ciertos calibres de cables no debe ser utilizado para unir un calibre de conductor diferente, deben tener un acabado uniforme en caso de ser soldaduras exotérmicas, si son conectores mecánicos deben encontrarse en buen estado y no debe contar con grietas, lados agudos o rebabas.

Los conectores deben tener una forma geométrica que garantice la mayor superficie de contacto con los conductores o electrodos de puesta a tierra cuando se ejerza la compresión. Deben permitir una sencilla aplicación, es decir, que su instalación no represente un problema para el instalador utilizando la herramienta adecuada y

debe unir de manera permanente los elementos del sistema de puesta a tierra sin deformarlos o dañarlos.

Es importante que el conector cuente con especificación referente al tamaño o calibre de conductores que admite y que indique las herramientas y materiales para su instalación además de una marca o señal que indique el lugar apto para la compresión. Es responsabilidad del instalador informarse sobre los requisitos y especificaciones de la instalación del conector con el propósito de asegurar que los elementos desempeñarán de manera adecuada su función.

Los medios de conexión más comunes son los conectores mecánicos o a compresión y la soldadura exotérmica. Entre los conectores mecánicos más conocidos en el mercado se encuentran los siguientes:

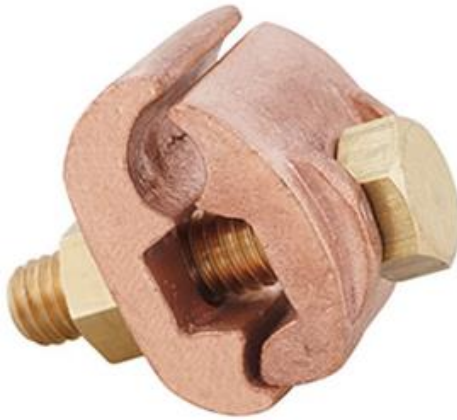
- Conector tipo GAR: es un conector para cable a 90° o paralelo en tubo o varilla. Une un cable de manera paralela o perpendicular a un tubo, barra o varilla [15]. Es fabricado en cobre lo que evita el efecto de corrosión galvánica conocido por suceder entre dos metales diferentes en contacto con un medio húmedo [15]. Existen para conectar varillas desde 5/8" hasta 2 3/8" y conductor de cobre desde 8 AWG hasta 250 KCM.



*Figura 2.2 Conector tipo GAR*

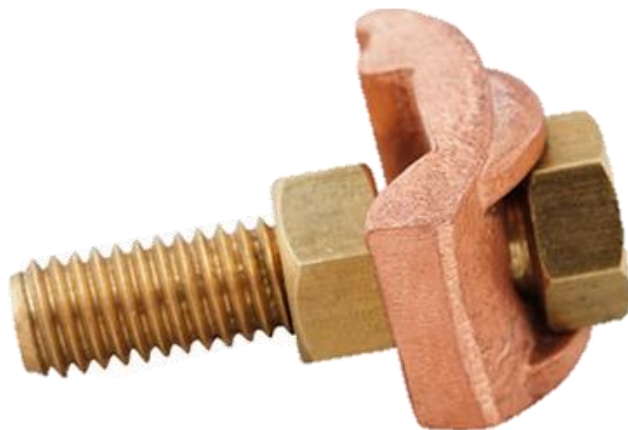
- Conector tipo GB: es un conector para cable a superficie plana o barra. Cuenta con un elemento que separa el conductor de la superficie plana o barra y un tornillo que sujeta las dos piezas [15]. Elaborado de cobre con

tornillos de bronce. Diseñado para conductor de cobre desde calibre 8 AWG hasta 250 KCM.



*Figura 2.3 Conector tipo GB*

- Conector tipo GBM: es un conector muy similar al GB, sirve para conectar un conductor a una superficie plana [15], su diferencia radica en que une el conductor directamente a la barra de cobre sin un elemento de por medio. Cuenta con una pieza elaborada en cobre y tornillo de bronce. Diseñado para conductor de cobre desde calibre 8 AWG hasta 250 KCM.



*Figura 2.4 Conector tipo GBM*

- Conector tipo GK: es un conector empleado para unir tres cables de cobre a un tubo o varilla [15]. Elaborado en cobre. Puede ser encontrado

para varillas desde 5/8" hasta 3/4" y conductor de cobre desde calibre 8 AWG hasta 250 KCM.



*Figura 2.5 Conector tipo GK*

- Conector tipo GC: es un conector para unir dos cables a una superficie plana o barra [15]. Constituido por dos piezas de cobre y un tornillo de bronce. Diseñado para conductores de cobre desde 8 AWG hasta 250 KCM.



*Figura 2.6 Conector tipo GC*

- Conector tipo GCM: es un conector muy similar al GC, sirve para unir dos cables a una superficie plana o barra [15]. Constituido por una

pieza de cobre y un tornillo de bronce. Diseñado para conductores de cobre desde 8 AWG hasta 250 KCM.



*Figura 2.7 Conector tipo GCM*

- Conector tipo GX: es un conector para unir dos conductores de diferente calibre en forma de cruz [15]. Elaborado en cobre. Puede ser encontrado para calibres desde 4 AWG hasta 250 KCM.



*Figura 2.8 Conector tipo GX*

- Conector tipo GKP o GRC: es un conector para unir un cable de cobre a una varilla [15]. Elaborado en cobre. Puede encontrarse para

varillas desde tamaño 5/8" hasta 3/4" y para cable de cobre desde calibre 8 AWG hasta 1/0 AWG.



*Figura 2.9 Conector tipo GKP o GRC*

- Conector tipo YGL-C: es un conector de cobre electrolítico en cruz tipo compresión para sistemas de puesta a tierra, permite el ajuste de los elementos de compresión antes de su instalación [15]. Existen dos modelos de este conector, de cable a cable para calibres desde 6 AWG hasta 500 KCM, y de varilla a cable, para varillas desde 1/2" hasta 3/4" y conductor desde 6 AWG hasta 500 KCM.



*Figura 2.10 Conector tipo YGL-C*

- Conector tipo YGHC-C: es un conector derivador de cobre electrolítico a compresión para tierra [15]. Diseñado para cable de cobre desde calibre 6 AWG hasta 500 KCM.



*Figura 2.11 Conector tipo YGHC-C*

- Conector tipo YGHP-C: es un conector de cobre electrolítico a compresión para sistemas de tierra, puede ser utilizado como derivador o empalme superpuesto [15]. Diseñado para unir un conductor principal con calibre desde 6 AWG hasta 500 KCM o varilla desde 1/2" hasta 3/4" y un conductor derivado desde calibre 6 AWG hasta 500 KCM.



*Figura 2.12 Conector tipo YGHP-C*

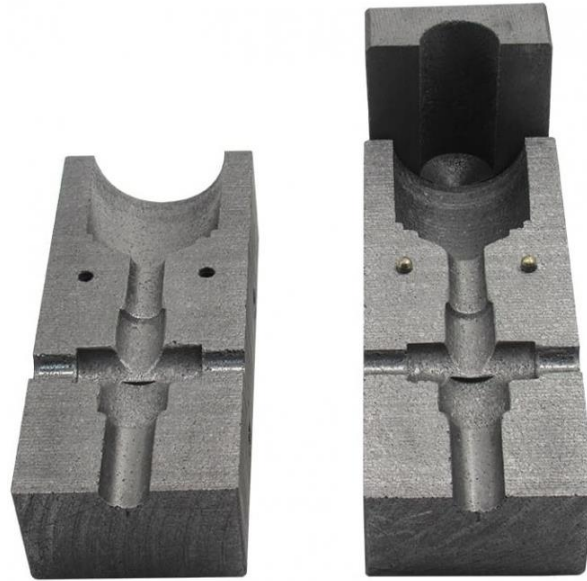
- Conector tipo YGHR-C: es un conector de cobre electrolítico a compresión para sistemas de puesta a tierra, para unir varilla a cable de cobre [15]. Elaborado para conductor de cobre como línea principal desde calibre 2/0 AWG hasta 500 KCM y una derivación desde 1/2" hasta 1".



*Figura 2.13* Conector tipo YGHR-C

Además del uso de conectores mecánicos se hace uso de soldadura exotérmica, la cual es un medio de conexión mediante el cual se sueldan dos conductores o una varilla y un conductor, su uso garantiza la conductividad de los materiales y el riesgo de que las conexiones se degraden es mínimo. Para realizar una soldadura de este tipo es necesario emplear diversos elementos que se enlistan a continuación [16]:

- Molde: maquinado en grafito de manera precisa para la conexión que se va a realizar y para un tamaño específico de conductores. Existe gran variedad de tipos de uniones, de cable a cable, cable a varilla e inclusive cable a estructuras de acero. Cada molde suele suministrarse con una hoja de instrucciones generales sobre seguridad, preparación de los conductores e instrucciones sobre cómo aplicar la soldadura [16]. Además, cada molde tiene una placa de datos que indica su nombre, los elementos a soldar y la carga de soldadura requerida.

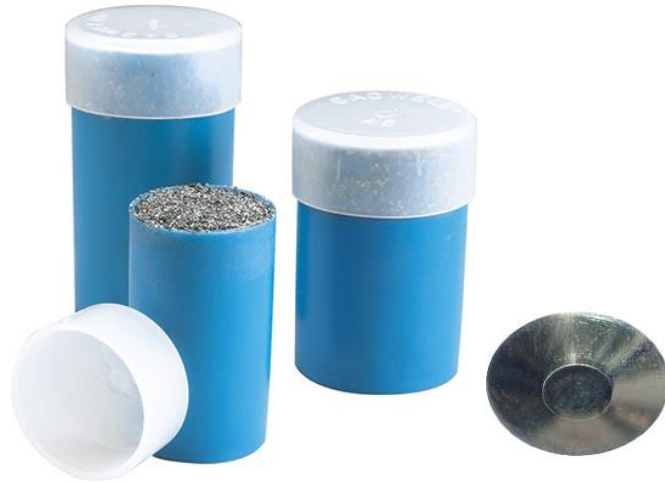


*Figura 2.14* Ejemplo de molde para soldadura exotérmica



*Figura 2.15* Ejemplo de soldaduras exotérmicas realizadas con moldes

- Carga o soldadura: se suministra según el tipo de molde, es una mezcla de óxido de cobre y aluminio que se enciende a  $870^{\circ}$ , incluye un polvo plateado que tiene como propósito iniciar la reacción [16]. Se enciende con un chispero. Por cada carga se suministra un disco metálico que se coloca al fondo del molde antes de vaciar la mezcla de soldadura y se derrite durante el proceso de ignición.



*Figura 2.16* Ejemplo de carga o soldadura y disco metálico

- Chispero: se emplea para iniciar la flama del polvo de ignición, se emplea en lugar de un encendedor porque solamente se requiere una chispa, además este utensilio funciona para brindarle seguridad al instalador.



*Figura 2.17* Chispero para soldadura exotérmica

- Cepillo de fibras suaves: empleado para limpiar el molde después de cada soldadura para evitar que el material de los trabajos previos se acumule y ocasione una soldadura de baja calidad.



*Figura 2.18* Cepillo de fibras suaves

- Cepillo de alambre: empleado para limpiar el conductor de cobre o varilla antes de realizar la soldadura, retira el polvo u otros materiales que puedan ocasionar una soldadura defectuosa.



*Figura 2.19* Cepillo de alambre

Lo más recomendable es hacer uso de soldaduras exotérmicas debido a que su costo total es más barato que el de los conectores mecánicos cuando se desea realizar un gran número de soldaduras, además los materiales y herramientas

necesarios para su aplicación ocupan menor espacio y por lo tanto son más sencillos de aplicar. Para conexiones del sistema de puesta a tierra situadas debajo del suelo es preferible hacer uso de soldadura exotérmica, para conectar los conductores de puesta a tierra de equipos a los equipos es mejor emplear conectores mecánicos.

## CAPÍTULO III Modelado del Sistema de Puesta a Tierra

### 3.1 GENERALIDADES

Para realizar los cálculos necesarios para diseñar un buen sistema de puesta a tierra se debe contar con datos generales como lo son la resistividad del terreno, la corriente de cortocircuito que estará circulando por el sistema, el número de varillas propuesto, las dimensiones de la cuadrícula o forma propuesta y el calibre del conductor de cobre propuesto. Con estos datos iniciales se procede a realizar el cálculo del sistema de tierra y como resultado se obtiene si el diseño cumple o no con los criterios requeridos por el estándar IEEE-80-2013. Si los resultados no son satisfactorios se deben hacer modificaciones en los parámetros para obtener el diseño final del sistema de puesta a tierra.

Para realizar dichos cálculos existen diversos métodos entre los que se encuentra el cálculo manual, sin embargo, su utilización se vuelve demasiado compleja al momento de calcular sistemas de grandes dimensiones, por lo que es necesario recurrir a métodos computarizados para acelerar el proceso y disminuir los errores de cálculo.

### 3.2 MÉTODOS DE CÁLCULO PARA EL MODELADO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Desde los comienzos de la industria, la seguridad del personal dentro y alrededor de las instalaciones ha sido una preocupación primordial en todos los aspectos, siendo la seguridad eléctrica uno de los más importantes. La seguridad del personal se ve comprometida por el aumento en el potencial de tierra de las estructuras conectadas a tierra durante fallas de energía eléctrica desequilibradas o fallas a tierra. Si durante una falla las personas se encuentran en contacto con las estructuras metálicas conectadas a tierra pueden ser sometidas a altos voltajes. Sin embargo, debe existir un elemento en el sistema eléctrico que limite la magnitud y duración de la corriente eléctrica conducida a través del cuerpo humano para evitar

que debido a esos potenciales una persona pueda sufrir de fibrilación ventricular. Años de investigación sobre los efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano han llevado a desarrollar estándares que fijen los valores permisibles de los voltajes de paso y de contacto para evitar la electrocución.

Para el cálculo de dichos potenciales peligrosos, el programa Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) cuenta con un módulo especializado llamado Ground Grid Systems, el cuál utiliza dos métodos de cálculo:

- FEM - Método de elemento finito
- IEEE 80-2013

El Método de Elemento Finito (FEM) permite resolver sistemas electromagnéticos complejos de manera gráfica, se grafican las geometrías y se caracteriza los materiales involucrados en el fenómeno a estudiar, la solución es una distribución gráfica de los potenciales de paso y contacto y el campo electromagnético asociado, por lo que este método se puede utilizar para resolver potenciales en los sistemas eléctricos, incluyendo los sistemas de puesta a tierra [17].

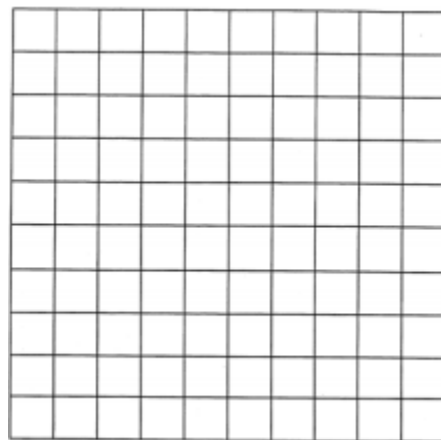
El diseño basado en el estándar IEEE 80-2013 considera formas geométricas cuadrangulares, que dificultan su aplicación cuando se requiere implementar un sistema de tierras con formas diferentes. Gracias a la capacidad de procesamiento de las computadoras es posible utilizar programas gráficos de tipo FEM que permiten visualizar el comportamiento de un sistema de tierras ante una falla [17].

En el estándar IEEE 80-2013 se encuentran los criterios para el diseño de sistema de puesta a tierra en subestaciones [6], también se describe la seguridad relacionada a los voltajes de paso y contacto. Se brindan diversas ecuaciones linealizadas para calcular los voltajes de paso y contacto que tolera el cuerpo humano y los voltajes de paso y contacto que se generan en la malla. Dichas ecuaciones son linealizaciones de las ecuaciones diferenciales asociadas al método numérico de elemento finito para calcular malla de tierras. Este método sólo aplica a ciertas configuraciones de malla conocidas y enlistadas en el anexo B de la IEEE 80.

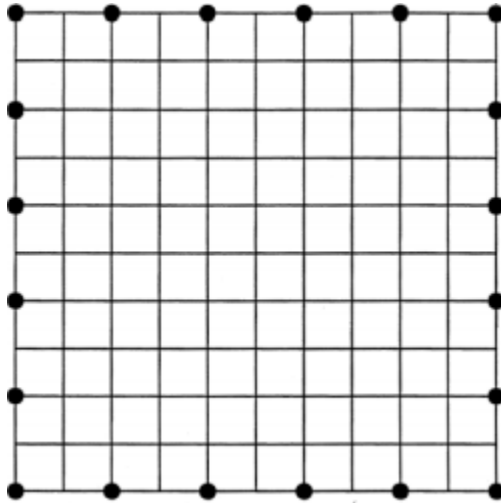
Algo importante a analizar antes de aplicar el estándar IEEE 80 es que con este método el terreno es considerado con resistividad uniforme, no se consideran las diferentes capas del terreno. Las tensiones de paso y contacto son aproximaciones y la distribución de corrientes que se consideran en este método es una distribución de corriente uniforme.

Una de las principales diferencias entre el método de elemento finito y el método del estándar IEEE 80-2013 es que la resistividad tomada en cuenta en el modelo de elemento finito se considera de acuerdo al modelo de las capas del suelo y se toma en cuenta la no uniformidad del mismo, además, la distribución de corriente no se hace de manera uniforme, se toma en cuenta la configuración de la malla y la resistividad del suelo, y las tensiones de paso y contacto se basan en métodos de cálculo, lo que vuelve el procedimiento más exacto.

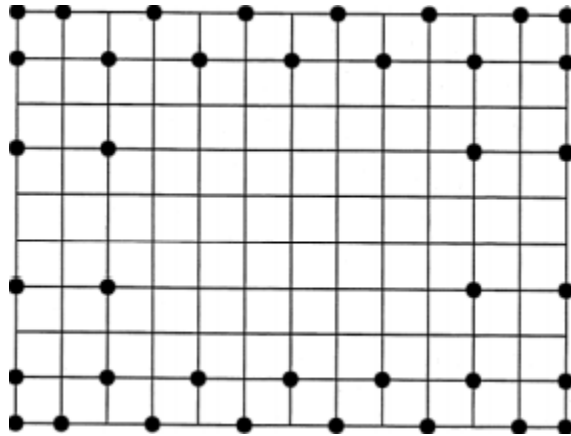
En el estándar IEEE 80-2013 existen formas normalizadas para las mallas, en dichas formas, la ubicación de las varillas de tierra no puede ser situada a decisión del diseñador, se realiza de manera predeterminada, puede ser una malla de configuración sin varillas, perimetrales o aleatorias, pero el método sólo permite escoger entre estas tres consideraciones. Si se desea localizar las varillas en lugares específicos se debe hacer uso del método de elemento finito.



*Figura 3.1* Configuración de malla de tierras cuadrada sin varillas



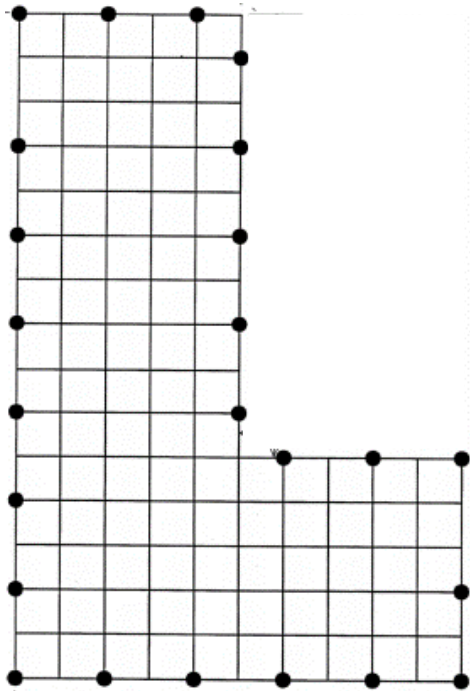
*Figura 3.2* Configuración de malla de tierras cuadrada con varillas perimetrales



*Figura 3.3* Configuración de malla de tierras rectangular con varillas aleatorias

Las ecuaciones aplicadas en el estándar IEEE 80-2013 son aplicables solamente para mallas de área desde 6.25 m<sup>2</sup> hasta 10,000 m<sup>2</sup>, lo que indica que las ecuaciones no están aprobadas ni verificadas para áreas más grandes.

Los modelos normalizados en este estándar y para los cuales las ecuaciones son aplicables son las configuraciones cuadradas, rectangulares, triangulares, en forma de “T” y en forma de “L”, dichos modelos se pueden encontrar en el anexo B del mismo estándar.



*Figura 3.4* Configuración de malla de tierras con forma de “L”

### 3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA POR ELEMENTO FINITO

Existen varias razones para justificar el uso del algoritmo del método de elemento finito sobre los demás métodos, entre las principales causas de la utilización de este método se incluyen:

- Los parámetros de diseño de la malla exceden las limitaciones del método IEEE 80
- Se requiere un modelo multicapa o de dos capas para calcular la resistividad del suelo debido a que se toma el modelo real de la ubicación de la malla
- La forma de la malla de tierras no es geométrica
- Se necesita mayor flexibilidad para determinar los voltajes de paso y contacto en distintos puntos

Aplicando el método de elemento finito se pueden calcular los siguientes parámetros:

- Resistencia del sistema de tierras
- La corriente máxima permitida para los conductores empleados
- Los voltajes de paso y contacto para cualquier configuración de malla de tierras
- Perfiles gráficos para los voltajes de paso y contacto, así como los niveles de voltaje en diferentes ubicaciones de la malla
- El número óptimo de conductores de tierra y varillas adecuados para el sistema de tierras
- El costo total de los conductores y varillas utilizados

Se hace uso del cálculo por elemento finito debido a que con este método se pueden diseñar sistemas de puesta a tierra de formas irregulares, con el método del estándar IEEE 80-2013 sólo se pueden calcular mallas de tierra con geometrías regulares, cuadradas o rectangulares.

El método de elemento finito se basa en las inyecciones de corriente de cada elemento infinitesimal que conforma un cable, lo que se traduce como ecuaciones diferenciales asociadas a este método. Gracias a esto, es posible modelar cualquier tipo de geometría en una malla de tierras. Además, con este método se toma en cuenta la no uniformidad de las capas que conforman el terreno o la resistividad del terreno.

Debe quedar claro que, las ecuaciones de diseño descritas en la IEEE 80 tienen limitaciones antes descritas para sistemas de tierras de grandes magnitudes o características geométricas irregulares y por eso se emplea el diseño por elemento finito, sin embargo, los criterios descritos en la IEEE 80 aplican para ambos métodos de diseño.

Para el diseño del sistema de puesta a tierra, independientemente del método de cálculo a utilizar, es importante seguir una serie de pasos para garantizar el correcto diseño del sistema.

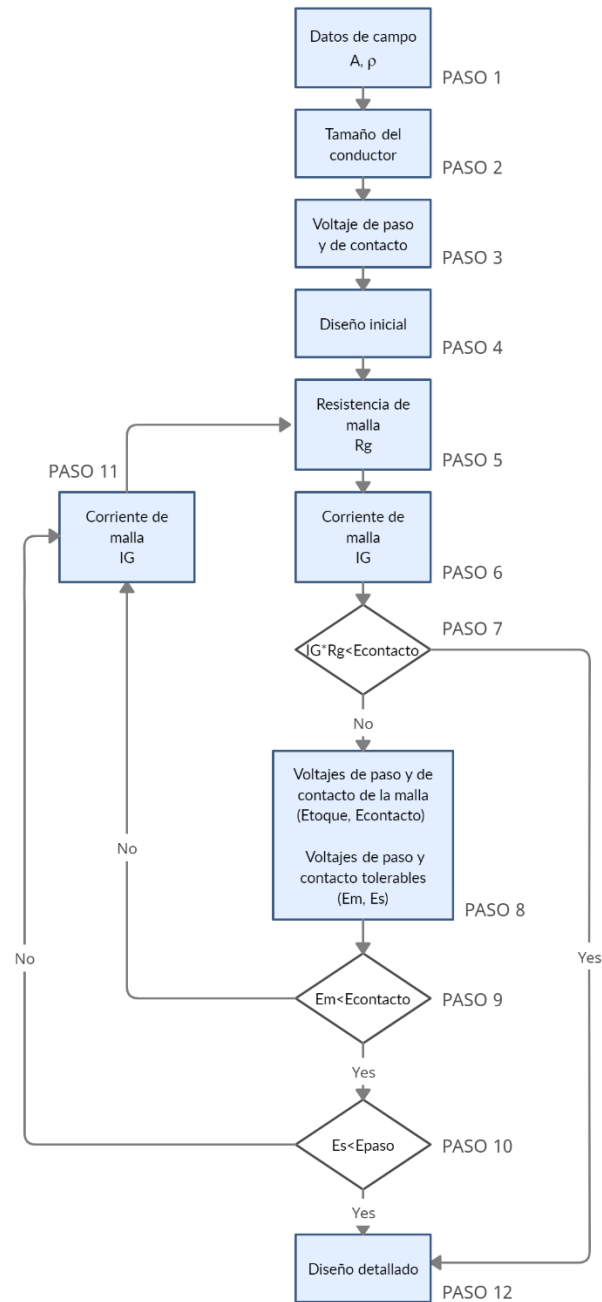


Figura 3.5 Diagrama de bloques del procedimiento de diseño [9].

Para realizar el procedimiento antes mencionado cuando se trata de un diseño que permita su uso se emplean las ecuaciones plasmadas en la IEEE 80 y cuando se requiere emplear el método de elemento finito se hace uso de un software para cumplir con el procedimiento del diagrama de bloques.

El método de elemento finito es una técnica general para construir soluciones aproximadas a problemas de valor en la frontera. Implica dividir el dominio de la solución en un número finito de subdominios simples llamados elementos finitos, y usa conceptos de variación para construir una aproximación de la solución [18]. Gracias a su generalidad el método ha sido utilizado en diversas áreas para la solución de un amplio rango de problemas.

En un sistema de puesta a tierra cuando ocurre una condición de falla se produce una elevación de voltaje, aunque usualmente los cables se encuentran dentro del mismo potencial en toda la red. En una cuadrícula, la densidad de corriente de fuga es más pequeña cerca del centro y más alta en los bordes y las esquinas, lo que produce diferentes niveles de potencial, por lo que resulta necesario graficar los mismos para observar si no existen condiciones de peligro dentro de la red [18].

La resolución del cálculo de un sistema de puesta a tierra mediante elemento finito se divide en dos partes, primero se determinan los valores de corriente de fuga en segmentos de los conductores y posteriormente se calcula la tensión en cualquier punto dentro del área de la malla [18] lo que nos da como resultado un diseño adecuado del sistema de puesta a tierra.

El método de elemento finito consiste en la discretización de una región en formas geométricas simples denominadas elementos finitos. El sistema está regido por las propiedades asociadas al material del modelo y las relaciones que definen el sistema, consideradas mediante el uso de condiciones de frontera. Se parte de un problema continuo de la forma

$$Y = Y(x, y, z) \tag{3.1}$$

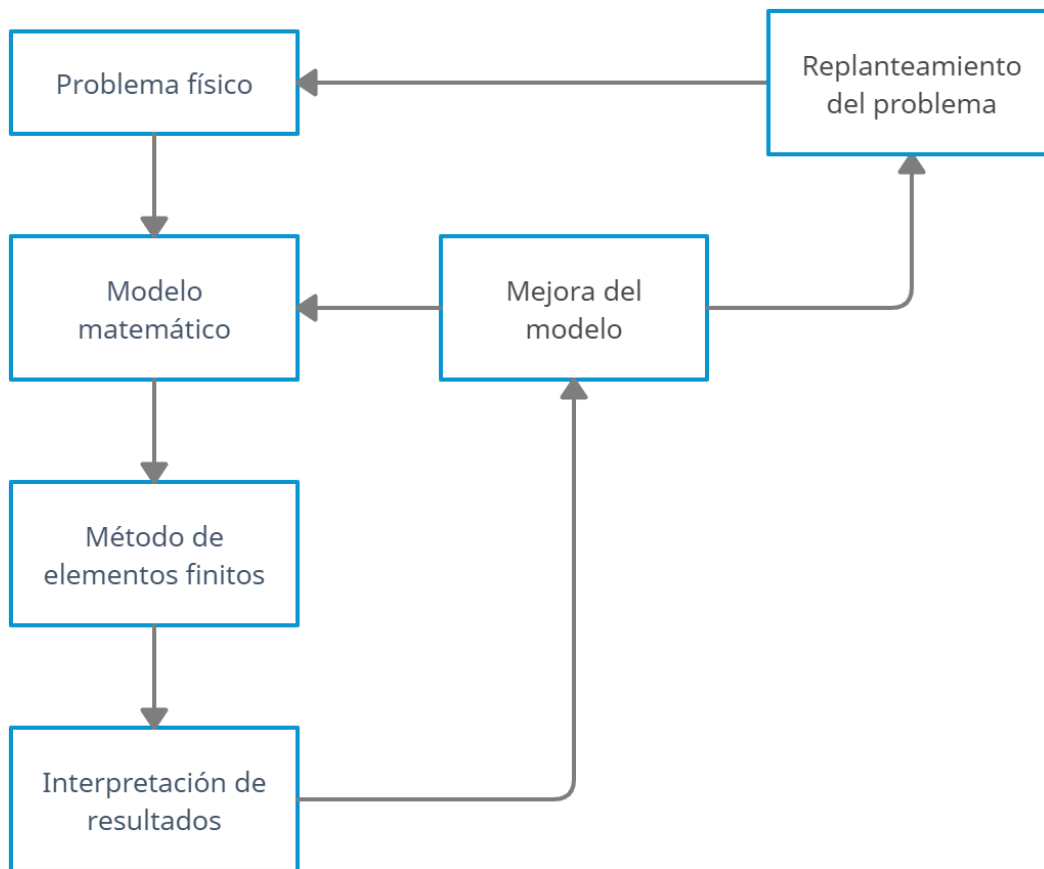
Con condiciones específicas que satisfacen una ecuación diferencial, a un problema discreto en el que se busca una solución de la forma

$$\tilde{Y} = \sum C_i F_i(x, y, z) \tag{3.2}$$

Es decir, una solución aproximada basada en la separación del problema en un número finito de problemas más pequeños con una base finita de funciones  $F_i$  y constantes u otros elementos dependientes del problema  $C_i$ .

La resolución del problema usualmente no es tan directa, sino que conlleva la resolución de los problemas reducidos y su posterior ensamble, generando dependencia entre ellos por sus condiciones de frontera [19].

La estructura del planteamiento de la metodología de elemento finito se muestra en la siguiente figura:



*Figura 3.6* Diagrama de metodología de elemento finito

El problema físico se convierte a un modelo definido por parámetros matemáticos para realizar simplificaciones del sistema real a través de las relaciones que gobiernan el proceso a estudiar [19].

Posteriormente, el modelo matemático pasa por un análisis de elementos finitos que entrega resultados sobre el comportamiento de los elementos discretizados. Este resultado debe ser estudiado y contrastado, con el fin de verificar que los valores obtenidos sean consecuentes y no existan errores significativos en relación con otras metodologías probadas o al comportamiento experimental real [19].

Si existen errores resolverse volviendo a las etapas iniciales del estudio ya que es posible que el problema no haya sido correctamente planteado desde el origen, en este caso debe estudiarse cuál es el problema específico por considerar y cómo acotarlo, eliminando elementos que dificulten su estudio [19]. De igual forma pueden existir errores en el planteamiento matemático del problema debido a la existencia de relaciones erradas o poco precisas que ocasionan errores en el método de elemento finito.

En el análisis de elemento finito existe una etapa de preprocesamiento que consiste en especificar la geometría a utilizar, realizar el enmallado del modelo, caracterizar los materiales y aplicar condiciones de frontera y restricciones del modelo [20].

Posteriormente, se realiza la etapa de procesamiento en la cual se efectúan los cálculos del sistema subdividido en “N” ecuaciones con “n” incógnitas cuyos elementos adyacentes generan una relación entre ellas y cuya entrada es iterativa, pudiendo necesitar recalcular todas estas ecuaciones para la obtención de un error medido razonable. Estos resultados deben tener una validación previa al paso de análisis del resultado, la cual debe poder definir si el estudio del problema ha sido planteado de la forma correcta [20]. En caso de no ser así, deben realizarse ajustes en el modelo.

Por último, se ejecuta una etapa de post-procesamiento en que se realiza el cálculo de magnitudes derivadas de las ecuaciones del procesamiento y se presentan los datos de forma que se facilite el análisis del usuario del software [20].

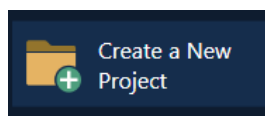
### 3.4 MODELADO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA CON SOFTWARE ETAP 21.0.0

El software Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) permite modelar sistemas de potencia de baja, media y alta tensión. Cuenta con módulos especializados para realizar estudios de flujos de potencia, cortocircuito, coordinación de protecciones, arco eléctrico, entre otros. Un módulo importante con el que cuenta es el llamado Ground Grid System (GGS) o Sistema de Malla de Tierra, en dicho módulo se pueden realizar todos los cálculos y modelados necesarios para crear una malla de tierras adecuada que cumpla con todos los parámetros necesarios para su correcto desempeño.

El software cuenta con dos métodos para realizar los cálculos, el método del estándar IEEE 80-2013 y el método de elemento finito, siendo este último el que se aplicará en el desarrollo de esta tesis.

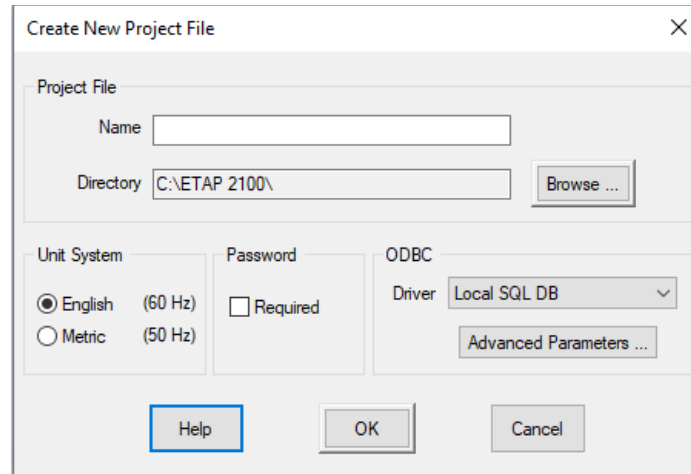
El módulo GGS se compone de una vista superior, una vista a nivel de piso y una vista tridimensional del diseño de la malla. La vista superior se utiliza para editar los conductores y varillas del sistema de tierras. La vista a nivel de piso se utiliza para editar las propiedades del suelo y de las capas superficial, superior e inferior del suelo. La vista tridimensional se utiliza para la visualización en 3D de la malla con sus conductores y varillas. La vista tridimensional también permite que la pantalla de la malla rote, ofreciendo vistas desde varios ángulos. El programa permite modelar y situar gráficamente los conductores y varillas que integran la malla de tierras y proporciona un entorno físico para realizar los estudios del diseño del sistema de tierras.

El proceso de construcción del modelado es bastante sencillo, el primer paso es ejecutar el programa, al momento de iniciarse se abre una pantalla de opciones en la cual debe seleccionarse “crear nuevo proyecto”.



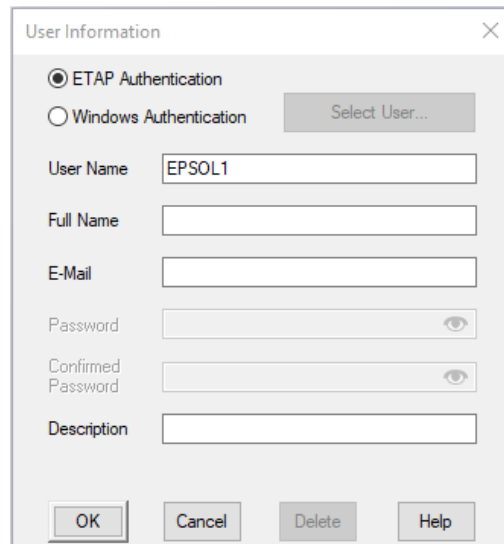
*Figura 3.7* Crear nuevo proyecto

Al dar clic se abre una nueva pestaña que solicita los datos del proyecto, se debe asignar un nombre al proyecto, se selecciona el sistema de unidades, se elige si se requerirá una contraseña para acceder al proyecto y se da clic en “OK”.



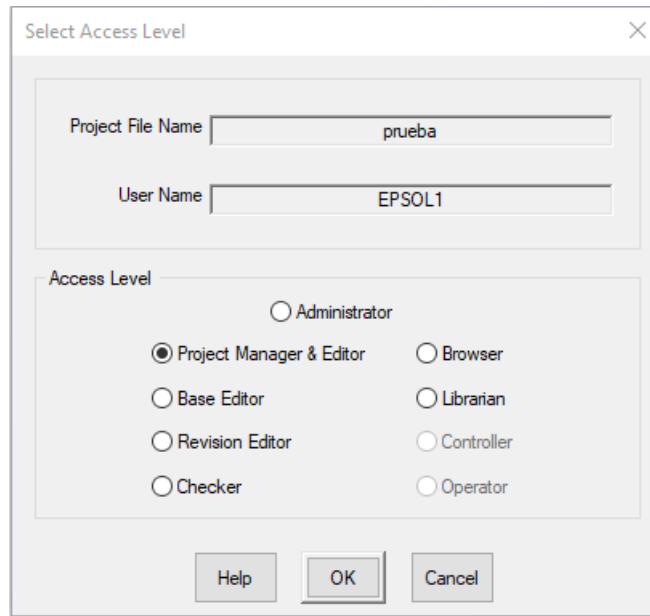
*Figura 3.8* Ventana para ingresar datos del proyecto

Se abre una ventana en la que se pueden editar los datos del usuario, por default se muestra el nombre de la computadora en que se está trabajando, pero puede ser modificado. Es recomendable llenar esta pestaña cuando se requiere una contraseña para acceder al proyecto, de lo contrario pueden dejarse los valores que salen por default y dar clic en “OK”.



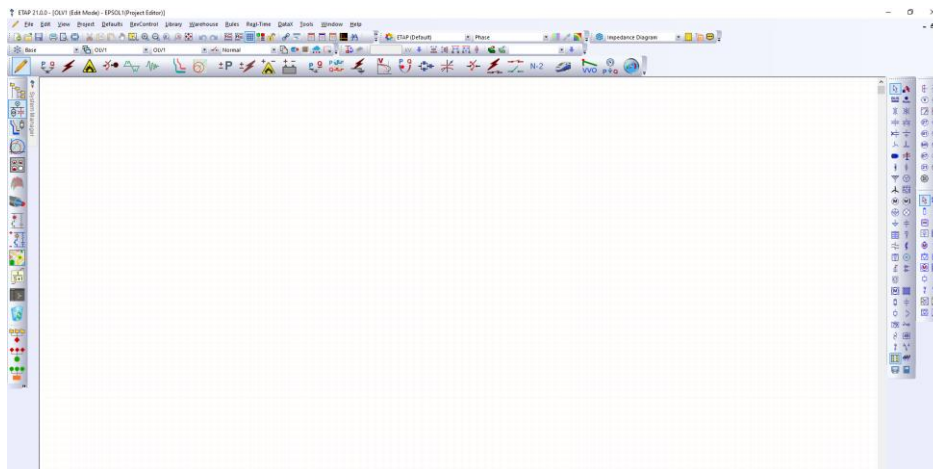
*Figura 3.9* Información del usuario

La siguiente pestaña que se muestra es la del nivel de acceso, cuando un mismo proyecto es trabajado por distintas personas es necesario definir distintos accesos a cada una con el fin de evitar que alguien no autorizado realice modificaciones en el proyecto. Si el acceso al programa es individual, entonces puede dejarse la opción que sale por default y dar clic en “OK”.



*Figura 3.10* Selección de nivel de acceso

Posteriormente, se abre una ventana en blanco que corresponde al plano de dibujo o construcción de los diagramas.



*Figura 3.11* Plano de dibujo

Se debe ubicar la barra de los módulos del software para detectar si se está trabajando con la herramienta adecuada. La barra de módulos se ubica en la parte superior de la ventana.



Figura 3.12 Barra de módulos

Antes de elaborar el diseño de la malla de tierras es necesario configurar las unidades en el software para evitar problemas al elaborar el reporte de este. Para modificar las unidades es necesario dar clic en “Project” y posteriormente clic en la opción “Standards”.

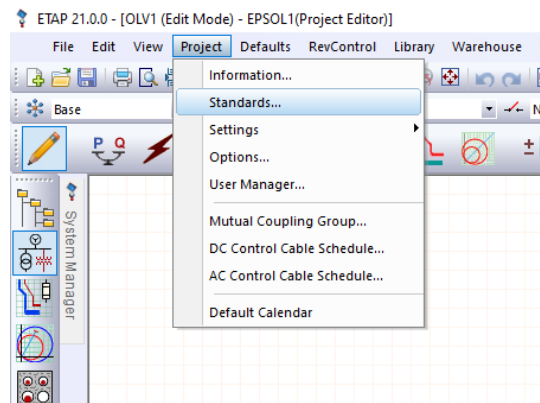


Figura 3.13 Pestaña Project

Se abre una ventana en la cual se debe configurar el sistema de unidades, de forma predeterminada se muestran los siguientes valores:

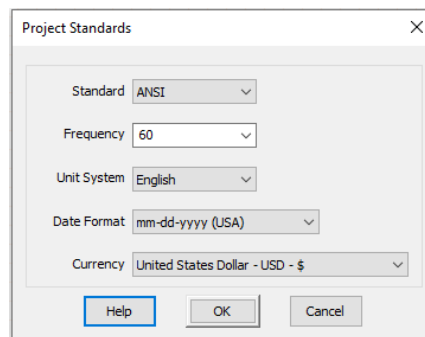
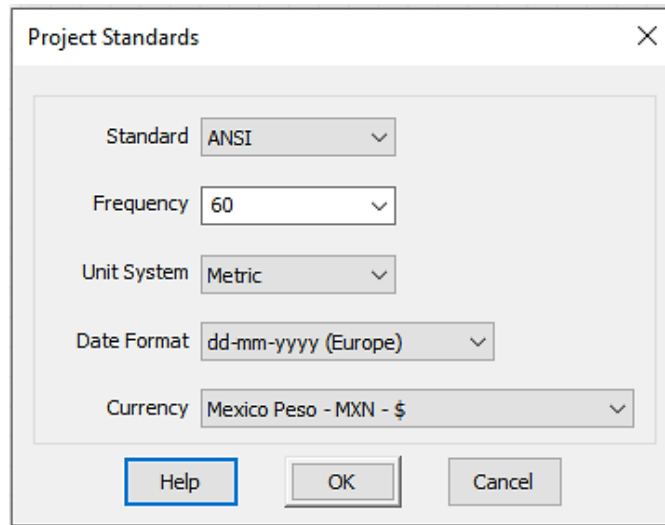


Figura 3.14 Estándares del proyecto

Se procede a modificar los parámetros. El estándar permanece igual, la frecuencia también, el sistema de unidades se cambia por “métrico”, el formato de fecha puede permanecer igual o cambiarlo al tipo europeo que es parecido al formato que empleamos en México y la divisa o “currency” se cambia a peso mexicano, quedando las configuraciones de la siguiente forma de manera general.

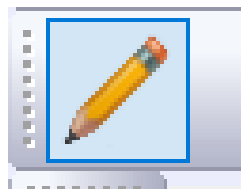


*Figura 3.15* Parámetros generales del proyecto

Los parámetros anteriores deben modificarse según la necesidad del proyectista.

Se da clic en “OK” y se continua con los siguientes pasos.

Para poder agregar una malla de tierras o cualquier elemento eléctrico se debe permanecer en el módulo “editar”, representado por un lápiz de la forma siguiente.



*Figura 3.16* Módulo “Editar”

Se debe localizar la barra de herramientas “elementos de CA” del diagrama unifilar, en dicha barra de herramientas se encuentra gran variedad de elementos y dispositivos necesarios para dibujar un esquema eléctrico completo.



Figura 3.17 Elementos de CA

Para el caso de diseño de un sistema de tierras es necesario ubicar el ícono “malla de tierras”.

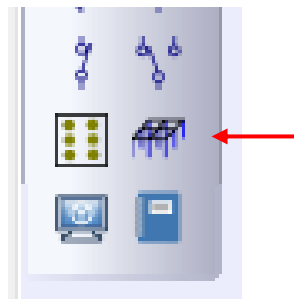


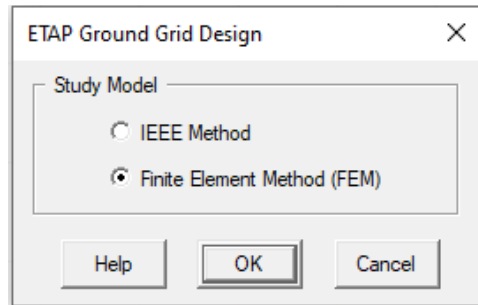
Figura 3.18 Ícono de malla de tierras

Al dar clic sin soltar se arrastra el ratón hacia el plano de dibujo y al soltarlo se dibuja un cuadrado enmallado correspondiente a una malla de tierras.



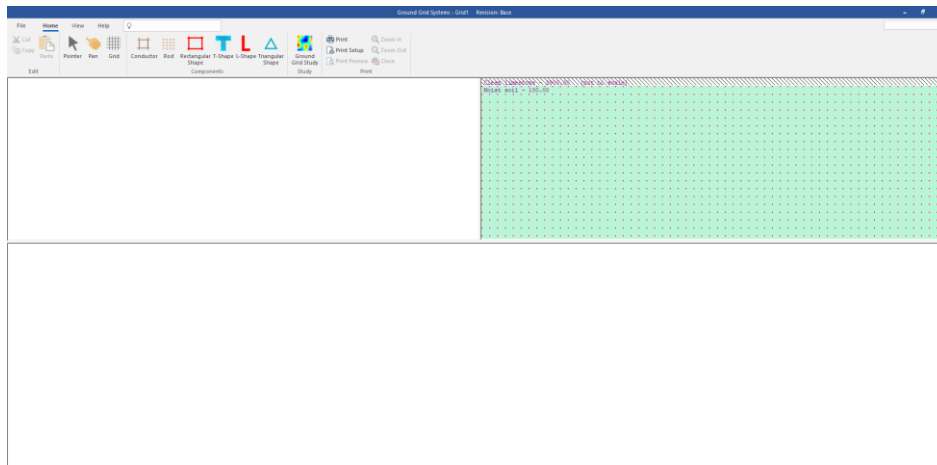
Figura 3.19 Representación de malla de tierras

Después de colocar la cuadrícula de tierras en el diagrama unifilar, se debe hacer doble clic sobre la misma para abrir una pestaña en la que se debe seleccionar el método de cálculo de la malla y dar clic en “OK”.



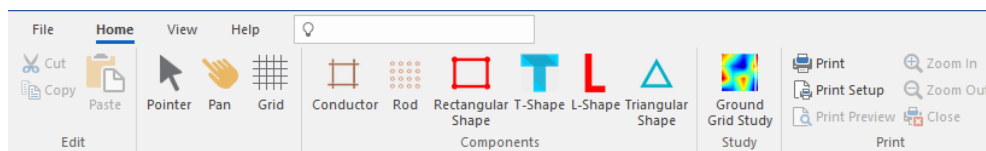
*Figura 3.20* Selección de método de cálculo de la malla de tierras

Posteriormente se abre el módulo Ground Grid Systems (GGS) o Sistemas de Malla de Tierras en el cual se procede a diseñar la malla.



*Figura 3.21* Módulo GGS

Para comenzar con el diseño de la malla se pueden agregar conductores, varillas y mallas de distintas formas, estos elementos se encuentran en la pestaña “Home” del módulo GGS.



*Figura 3.22* Pestaña “Home”

Si se desean mostrar las líneas de la cuadrícula para poder dibujar en el plano del módulo se debe dar clic en la opción “Grid”.

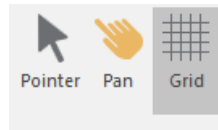


Figura 3.23 Opción “Grid”

Antes de proceder a elaborar el diseño se deben revisar las configuraciones de los elementos empleados para el cálculo como lo son los conductores, para eso se da clic en la pestaña “View” y se selecciona “FEM Group”.

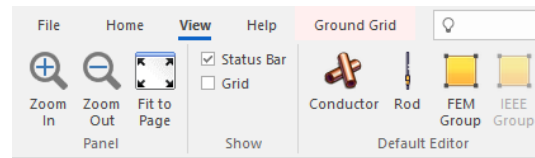


Figura 3.24 Pestaña “View”

Se abre una ventana en la que se pueden colocar las configuraciones iniciales y características que tendrá la malla cuando se elija una forma predeterminada, dichas configuraciones pueden modificarse a lo largo del diseño dando doble clic sobre los elementos, pero en este punto sirve verificarlas para tenerlas como referencia. De igual forma, en esta ventana se puede configurar el costo del conductor por metro o pie, la profundidad de enterramiento, el calibre y el tipo de aislamiento.

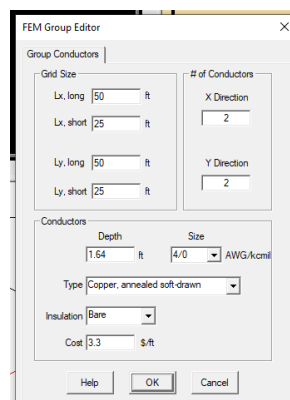


Figura 3.25 Editor de grupo

El procedimiento para comenzar a agregar elementos consta de colocar el cursor sobre cualquier elemento ubicado en la sección “Components” de la pestaña “Home” y hacer clic con el botón izquierdo del ratón sobre su ícono correspondiente, mover el puntero del ratón al entorno de dibujo. La forma del puntero cambia para corresponder a la del elemento seleccionado.

El elemento seleccionado se coloca al hacer clic con el ratón en cualquier lugar del entorno de dibujo y el cursor vuelve a su forma original. Para colocar varios elementos iguales hacer doble clic en el elemento deseado y proceder a colocarlos en el plano de dibujo. Al agregar elementos al plano de dibujo se crean utilizando valores predeterminados, al dar doble clic sobre cada elemento se pueden modificar sus propiedades.

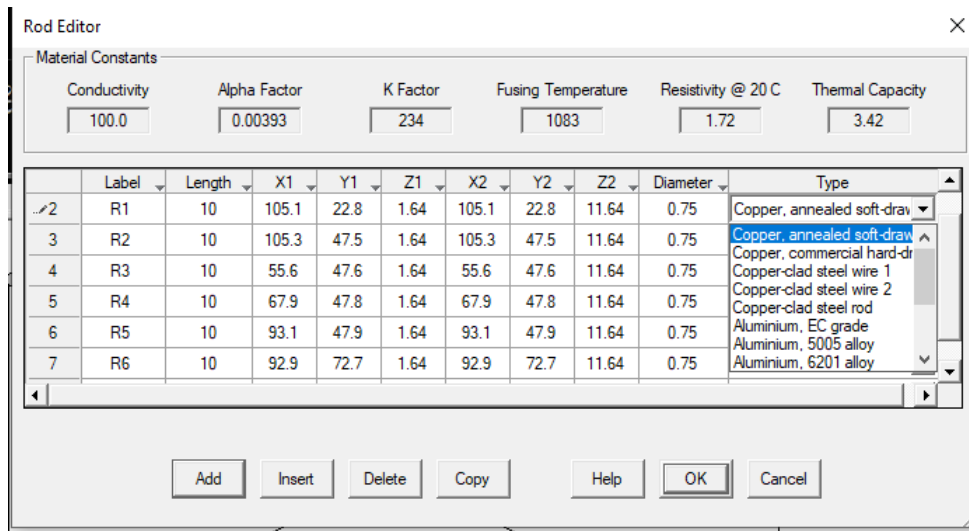
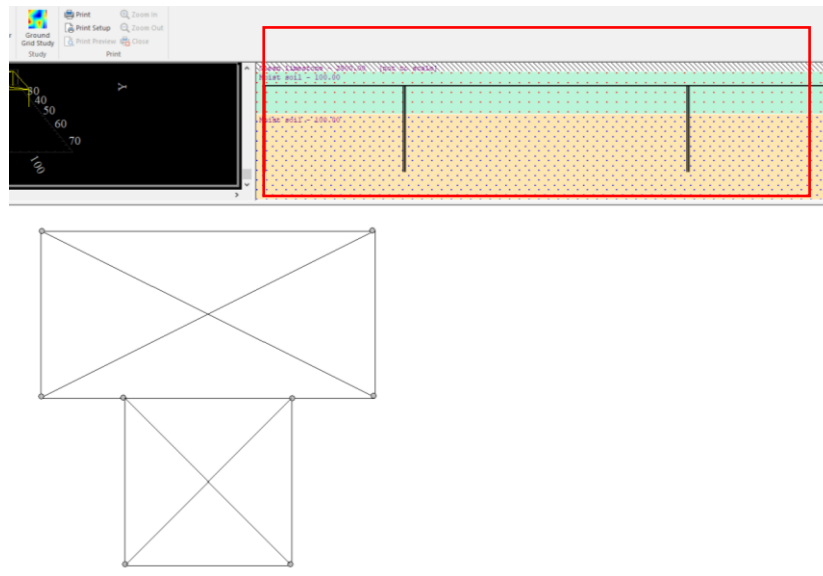


Figura 3.26 Modificar las propiedades de un elemento

Cuando se agrega un elemento a una presentación GGS, sus coordenadas de posición (x, y, z) se actualizan automáticamente en el editor. El elemento puede reubicarse en nuevas coordenadas cambiando los valores de las coordenadas o arrastrando el elemento con el ratón.

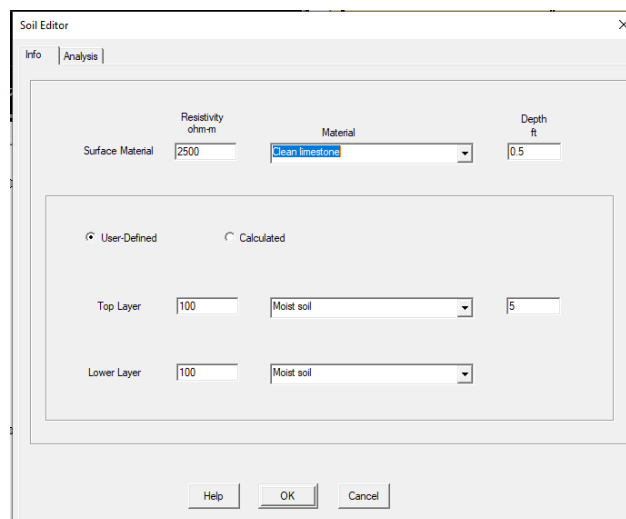
Para arrastrar un elemento, primero seleccione el elemento a mover. Coloque el cursor del ratón sobre el elemento seleccionado, arrastre el elemento a la posición deseada y suéltelo.

Una vez creada la forma requerida de la malla de tierra es necesario agregar las condiciones del suelo en que se planea instalar el sistema. Para ello, es necesario dar doble clic sobre la ventana superior derecha del entorno de dibujo, se identifica por estar representada mediante tres capas, una color blanco con rayas grises, otra color verde con puntos rojos y una última color amarillo con puntos azules.



*Figura 3.27* Configuración de características del suelo

Al dar doble clic sobre la ventana se abre el editor de suelo, en este editor es necesario configurar el tipo de suelo existente.



*Figura 3.28* Editor de suelo

Primero se debe configurar el material de la superficie, es decir, el material que se encuentra en el exterior del suelo. Para el material de la superficie se puede elegir entre diversas opciones.

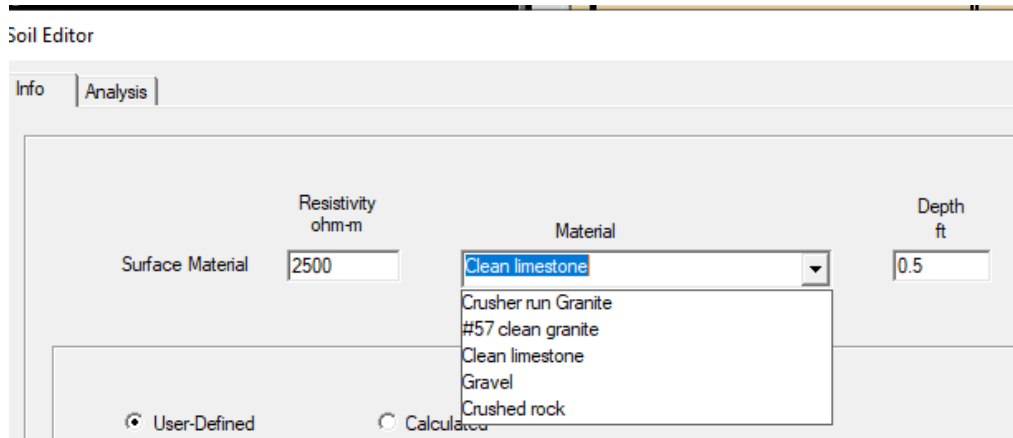


Figura 3.29 Tipo de material de la superficie exterior del suelo

Al momento de cambiar el tipo de material se cambia automáticamente la resistividad del suelo en ohms-m, de ser necesario dicho valor se puede modificar dando clic sobre él. También debe colocarse la profundidad en pies de la misma capa exterior antes mencionada.

Posteriormente se procede a configurar las dos capas internas del suelo, se selecciona el material de la capa superior, el de la capa inferior y se verifican los valores de resistividad y profundidad de ambas capas.

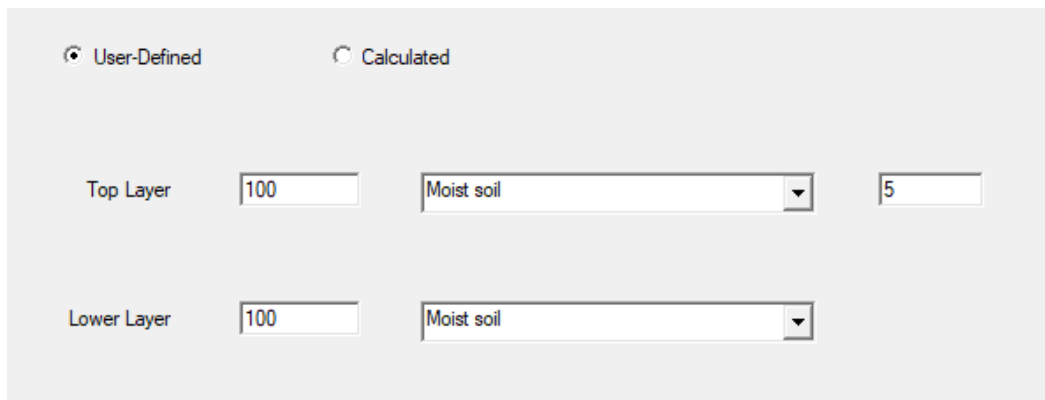


Figura 3.30 Tipo de material de las capas superior e inferior del suelo

Cuando se emplea el método de Wenner para obtener los valores de resistividad del suelo, estos se agregan en la pestaña “Analysis” del mismo editor de suelo. Se agregan tantos puntos como mediciones se hayan realizado y se procede a dar clic en “Calculate” para obtener el valor de la resistividad del suelo y su gráfica.

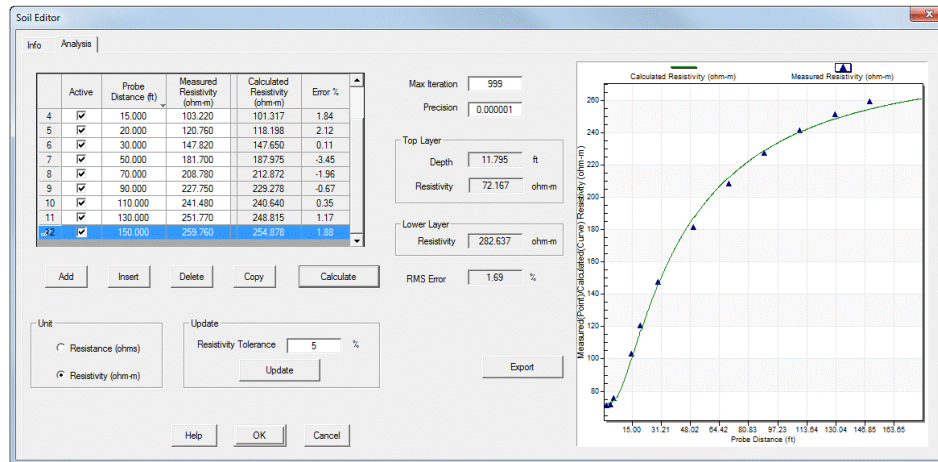


Figura 3.31 Ejemplo de configuración de la pestaña “Analysis”

Posteriormente se da clic en “OK” para guardar la información ingresada.

Una vez configurado el tipo de suelo, el material de los conductores y varillas y teniendo la forma deseada de la malla se procede a dar clic en el ícono “Ground Grid Study”, ubicado en la pestaña “Home” de la barra superior de la pantalla.

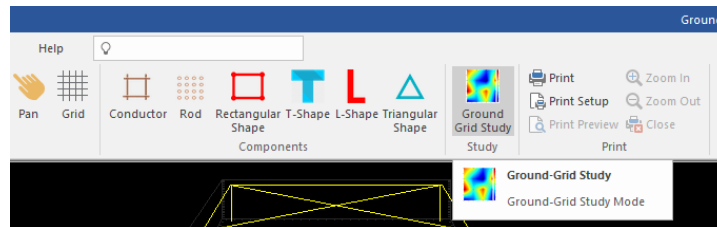


Figura 3.32 Ícono de “Ground Grid Study”

Al dar clic sobre el ícono se abre una nueva pestaña y la barra superior cambia sus opciones.

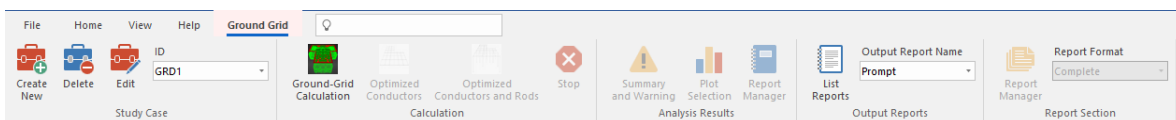


Figura 3.33 Barra de opciones del “Ground Grid Study”

Se selecciona “Create New” y se despliega una ventana llamada editor del caso de estudio, en ella se configuran las opciones como el criterio del peso del personal que ronda las instalaciones, se muestra el método de cálculo a emplear, se determina el tiempo de duración de la falla que por lo general se deja con los valores que se muestran por default y se configura la corriente de corto circuito a tierra que debe soportar la malla. Cuando se cuenta con el estudio de corto circuito en el mismo archivo en que se está proyectando la malla se selecciona la opción “Short-Circuit Study” para que el software obtenga automáticamente ese dato del estudio. Si el valor del corto circuito se obtuvo por algún otro medio se selecciona “User specified” y se agrega el valor de la corriente y la relación X/R.

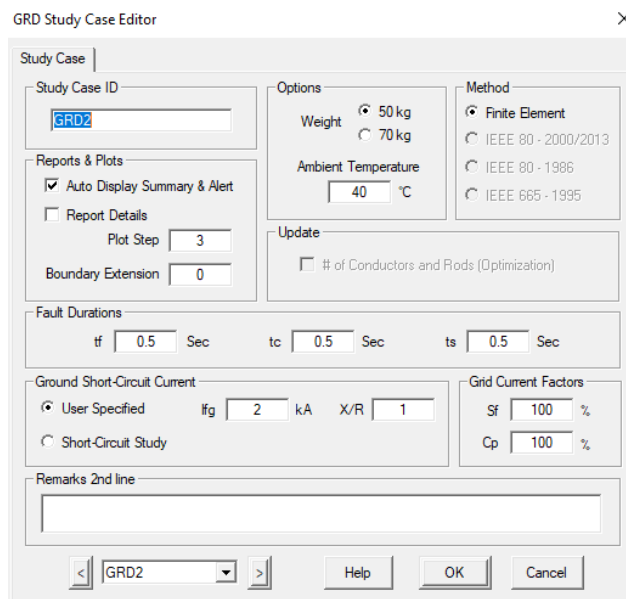


Figura 3.34 Ventana Editor de caso de estudio

Habiendo configurado los parámetros y características antes descritos se procede a realizar el cálculo de la malla. Para este propósito es necesario dar clic en el botón “Ground Grid Calculation” que se encuentra en la pestaña “Ground Grid Study”.

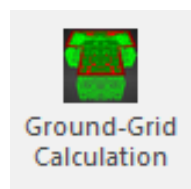


Figura 3.35 Botón “Ground Grid Calculation”

Se solicita asignar un nombre para el reporte de resultados, se coloca el nombre deseado y se da clic en “OK”.

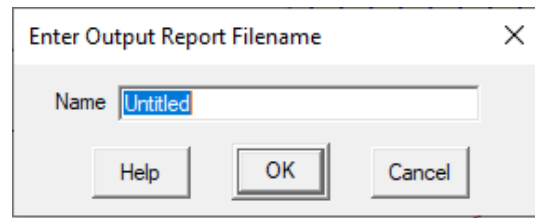


Figura 3.36 Asignación de nombre para el reporte de resultados

Se arroja una pantalla con los resultados del estudio, si el diseño es adecuado no se muestra ninguna alarma ni advertencia, si por el contrario se despliegan leyendas en color rojo es necesario identificar qué parámetros no se cumplen y modificar el diseño.

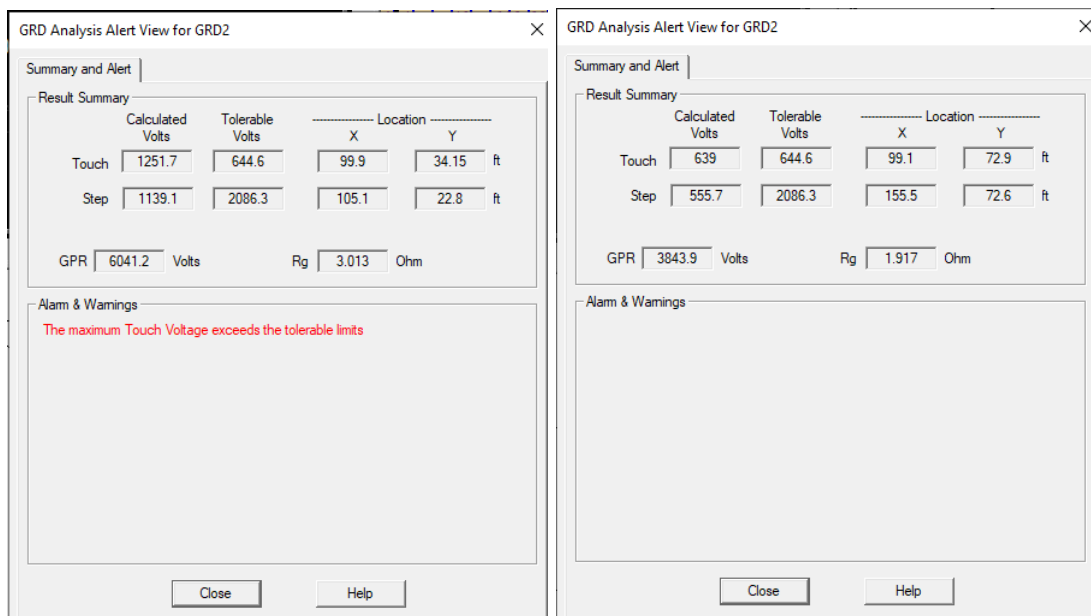


Figura 3.37 Pantallas de resultados con y sin advertencias

Una vez obtenido el diseño que cumpla con los requisitos de seguridad es posible graficar los voltajes que da como resultado la elaboración del estudio.

Es posible graficar el voltaje absoluto, el voltaje de toque y el voltaje de pasó. Además, se puede elegir si se desea ver la gráfica en 3D, solamente el contorno de la gráfica y los límites de sobrevoltaje.

Para realizar la gráfica de los voltajes se debe dar clic en el ícono “Plot Selection” ubicado en la pestaña “Ground Grid”.

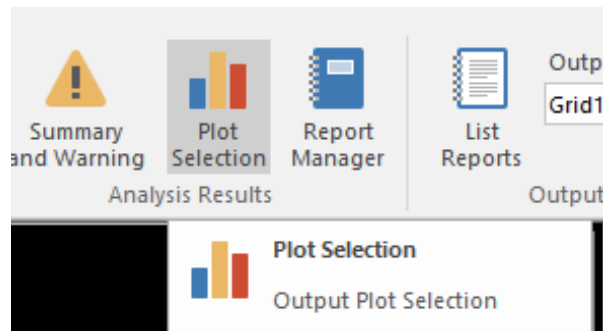


Figura 3.38 Ícono “Plot Selection”

Al dar clic se abre una pestaña en la que se pueden seleccionar los voltajes que se quieren graficar, se seleccionan las casillas requeridas y se da clic en “OK”.

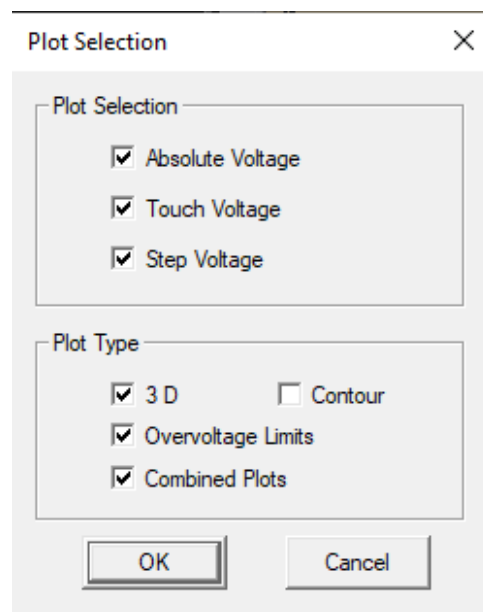


Figura 3.39 Parámetros por graficar

Luego de unos segundos se muestran las gráficas correspondientes. Las gráficas seleccionadas se visualizan en el explorador que se tiene predeterminado como principal y se abren automáticamente al dar “OK” en el paso anterior.

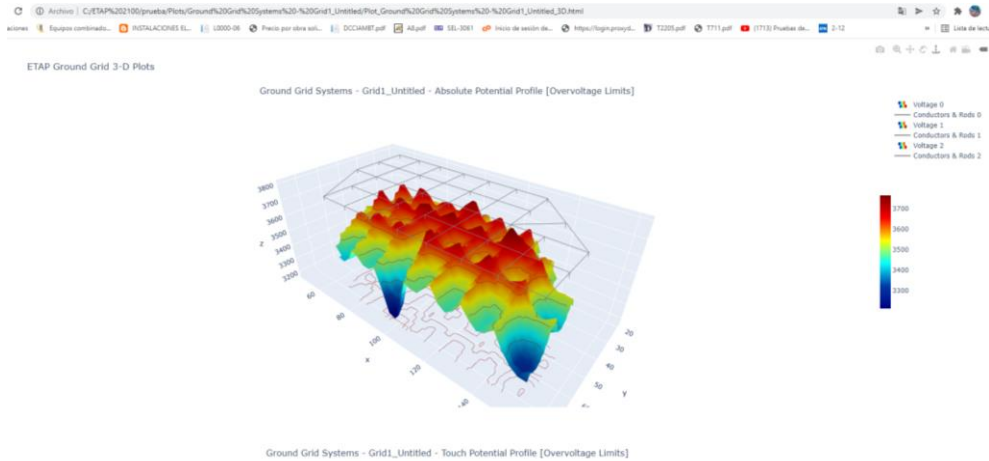


Figura 3.40 Ejemplo de gráfica visualizada en el explorador de internet

La gráfica visualizada en el navegador de internet brinda la opción de poder guardar los gráficos en formato png, se debe localizar la barra de acciones en la esquina superior derecha y dar clic en “Download plot as png”. El archivo de imagen se guarda en las descargas de la computadora.

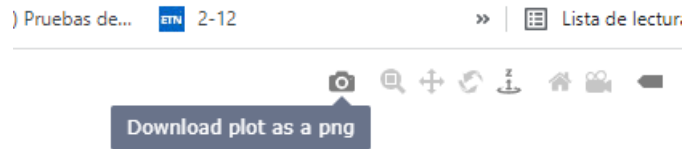


Figura 3.41 Botón para guardar la gráfica en la computadora

La misma barra de acciones permite realizarle zoom a la gráfica, rotarla o moverla. Los colores de la gráfica representan las zonas de mayor y menor voltaje de paso y de contacto.

Además de la gráfica de voltajes es posible imprimir el reporte del estudio, en la pestaña “Ground Grid” se da clic en el ícono “Report Manager”.

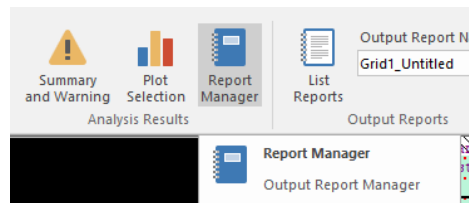


Figura 3.42 Ícono “Report Manager”

Se abre una ventana en la cual debe seleccionarse “Complete” para que se muestre el reporte completo. Puede abrirse en el visualizador del software, en PDF, Word, en archivo informático o en Excel.

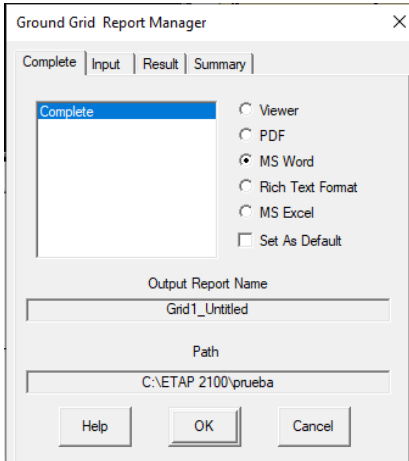


Figura 3.43 Ventana de opciones “Report Manager”

Es recomendable elegir la opción de visualización en MS Word puesto que se vuelve más sencilla la personalización del reporte, pudiendo agregar logos o algún tipo de información adicional.

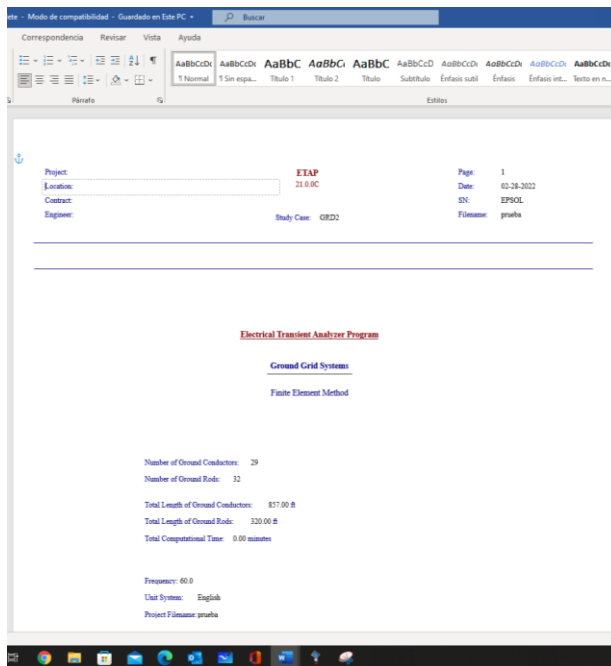


Figura 3.44 Ejemplo de visualización del reporte en Word

El contenido del reporte comienza con un resumen del número de conductores y varillas empleados en el estudio, la longitud total del conductor utilizado y la longitud total de las varillas involucradas. Posteriormente se encuentran enlistados los datos de entrada del estudio, esto son la frecuencia, la corriente de corto circuito a tierra, la relación X/R, el tipo de suelo y su resistividad y las características de los conductores. Se enlista cada uno de los conductores y varillas y su ubicación en el plano X, Y, Z. Si se configuró el costo de los conductores también se puede visualizar el costo total por los metros empleados de cable. Al final del reporte, se encuentra el resumen del sistema en el que se muestra la resistencia a tierra de la malla, el voltaje GPR y los voltajes de toque y paso tolerables y calculados.

En la esquina superior izquierda de la ventana de dibujo se muestra la configuración de la malla vista en 3D, dicho dibujo puede imprimirse dando clic en la pestaña “File” seleccionando la opción “Print”. Se abre una ventana de impresión y se selecciona el método de impresión deseado el cual puede ser una impresora o un plotter, si se selecciona la opción “Microsoft print to PDF” el diseño se guarda en formato PDF en cualquier ubicación deseada.

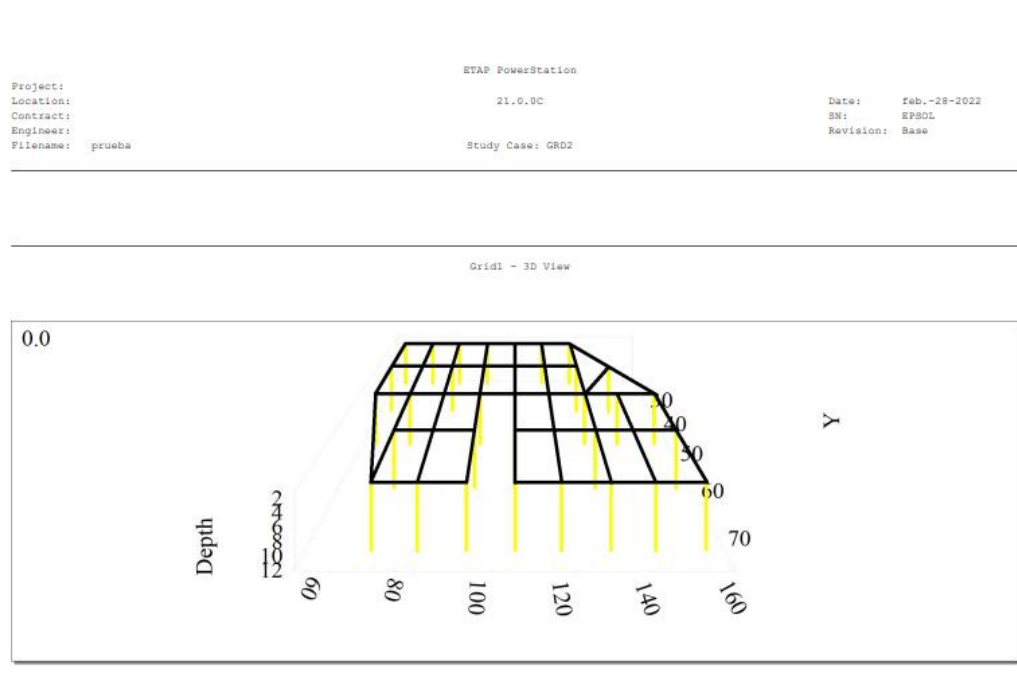
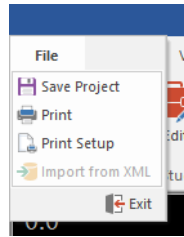


Figura 3.45 Diseño de la malla de tierras en formato PDF

Después de crear un modelo y guardarlo, el diseño quedará guardado en el diagrama unifilar y se podrá acceder a él dando doble clic nuevamente sobre la cuadrícula. Para guardar un proyecto o diseño se debe dar clic en la pestaña “File”, posteriormente se da clic en “Save Project” y el proyecto se guarda en el diagrama unifilar.



*Figura 3.46 Guardar proyecto*

Si se tiene un diseño previo de un sistema de tierras ya dibujado en AutoCAD simplemente se pasa a ETAP para validar su correcto desempeño, por el contrario, si no se cuenta con ningún diseño previo el software es de mucha ayuda para definir el modelo que cubra las necesidades de la instalación.

De esta forma se corroboran los parámetros de diseño de la malla de tierras y se garantiza mediante el cálculo en el software la seguridad tanto de la instalación como del personal asociado.

## CAPÍTULO IV Aplicación del Diseño de Malla de Tierras

### 4.1 GENERALIDADES

Gran parte de las instalaciones industriales que datan de hace más de 30 años no cuentan con un sistema de puesta a tierra debido a que cuando fueron construidas no existía ningún requerimiento normativo que exigiera su implementación. Sin embargo, a través de los años diversas normas y especificaciones han sido creadas con el propósito de brindar seguridad y protección a las instalaciones y al personal.

Debido a la emisión de estas normas se vuelve necesaria la modernización o actualización de las instalaciones para cumplir con los requerimientos que en ellas se estipulan, tal es el caso del edificio de acería de una empresa siderúrgica ubicada en el estado de Tlaxcala.

El edificio de acería cuenta con hornos de arco eléctrico para el proceso de fundición de los metales, no cuenta con un sistema de puesta a tierra y, por lo tanto, los equipos y estructuras metálicas no se encuentran aterrizados lo que ha ocasionado diversas situaciones de riesgo en la instalación.

Para resolver la problemática de la ausencia de un sistema de puesta a tierra en el edificio es necesario diseñar de manera correcta el sistema, para lo cual se empleará el software ETAP siguiendo la metodología que se presenta a lo largo del presente capítulo.

### 4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS PRELIMINARES, MEDICIONES EN SITIO

Para que el diseño del sistema de tierras sea el adecuado deben realizarse los cálculos partiendo de datos obtenidos en planta. La malla se construirá en el edificio de acería, pero el propósito de la red de tierras es ser equipotencial para que no se presenten voltajes que puedan presentar un riesgo, lo representa que todos los sistemas de puesta a tierra deben estar interconectados.

En la subestación eléctrica principal existe un sistema de puesta a tierra que debe interconectarse a la nueva malla que se construirá en el edificio y por eso mismo la

recopilación de datos en campo empieza desde el transformador principal del sistema para obtener un panorama general de la instalación.

El transformador que alimenta a los hornos ubicados en el edificio de acería es un transformador de 100 MVAs, con un voltaje primario de 230 KV, un voltaje secundario de 13.8 KV y conexión delta-estrella.



*Figura 4.1* Transformador de 100 MVA, de 230 KV a 13.8 KV



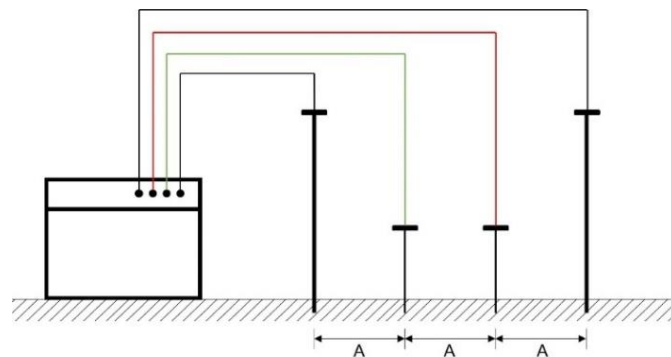
*Figura 4.2* Vista lateral del transformador de 100 MVA, de 230 KV a 13.8 KV

Una vez localizado el transformador principal se procede con las mediciones del terreno para obtener los valores de resistividad de este y así tener un archivo general de la implementación del sistema de puesta a tierra.

Para realizar las mediciones de resistividad del terreno se emplea un telurómetro de la marca Metrel, modelo MI3295. Es necesario verificar que el terreno se encuentre libre de obstáculos que impidan realizar el procedimiento de medición, si se encuentran obstáculos y sólo puede realizarse una medición es necesario dejar dicha evidencia plasmada en un reporte para conocer el motivo por el cual no se obtuvieron los datos necesarios. De igual manera, se debe verificar que el equipo de medición de encuentra con batería suficiente para efectuar el trabajo y que los cables se encuentran en buen estado y bien conectados.

El método de medición empleado es el método de Wenner y se efectúa de la siguiente manera:

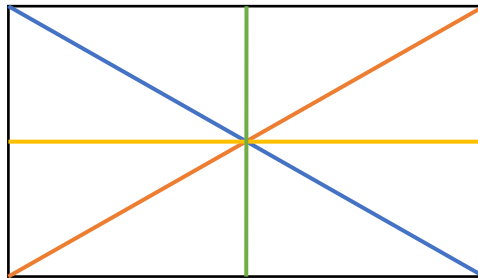
1. Seleccionar un eje de referencia sobre el suelo para llevar a cabo las mediciones
2. Colocar en línea recta los cuatro electrodos auxiliares de acuerdo con la siguiente figura:



*Figura 4.3* Esquema de conexión del medidor y electrodos

3. Suministrar una corriente de prueba a tierra por medio de los electrodos externos
4. Dar lectura y registrar el valor de resistencia R obtenido en el equipo de medición

5. Repetir los puntos 2, 3 y 4 para diferentes distancias “a” entre los electrodos auxiliares
6. Repetir todos los puntos anteriores colocando las picas en direcciones ortogonales y diagonales de acuerdo con la siguiente figura:



*Figura 4.4* Direcciones para medición de resistividad

Con este método, la resistividad aparente del suelo se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{4\pi AR}{\left[1 + \left(\frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}}\right)\right] - \left[\left(\frac{2A}{\sqrt{4A^2 + 4B^2}}\right)\right]} \quad (4.1)$$

En donde:

- A es la distancia entre electrodos auxiliares
- B es la profundidad de enterramiento de los electrodos auxiliares, en m.
- R es la resistencia resultante del cociente V/I, en  $\Omega$ .
- P es la resistividad aparente del suelo, en  $\Omega$ .

Se realizan las mediciones con una distancia A igual a 1 metro en todas las direcciones ortogonales, dando como resultado los siguientes valores:





Distancia entre electrodos (m)	Lectura $\Omega m$	Posición de los electrodos	Profundidad de los electrodos (m)	Resistividad $\Omega m$	Resistividad promedio $\Omega m$
1	26.2		0.3	26.2	31.25
1	35.5		0.3	35.5	
1	37		0.3	37	
1	26.3		0.3	26.3	

Tabla 2. Mediciones de resistividad del terreno en subestación 230 KV

Debido a la configuración del terreno solamente se realizan mediciones con distancia de 1 metro entre electrodos. Al no poder obtener más referencias de medición no se puede determinar un tipo de curva sobre los resultados de resistividad, sin embargo, se dejan los resultados como evidencia de la medición realizada.

Se procede a realizar la inspección de la zona en que se planea instalar la malla de tierras en el edificio de acería. El edificio funciona en conjunto con la zona de chatarra y sus estructuras metálicas se encuentran unidas entre ellas por lo que la construcción de la malla se extiende hasta un costado de la zona de chatarra con el propósito de aterrizar las estructuras metálicas de la instalación.



Figura 4.5 Zona frontal del edificio de acería

Con el método de Wenner antes descrito se realizan las mediciones de la resistividad del terreno frente al edificio de acería en 19 puntos diferentes obteniendo los siguientes resultados:

Distancia (m)	Lectura $\Omega$	Distancia (m)	Lectura $\Omega$	Distancia (m)	Lectura $\Omega$
1	0.011	9	0.027	17	0.203
2	0.011	10	0.039	18	0.409
3	0.011	11	0.046	19	0.717
4	0.012	12	0.057		
5	0.014	13	0.066		
6	0.017	14	0.092		
7	0.020	15	0.117		
8	0.024	16	0.117		

Tabla 3. Mediciones de resistividad del terreno en acería

Los datos de la resistividad obtenidos en la medición previa se emplean en el software al momento del modelado, por lo que obtenerlos forma parte de la recopilación de la información del sistema.

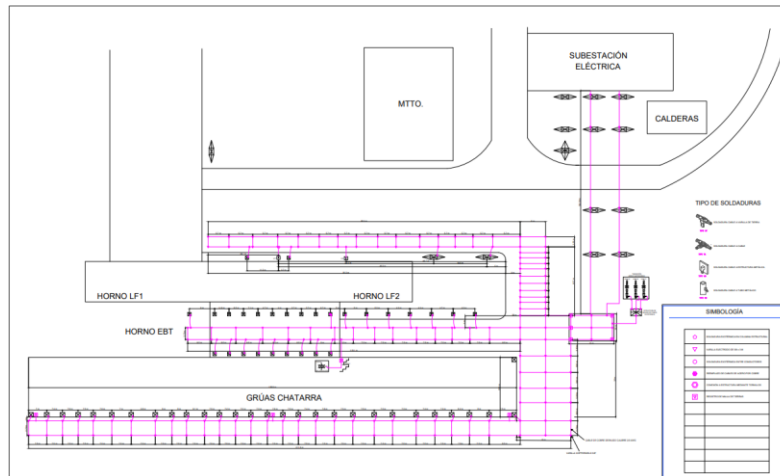
Posteriormente, se realiza la recopilación del transformador principal del edificio de acería el cual es un transformador de 80 MVAs, con un voltaje primario de 13.8 KV, un voltaje secundario de 0.715 KV y conexión delta-delta.



Figura 4.6 Transformador de 80 MVA, de 13.8 KV a 0.715 KV

El valor de corto circuito a tierra proporcionado por la acerera es de 49.219 kA, con una relación X/R de 34.1.

Posterior a la recopilación de datos, se propone un diseño preliminar del sistema de tierras.



*Figura 4.7* Diseño propuesto del sistema de tierras

El diseño inicial propuesto se realizó en AutoCAD considerando conectar a tierra todas las estructuras metálicas de las zonas aledañas al edificio principal por lo que el recorrido del sistema de tierras tiene una forma no geométrica. El propósito de modelar el diseño propuesto en ETAP es determinar si la cantidad de cables y varillas contemplados son suficientes o si es necesario realizar alguna adecuación con respecto a materiales.

#### 4.3 MODELADO EN ETAP DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Luego de haber obtenido los datos básicos para ejecutar el diseño de la malla de tierras se procede a crear un nuevo proyecto en ETAP para modelar el sistema deseado. Se crea el nuevo proyecto y se agrega el ícono de malla de tierras al entorno de dibujo para comenzar con su configuración.

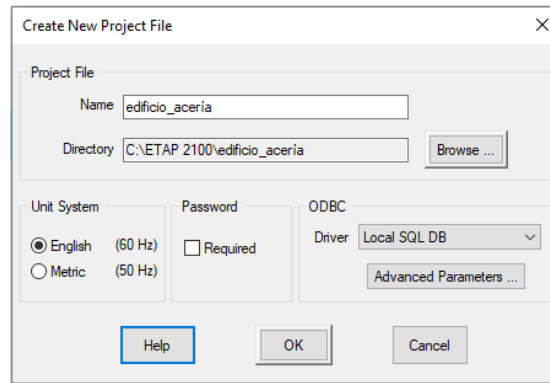


Figura 4.8 Creación del proyecto

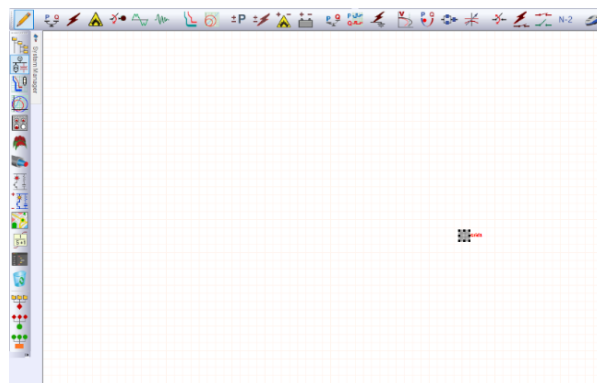


Figura 4.9 Ícono de malla de tierras en plano de dibujo

Al hacer doble clic sobre el ícono de la malla se abre una ventana en la cual se selecciona el método de elemento finito o FEM como método de cálculo y diseño y se procede a dar “OK”.

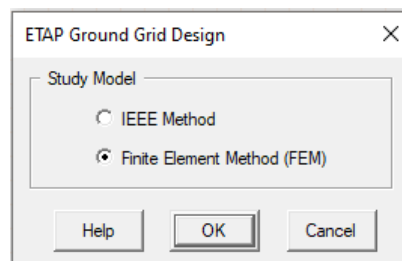


Figura 4.10 Selección de método de elemento finito

Derivado de las mediciones realizadas para obtener la resistividad del suelo mediante el método de Wenner se procede a introducir los datos del suelo dando doble clic sobre la ventana superior derecha del entorno de dibujo. Se da clic en la

pestaña “Analysis” y se introducen los datos medidos, se selecciona “Calculate” y se obtiene el gráfico de resistividad.

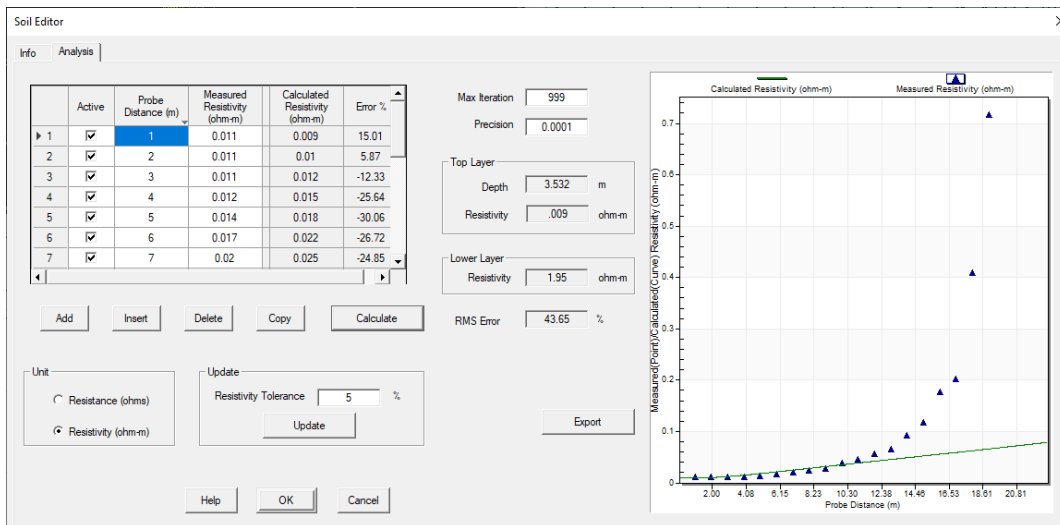


Figura 4.11 Mediciones de resistividad del suelo introducidas en el software

En la pestaña “Info” de la misma ventana se introducen los datos del material que se colocará en la superficie del sistema de tierra, en este caso el material propuesto es el tezontle, que tiene una resistividad aproximada de 8534.4  $\Omega$ -m de acuerdo con la base de datos del software y se digita el espesor de la capa de este, en este caso 0.2 metros. En la parte inferior de la pantalla se selecciona la opción “Calculated” para que el software tome los datos de resistividad del suelo introducidos en la pestaña “Analysis” y se da clic en “OK”.

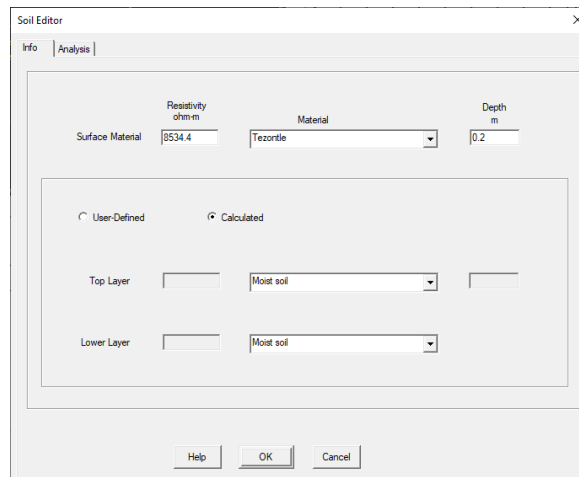


Figura 4.12 Configuración editor de suelo

En el entorno de dibujo para malla de tierra se comienza a modelar el sistema de tierras que se tiene previsto instalar de acuerdo con las características indicadas en el plano propuesto en AutoCAD. Los conductores son de cobre desnudo del calibre 2/0 AWG, equivalente a  $67.4 \text{ mm}^2$ , mientras que las varillas propuestas son de acero recubierto de cobre, de 5/8", equivalente a 1.6 mm (redondeado a 2 mm) y 3.05 metros de largo. En el plano en AutoCAD se indican las distancias propuestas entre electrodos, entre uniones de conductores y la longitud de cada sección de conductor. Se introducen los datos en el software y se dibuja de acuerdo con ese diseño para validar el cumplimiento de los requerimientos de seguridad de la malla propuesta.

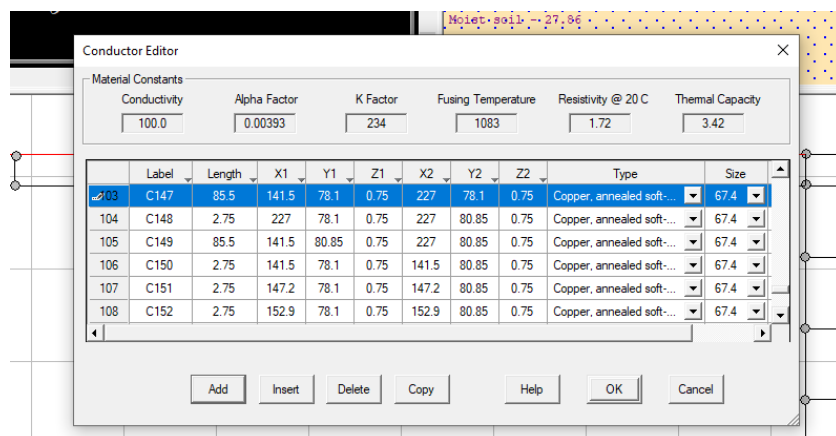


Figura 4.13 Configuración de las características de los conductores

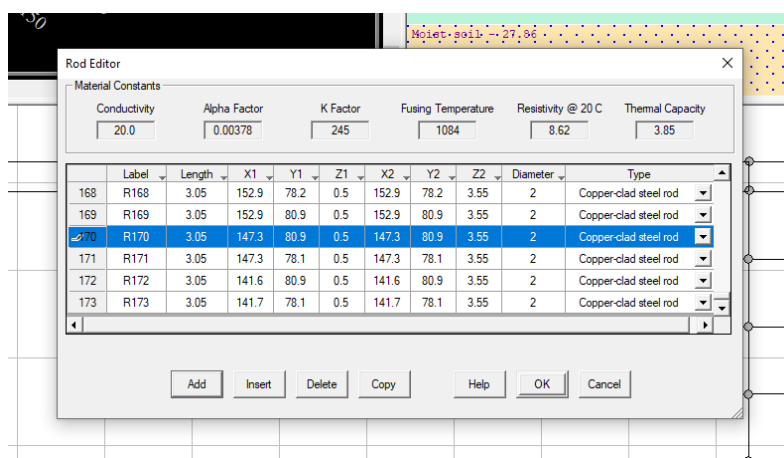
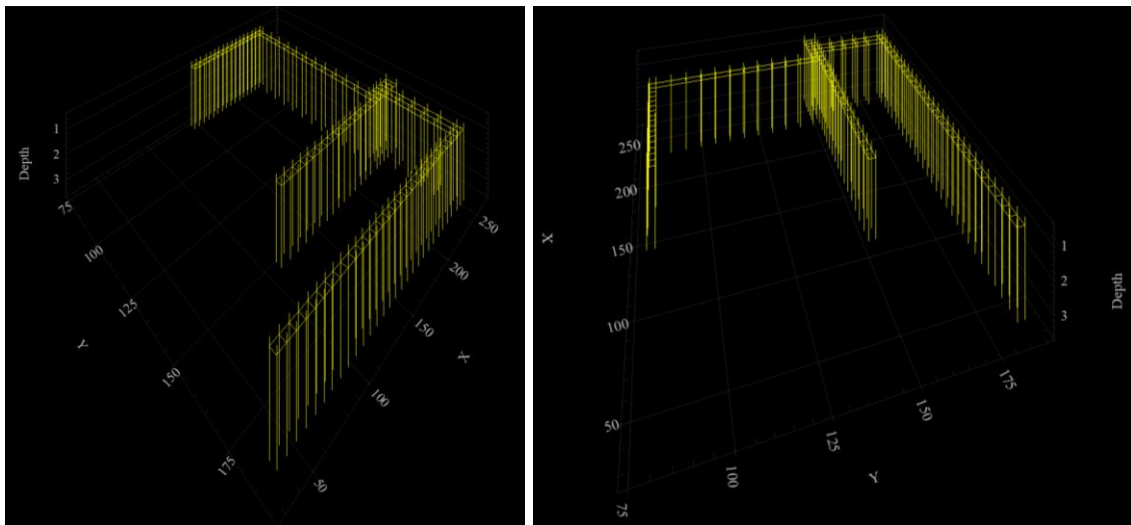


Figura 4.14 Configuración de las características de las varillas o electrodos

En las ventanas de configuración de las características de los elementos aparecen las coordenadas de cada uno de ellos, X1, Y1 y Z1 representan las coordenadas en las que se ubica el inicio de un cable o varilla y X2, Y2 y Z2 indican el lugar en que termina dicho elemento.

Una vez capturada la información de cada uno de los elementos que conforman el sistema de puesta a tierra, se visualiza en 3D en la esquina superior izquierda el modelo construido. Para asegurar que el diseño está bien construido se visualiza desde distintos ángulos dando doble clic sobre el fondo negro, la figura empieza a rotar y se detiene al volver a dar doble clic sobre el fondo negro.



*Figura 4.15* Vistas diferente del modelo

Habiendo sido corroborado el diseño se procede a realizar el cálculo del sistema de tierras mediante la opción “Ground Grid Study”, se abre la pestaña del cálculo y se crea un nuevo estudio en “Create New”. En la pestaña del editor caso de estudio se configura el cálculo para una persona de 50 kg, se define el tiempo de falla como 0.1 segundos debido a que se considera que en ese tiempo los interruptores operan y limitan la falla, se introducen los valores de la corriente de falla a tierra y la relación X/R obtenida del estudio de corto proporcionado por la acerera.

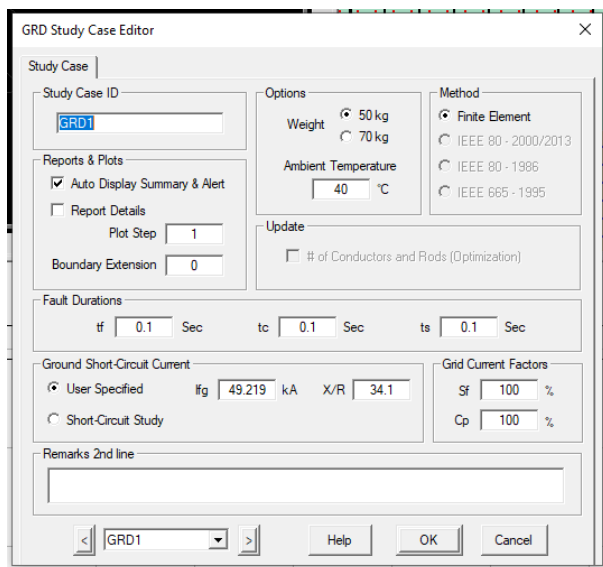


Figura 4.16 Configuración de datos para el estudio

Se procede a realizar el estudio y se da clic en “Ground Grid Calculations”, el software comienza a hacer el cálculo y aparece la barra de progreso.

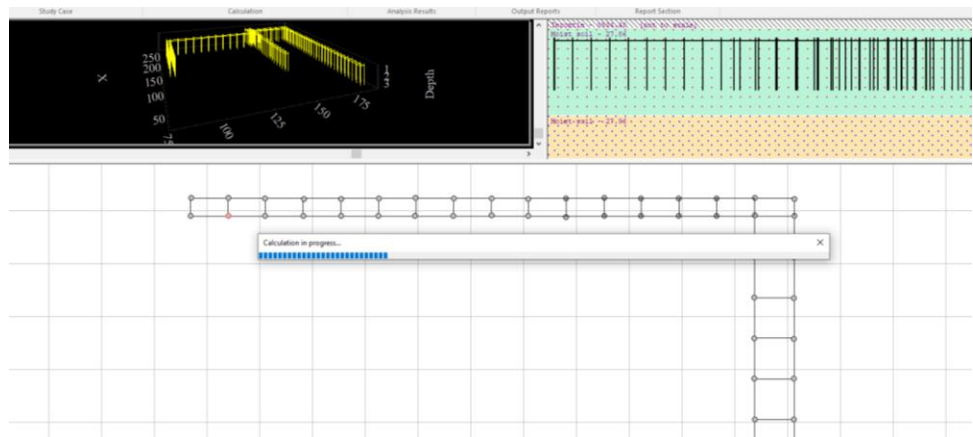


Figura 4.17 Cálculo en proceso

Se ejecuta el cálculo y aparece la ventana de resultados del estudio, la condición de cumplimiento de los requerimientos de seguridad reside en que los voltajes de paso y contacto calculados deben ser menores que los voltajes de paso y contacto tolerables. Los voltajes calculados son los voltajes que se presentan en el sistema de tierras cuando una corriente de falla se encuentra circulando por ella, los voltajes tolerables son aquellos que no causan daño sobre el personal que pudiera estar transitando por la malla de tierras durante la falla.

Se grafican los resultados para obtener la representación visual de las condiciones de la malla de tierra ante una falla. Se selecciona graficar el voltaje absoluto, el de contacto y el de paso y se elige una gráfica de tipo 3D.

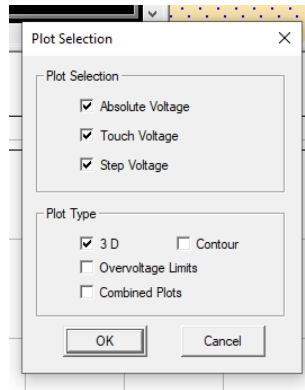


Figura 4.18 Configuraciones de la gráfica

#### 4.4 RESULTADOS

En la ventana de alertas que emite el software posterior al cálculo computarizado se muestran los valores de voltaje de paso y de contacto calculado y tolerable. Los voltajes calculados son menores que los tolerables y por lo tanto se cumple la condición de seguridad requerida para un sistema de puesta a tierra.

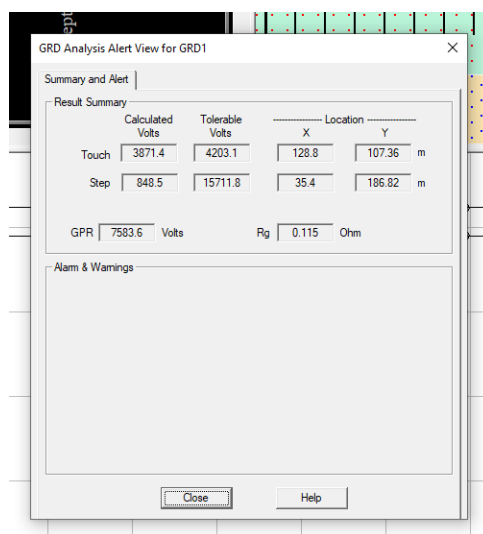


Figura 4.19 Resultados del cálculo del sistema de tierras

Graficando los valores calculados se obtiene la siguiente representación de los voltajes involucrados al momento de la falla. La gráfica del voltaje absoluto representa el GPR de la malla, es decir, la elevación del potencial de tierra con un valor máximo de 7583.6 volts.

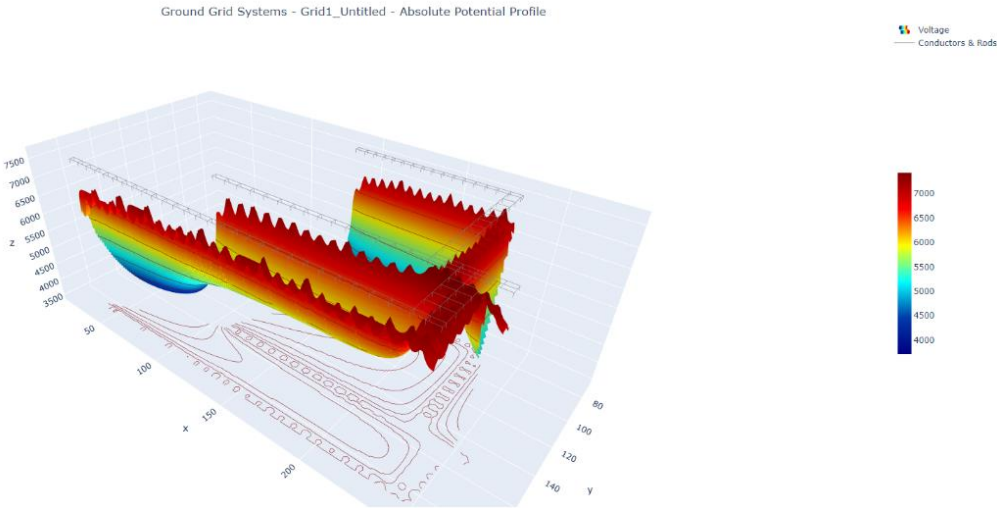


Figura 4.20 Gráfica de voltaje absoluto

La gráfica de voltaje de contacto representa los voltajes máximos y mínimos a los que estará expuesta una persona en contacto con una superficie metálica al momento de una falla, el valor depende del lugar en el que se encuentre interactuando el operador con los objetos metálicos, siendo 3871.4 volts el voltaje máximo de toque.

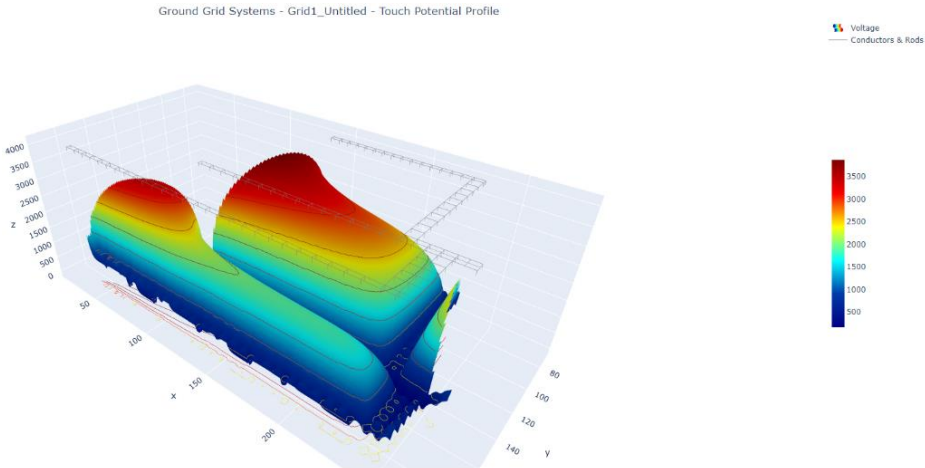


Figura 4.21 Gráfica de voltaje de contacto

La gráfica de voltaje de paso representa los voltajes máximos y mínimos a los que estará expuesta una persona en caso de una falla, el valor depende del lugar en el que se encuentre desplazándose el operador dentro de todo el sistema de tierra, siendo 848.5 volts el voltaje máximo de paso.

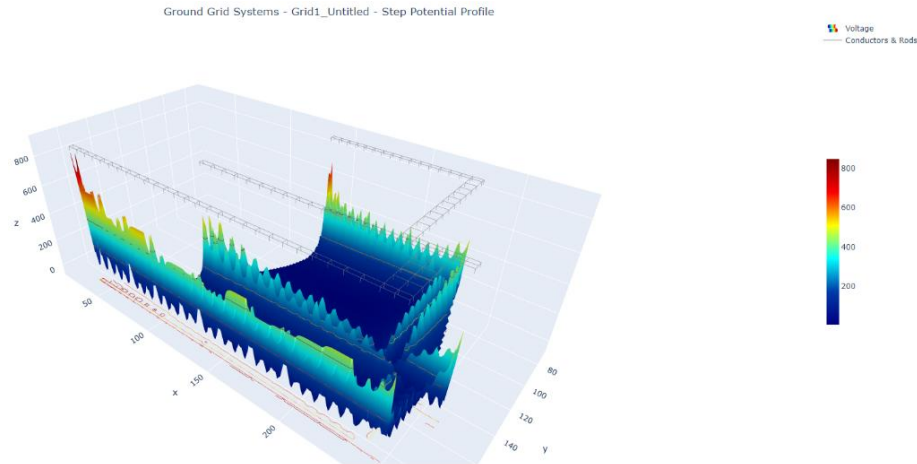


Figura 4.22 Gráfica de voltaje de paso

Los voltajes de contacto más altos se ubican dentro de las zonas sin enmallado y los voltajes de paso más críticos se encuentran ubicados en cada una de las varillas de tierra.

Posterior a la evaluación de las gráficas de voltajes se genera el reporte de resultados, para propósitos de adecuación del formato se elige generarlo en Word para poder agregar datos en el encabezado y colocar logos de las partes interesadas.

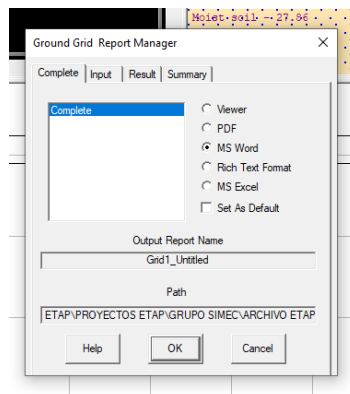


Figura 4.23 Selección de formato para el reporte

En la portada del reporte se visualiza la información general del proyecto y un resumen de los elementos empleados en el diseño del sistema. En el caso presente se hace uso de 120 conductores, que representan 1497 metros de conductor de cobre desnudo calibre 2/0 AWG, y 173 varillas de 5/8” y 3.05 metros de largo.

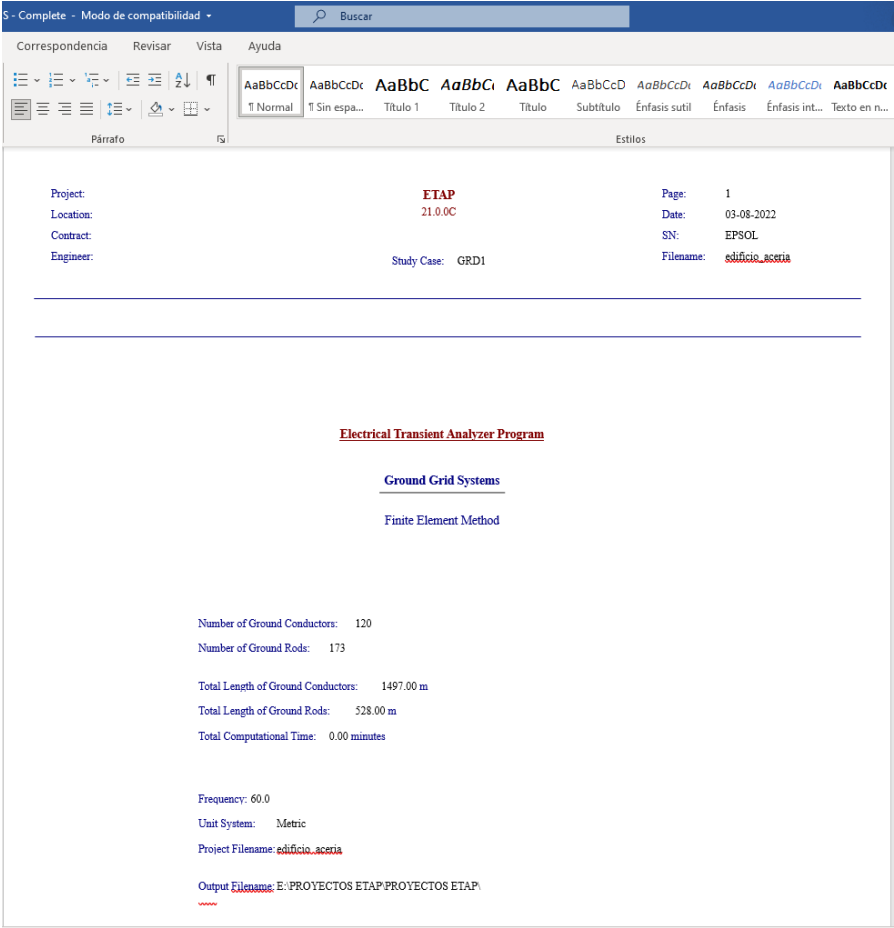


Figura 4.24 Carátula de resumen del proyecto

Se obtiene el listado de conductores y varillas con sus respectivas características y con el costo aproximado que tenía el material cuando se cotizó al inicio de la proyección. Es importante recalcar que el costo de cualquier artículo de cobre aumenta con gran velocidad con respecto al paso del tiempo, por lo tanto, es recomendable tomar estos costos como un referente y no como el costo final del material.



calculado de acuerdo con los costos del material si fueron introducidos al inicio del estudio, sin embargo este costo es un estimado y no debe ser tomado como definitivo ya que solamente implica el valor de los cables y electrodos pero hay otros factores que deben contemplarse durante el cálculo del costo monetario de la implementación de la obra como lo son el costo de conectores mecánicos, de las soldaduras exotérmicas, de la maquinaria para realizar las excavaciones, del material para colocar el recubrimiento de la instalación, de la mano de obra, etc.

The screenshot shows a software interface with a menu bar (Correspondencia, Revisar, Vista, Ayuda) and a search bar. Below the menu is a ribbon with various icons and text styles. The main content area displays project information:

Project: **ETAP** Page: 10  
 Location: 21.0.0C Date: 03-08-2022  
 Contract: SN: EPSOL  
 Engineer: Study Case: GRD1 Filename: edificio\_aceria

---

**Cost**

Conductor			Rod			Total Cost \$
Total No.	Total Length m	Cost \$	Total No.	Total Length m	Cost \$	
120	1497	220496.20	173	528	32624.34	243120.60

Figura 4.26 Conductores, varillas empleadas en el diseño y su costo

En la última hoja del reporte se localiza el resumen final del diseño, se indica la resistencia a tierra de la malla siendo de 0.115  $\Omega$ , el voltaje GPR con un valor de 7583.6 V, el voltaje de contacto tolerable de 4,203.1 V, el voltaje calculado de 3871.4 V, el voltaje de paso tolerable de 15711.8 V, el voltaje calculado de 848.5 V, la corriente de falla con un valor de 49.219 KA y la corriente máxima de la malla con un valor de 66.133 KA.

S - Complete - Modo de compatibilidad

Buscar

Correspondencia Revisar Vista Ayuda

AaBbCcDc AaBbCcDc **AaBbC** *AaBbC* **AaBbC** AaBbCcD AaBbCcD AaBbCcD *AaBbCcD* **AaBbCcD** *AaBbCcD* AaBbCcDc AaBbCcDc

¶ Normal ¶ Sin espa... Título 1 Título 2 Título Subtítulo Énfasis sutil Énfasis Énfasis int... Texto en n...

Párrafo Estilos

---

Project: **ETAP** Page: 11  
 Location: 21.0.0C Date: 03-08-2022  
 Contract: SN: EPSOL  
 Engineer: Study Case: GRD1 Filename: edificio\_aceria

---

**Ground Grid Summary Report**

Rg Ground Resistance ohm	GPR Ground Potential Rise Volts	Maximum Touch Potential					Maximum Step Potential				
		Tolerable Volts	Calculated Volts	%	Coordinates (m) X Y		Tolerable Volts	Calculated Volts	%	Coordinates (m) X Y	
0.115	7583.6	4203.1	3871.4	92.1	128.8	107.4	15711.8	848.5	5.4	35.40	186.82

Total Fault Current: 49.219 kA Reflection Factor (K): -0.993  
 Maximum Grid Current: 66.133 kA Surface Layer Derating Factor (Cs): 0.817  
 Decrement Factor (Df): 1.344

Figura 4.27 Resumen final del sistema de puesta a tierra

## CONCLUSIONES

Luego del análisis realizado por computadora para el cálculo del sistema de puesta a tierra del edificio de acería mediante el método de elemento finito se obtuvo la confirmación de los requerimientos de seguridad que debe cumplir la malla, los voltajes de paso y de contacto calculado son menores que los voltajes de paso y de contacto tolerables por el cuerpo humano. El valor de resistencia a tierra de la malla es de  $0.115 \Omega$  lo cual representa un valor de resistencia bajo y adecuado puesto que, al momento de ocurrir una falla, la corriente busca el camino que opone menor resistencia al paso de la energía.

El uso del software ETAP para la resolución del cálculo por elemento finito resulta de gran utilidad puesto que al contar con una malla de forma irregular no es posible aplicar el cálculo manual presentado por la IEEE-80 para el cálculo de sistemas de tierra con formas geométricas rectangulares, cuadrangulares o triangulares. Las capacidades del software son muy amplias y por lo tanto puede ser empleado para resolver mallas de distintas magnitudes sin importar qué tan grandes resulten ser los diseños.

El diseño de la malla de tierras con las características propuestas cuenta con todos los parámetros de seguridad necesarios para garantizar su correcto desempeño, sin embargo, es importante recordar que el sistema de puesta a tierra se relaciona directamente con la correcta operación de las protecciones eléctricas de la instalación por lo que no debe dejarse de lado la verificación del estudio de coordinación de protecciones cuando se implementa un sistema de tierras ya que la protección de falla a tierra será quien limite la corriente y de esa forma se cumplirá con todos los parámetros de seguridad para los usuarios.

El correcto dimensionamiento del sistema de puesta a tierra debe considerarse como algo más que un requisito normativo y obligatorio, la inversión para su implementación suele ser considerable debido al costo del cobre y los diversos materiales empleados para su construcción, pero es una inversión de la cual se obtendrán beneficios a largo plazo. La malla de tierras no sólo protege las

instalaciones y los equipos, también brinda condiciones de seguridad para los operadores que frecuentan la instalación y garantiza que ante cualquier falla no ocurrirá ningún siniestro.

## TRABAJOS A FUTURO

Como futuro trabajo se propone el desarrollo del estudio de coordinación de protecciones aplicado a la liberación de fallas a tierra para que funcione como complemento del presente trabajo ya que de dicho estudio depende la limitación de las fallas a tierra a valores que puedan ser conducidos de manera correcta por el sistema de puesta a tierra.

También es de amplio interés desarrollar las soluciones aplicables para mejorar la resistividad del terreno para condiciones en que el sitio tenga una resistividad muy elevada y el espacio de construcción sea reducido. Existen diversos materiales y técnicas empleadas para mejorar los valores del suelo y resulta interesante definir con cuál de ellos se logran mejores resultados y con la menor inversión posible.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2015). IEEE Std 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [2] Miranda Rosales, A. (2018). Antecedentes, objetivo y marco legal de la NOM-001-SEDE-2012 [Discurso principal]. Simposium Internacional de Energía AMUVIE.
- [3] Secretaría de Energía. (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (Utilización).
- [4] Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2016). Norma Oficial Mexicana NOM-022-STPS-2015, Electricidad estática en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad.
- [5] Chacón Ovando, F. (2018). Programa Para El Diseño De Una Malla De Tierras En El Diseño De Una Malla De Tierras En Cumplimiento Con La NOM-001-SEDE Vigente (Residencia profesional). Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
- [6] Asdrúbal Herrera, J., & Castro Hernández, O. (2003). Cálculo De La Malla De Puesta a Tierra De Una Subestación. *Scientia Et Technica*, Año IX (No. 22), 37-42. Retrieved 27 May 2021, from.
- [7] Rodríguez Jauregui, G. (2002). Sistema De Red De Tierras En subestaciones Eléctricas de Potencia (Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [8] Villarrubia, A. (2000). Seguridad eléctrica: efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano. Universidad de Barcelona, Facultad de Física.
- [9] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2015). IEEE Std 80-2013 Guía IEEE para la Seguridad en el Aterrizamiento de Subestaciones de C.A.
- [10] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2012). IEEE Std 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System.

- [11] Tapia Valladares, T. (2019). Estudio del Sistema de Puesta a Tierra de la Planta de Alimentos Balanceados Albasur de Acuerdo a la NOM-022-STPS-2015. (Residencia Profesional). Tecnológico Nacional de México.
- [12] Almendariz Rodríguez, C., Fun-Sang Robinson, K., Saltos Sánchez, A. (2017). Influencia de la salinidad y su evaluación en urbanización Málaga dos en vía a salitre Guayaquil – Ecuador. Revista Científica Dominio de las Ciencias.
- [13] Nava Palacios, J. (2009). Propuesta de diseño del sistema de puesta a tierra y medición de resistencia a tierra de la subestación Las Fresas Banco I. Instituto Politécnico Nacional.
- [14] Vazquez Muñoz, E. (2016). Diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica mediante dos metodologías. Instituto Politécnico Nacional.
- [15] Hubbell Products Mexico. (2020). Catálogo Industrial. Conectores para sistemas de tierras.
- [16] Tecnoweld. (2018). Mallas a tierra. Soldadura aluminotérmica.
- [17] Granda, N., Otero, P., Peñafiel, S., Vallejo, D. (2021). Simulación de Mallas de Puesta a Tierra Utilizando el Método de los Elementos Finitos en Tres Dimensiones. Escuela Politécnica Nacional.
- [18] Montenegro. A., Montes, T. (2018). Aplicación del electromagnetismo computacional al cálculo de redes a tierra. Universidad de El Salvador.
- [19] Palm, M. (2012). Diseño de electrodo de puesta a tierra para sistemas de transmisión en corriente continua mediante método de elementos finitos. Universidad de Chile.
- [20] Liu, Q., Quek, S. (2003) The Finite Element Method. A practical course. Oxford, Elsevier Science Ltd.