ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN TRES DIMENSIONES Y UN MODELO FÍSICO REAL A ESCALA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN INGENIERÍA

HILDA SAMANTHA PEÑAFIEL PADILLA

DAVID RODRIGO VALLEJO HERRERA

DIRECTOR: Ing. Patricia Elizabeth Otero Valladares, MSc

CODIRECTOR: Ing. Nelson Victoriano Granda Gutiérrez, PhD

Quito, 09 marzo de 2020

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Hilda Samantha Peñafiel Padilla y David Rodrigo Vallejo Herrera, bajo nuestra supervisión.

Ing. Patricia Elizabeth Otero Valladares, MSc
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ing. Nelson Victoriano Granda Gutiérrez, PhD
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Hilda Samantha Peñafiel Padilla y David Rodrigo Vallejo Herrera, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejamos constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

HILDA SAMANTHA PEÑAFIEL PADILLA	DAVID RODRIGO VALLEJO HERRERA

DEDICATORIA

El siguiente trabajo de titulación está dedicado única y exclusivamente a mi madre, Rosario Padilla. Mi madre es la persona más valiente que he conocido, ha trabajado todos los días de su vida para mis hermanos y para mí. Mi madre me ha dado las herramientas necesarias para defenderme en la vida y me ha enseñado la importancia del trabajo. Gracias, madre por confiar en mí y haberme dado el apoyo para alcanzar este gran reto. Te amo.

Samantha Peñafiel Padilla

Este trabajo de titulación se encuentra dedicado íntegramente a mi familia. Quienes han estado conmigo íntegramente a lo largo de este proceso, este logro es de ustedes. Su compañía permitió que el camino a recorrer sea mucho más fácil. Su aliento, entereza, y enseñanzas me permitieron conseguir este logro. ¡Juntos siendo un equipo, a por ello!

David Vallejo Herrera

AGRADECIMIENTO

A mi hermana Soledad Peñafiel, por su apoyo a lo largo de mi carrera universitaria, mi hermana se ha sacrificado para que yo pueda cumplir mis estudios. Ella es la persona más importante de mi vida por su inmensa bondad hacia mí. Solecito te quiero.

A Luis Alejandro Toro, por brindarme sus conocimientos y consejos, que me han permitido convertirme en una mejor persona. Te amo y gracias por todo lo que haces para ayudarme a cumplir mis sueños.

A Patricia García, por ser esa persona que me alentado y ha creído en mí siempre.

A mis amigos Darío, Andrés, Iván, Jhon, Enrique, Geovanna y Juan Diego, quienes me han brindado su amistad y momentos de felicidad.

Samantha Peñafiel Padilla

Agradezco sobre todo a Dios, quien en su sabiduría situó en mi vida pilares fundamentales, mi familia. Siempre con su apoyo incondicional, sus palabras de aliento, y deseos de ver en mí una mejor persona día a día. Ustedes son la llama que alimenta y guía mi ser, buscando siempre poder observar el brillo de orgullo en sus ojos por mí.

Agradezco a mi madre, por ser una abnegada compañera y amiga. Trabajando diariamente por mi hermano y por mi para darnos lo mejor. ¡Te quiero viejita!

Agradezco a mi hermano, mi ejemplo de vida. Quien mediante su guía, dedicación y esfuerzo busca siempre hacer de mí una mejor persona. Mas que un hermano has sido un padre para mí.

Agradezco a mi padre, quien ha ayudado en la formación de mi ser.

Agradezco a mi abuelita, mi segunda madre. Quien en espíritu me acompaña en cada momento de mi vida. Imagino el orgullo y pena en tu contrito corazón el no estar presente.

Finalmente, a agradecer a Dios por poner en mi vida a tan buenas personas como mis amigos y compañeros especialmente a Bryan, Carmen, Francisco, Mishelle, Stefania, Saraí y si me olvido de alguien espero nombrarlos en el TCPIP. A mi universidad por permitirme tener tan buenos docentes, algunos con quienes pude contar con ellos como un amigo más; exigiendo siempre un trabajo de calidad y excelencia de mi parte.

David Vallejo Herrera

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA II
DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTO V
ÍNDICE DE CONTENIDO VII
RESUMEN IX
ABSTRACT X
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 OBJETIVOS 2
1.2 ALCANCE 2
1.3 MARCO TEÓRICO 3
1.3.1 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA (SPAT) 3
1.3.2 GENERALIDADES DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA 4
1.3.3 ESTUDIO DE SUELOS 4
1.3.4 LA RESISTIVIDAD DEL SUELO 5
1.3.5 TIPOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA 6
1.3.6 FUNCIONAMIENTO DEL TELURÓMETRO 8
1.3.7 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA 10
1.3.8 MODELOS PARA LA RESISTIVIDAD DEL SUELO 11
1.3.9 GEOMETRÍA DE LA MALLA 13
1.3.9.1 Parámetros críticos para un Sistema de Puesta a Tierra 14
1.3.9.2 Voltajes convencionales de seguridad en un SPAT 15
1.3.10 MÉTODOS PARA DETERMINAR DISTRIBUCIONES DE POTENCIAL 18
1.3.11 SISTEMAS DISCRETOS 20
1.3.11.1 Método de elementos finitos (FEM) 20
1.3.11.2 Secuencia general del FEM 21
1.3.12 MODELAMIENTO DE UNA MALLA DE PUESTA A TIERRA 25
1.3.13 ECUACIONES GOBERNANTES 25
1.3.14 SOLUCIÓN DE SISTEMAS MEDIANTE FEM Y MATRIZ DE RIGIDEZ 26

1.3.15 ECUACIONES DE MAXWELL EN FEM 28
1.3.16 SOLUCIÓN NUMÉRICA DE ECUACIONES DIFERENCIALES 30
1.3.17 CONDICIONES DE FRONTERA EN EL INFINITO 31
1.3.17.1 Propiedades que deben tener los mesheados 32
1.3.17.2 ANSYS 32
1.3.18 EVALUACIÓN DE ERRORES PARA VALIDACIÓN DE MODELOS 33
2. METODOLOGÍA 35
2.1. MÉTODO EMPLEADO EN EL EXPERIMENTO 37
2.2. DEFINICIÓN DEL EXPERIMENTO PARA VALIDAR EL MODELO 39
2.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO A ESCALA 41
2.4. VALIDACIÓN DEL MODELO A ESCALA 46
2.5. CASOS DE ESTUDIO MODELO VALIDADO 47
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 49
3.1. EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO 49
3.2. MODELACIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA EN ANSYS 51
3.3. VALIDACIÓN 63
3.4. RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO 66
3.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 71
3.5.1. VOLTAJE MÁXIMO DE LOS CUERPOS SIMULADOS 71
3.5.2. RESULTADOS DE VOLTAJES DE LOS CUERPOS SIMULADOS 73
3.5.3. VOLTAJE MAXIMO DE LA SUPERFICIE DEL SUELO (GPR) 81
3.5.4. RESISTENCIA DE LA PUESTA DE MALLA A TIERRA 82
3.5.5. VOLTAJE DE PASO 83
3.5.6. VOLTAJE DE TOQUE 84
3.6. PERFILES DE VOLTAJE EN TRES DIMENSIONES 85
3.7. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL MEDIO 94
3.8. EFECTOS DE LA VARIACION DE LA RESISTIVIDAD DE LAS CAPAS DEL SUELO 96
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 98
4.1. CONCLUSIONES 98
4.2. RECOMENDACIONES 99
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 101
ANEXOS 103

RESUMEN

Este trabajo desarrolla la modelación y simulación de sistemas de puesta a tierra mediante el método de elementos finitos. La simulación se realiza con diferentes escenarios geométricos, de resistividad de materiales, de valores de corriente y de lugares por los cuales ingresará la corriente en la malla de puesta a tierra. Se emplea el método de los elementos finitos en tres dimensiones empleando Analysis System (ANSYS) como software de simulación.

Para validar el modelo se utiliza un prototipo real a escala de una malla de puesta a tierra en una cuba electrolítica, se someten a las mismas condiciones tanto la simulación y el modelo real. La validación consiste en comparar los perfiles de voltaje medidos en el modelo físico y el simulado. Posteriormente se simulan diferentes mallas de puesta a tierra y midiendo las características inherentes de cada tipo de configuración como lo son el número de elementos finitos, la cantidad de elementos, el calentamiento que produce, la potencia disipada, y la resistencia de la malla de puesta a tierra. Todos estos resultados permiten analizar y discutir acerca de las cualidades de la configuración geométrica de la malla a diferentes escenarios.

El objetivo de este proyecto es generar un conocimiento aplicable para el diseño de un sistema de puesta a tierra (SPAT) y evaluar resultados como el voltaje de paso, el voltaje de toque, y la máxima elevación de potencial (GPR).

PALABRAS CLAVE: Analysis System, ANSYS, elementos finitos, malla de puesta a tierra, máxima elevación de potencial, modelación, voltaje de paso, voltaje de toque.

ABSTRACT

This work develops the modeling and simulation of grounding systems using the finite element method. The simulation is carried out with different geometric scenarios, material resistivity, current values and places where the current will enter the grounding grid. The finite element method is used in three dimensions using Analysis System (ANSYS) as simulation software.

To validate the model, a real scale prototype of a grounding grid in an electrolytic tank is used. Both the simulation and the real model are subjected to the same conditions. The validation consists of comparing the voltage profiles measured on the physical model and the simulated one. Subsequently, different grounding meshes are simulated and the inherent characteristics of each type of configuration are measured, such as the number of finite elements, the quantity of elements, the heating produced, the power dissipated, and the resistance of the grounding mesh. All these results allow to analyze and discuss the qualities of the geometric configuration of the grid at different scenarios.

The objective of this project is to generate applicable knowledge for the design of a grounding system (SPAT) and to evaluate results such as step voltage, touch voltage, and maximum potential rise (GPR).

KEYWORDS: Analysis System, ANSYS, finite elements, grounding grid, maximum potential rise, modeling, step voltage, touch voltage.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de puesta a tierra es un elemento vital dentro de las instalaciones eléctricas, domesticas, e industriales [1]. Realiza un trabajo importante al hablar de protección y un correcto funcionamiento de los sistemas de energía eléctrica [2].

Su principal función es que su diseño permita proteger la integridad física de las personas; para ello existen indicadores que permiten analizar su funcionalidad. Además, de proteger a las personas sirve de protección a los equipos y garantizando una referencia de potencial evita que afecten de contaminación las señales que posean una frecuencia distinta a la que se está empleando. Presente diariamente en cada una de las etapas de generación, transporte, y consumo de la energía eléctrica; desde equipos de uso diario hasta torres de transmisión.

El sistema de puesta a tierra debe estar diseñado de tal manera que bajo todas las condiciones de la falla no se exceda el máximo potencial de malla y de paso tolerable. Las técnicas analíticas utilizadas para los sistemas complejos de puesta a tierra también son complejas y requieren algunas suposiciones simplificadoras para que los programas de computación digital sean manejables.

Existen normas y recomendaciones que al hablar de sistemas de puesta a tierra recopilan información para realizar un correcto diseño. Las técnicas analíticas han variado desde las que utilizan simples cálculos manuales hasta las que implican modelos a escala y complicados programas informáticos digitales que utilizan cálculos matemáticos modernos.

El método de los elementos finitos (FEM), permite estudiar sistemas cuya complejidad hace impráctico o imposible su caracterización y solución como un sistema continuo. Dividiendo a los cuerpos de un sistema en una cantidad finita de elementos de manera que analizar cada uno de estos elementos sea más sencillo. [13]

El propósito del proyecto descrito es utilizar modelos a escala de una malla de puesta a tierra para simular el comportamiento de las mallas de puesta a tierra modeladas durante una falla en diferentes condiciones.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es realizar la modelación y simulación de sistemas de puesta a tierra en un suelo de varias capas y mallas de diferentes geometrías mediante el método de los elementos finitos en tres dimensiones con el software ANSYS y la ayuda de un modelo real a escala en una cuba electrolítica.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- *Desarrollar un método de simulación de sistemas de puesta a tierra mediante el uso de elementos finitos, en tres dimensiones en el paquete de física eléctrica del software ANSYS 2017.*
- *Validar el método de simulación de elementos finitos mediante la comparación de perfiles de voltaje con un modelo físico a escala en una cuba electrolítica sometido a condiciones eléctricas de puesta a tierra.*
- *Obtener sistemáticamente las distribuciones de potencial de la malla a través de simulaciones diferentes en los medios y configuraciones modeladas.*
- *Estudiar el comportamiento de mallas a escala real simuladas ante diferentes condiciones de geometría, materiales y suelos generando un conocimiento práctico aplicable en la industria.*

1.2 ALCANCE

Se construirá un modelo físico de un sistema de puesta a tierra (SPAT). La malla a escala será de geometría rectangular de 900 [mm] x 900 [mm] con vanos de 45 [mm]. Se utilizará alambre de cobre desnudo #24 con diámetro de 0.5 [mm]. Para simular una malla continua, las intersecciones se unirán con soldadura suave de estaño.

Parte del modelo físico incluye la adecuación de una cuba electrolítica para simular el comportamiento del suelo. Se utiliza una piscina de 4500 [mm] x 2200 [mm] x 800 [mm]. Dentro de la cuba electrolítica se colocará un semi domo de malla electrosoldada para establecer un área de referencia equipotencial. La cuba electrolítica estará llena de agua y para simular el comportamiento del suelo.

La energía del sistema se conseguirá de la red de suministro obteniendo un voltaje total de 220 voltios y a una frecuencia de 60 Hertz. Esta se regulará hasta la obtención de 4

amperios y 60 Hertz mediante el uso de un autotransformador y un reóstato. Uno de los terminales se conectará a la malla y el otro en el semi domo de referencia.

Las mediciones se realizarán con un voltímetro y una sonda para medir voltaje. Uno de los terminales se conectará al semi domo de referencia y el otro a la sonda. La sonda de voltaje se moverá en distintos puntos de la superficie de la piscina para obtener valores de voltaje. Estos valores de voltaje y sus coordenadas se tabularán para visualizar el comportamiento del sistema a escala.

Luego se construirá un modelo digital del sistema a escala descrito. Se generarán los elementos del sistema mediante software de diseño asistido por computadora (CAD). Se utiliza AutoCAD 2019 para crear los elementos tridimensionales. Para la simulación del fenómeno se utilizará software de elementos finitos con paquetes de física eléctrica. Se planea la utilización de ANSYS 2017 con paquetes eléctricos. En la simulación se configuran los materiales y condiciones de borde equivalentes al modelo físico a escala.

Posteriormente se contrastarán los resultados de la simulación con los resultados obtenidos en el modelo físico. Se realizarán adecuaciones en el tamaño del mallado y/o calidad de los elementos tridimensionales hasta obtener una simulación eficiente. Se estudiarán los resultados obtenidos para generalizar el método de simulación.

Finalmente, con el modelo validado se construirán modelos digitales a escala real utilizando el método desarrollado. Los modelos serán variados en cuanto a geometría, materiales y suelos. Se estudiará el comportamiento de las simulaciones de estos modelos para obtener conocimiento práctico aplicable en el diseño de SPAT.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA (SPAT)

El desarrollo de la tecnología en el ámbito eléctrico y electrónico actual tiene la necesidad de precautelar la seguridad de las personas y equipos. Los sistemas de puesta a tierra están involucrados directamente en el diseño, construcción y operación de sistemas eléctricos de bajo, medio y alto voltaje [1]. Los sistemas de puesta a tierra tienen dos funciones principales [2] [3]: Garantizar la seguridad y protección de las personas, equipos y las instalaciones de los sistemas eléctricos y ser el punto de referencia de 0 V de la red eléctrica. Complementariamente, los SPAT también se encargan de:

- Facilitar un camino rápido para la descarga de las corrientes de falla producidas por maniobra o medios atmosféricos.

- Mejorar la confiabilidad del sistema.
- Evitar que se acumulen cargas estáticas.

1.3.2 GENERALIDADES DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Un sistema de puesta a tierra dirige las corrientes de falla de un sistema eléctrico hacia la tierra, de modo que no se sobrepase a ningún límite de operación de equipos [4]. Este actúa al establecer un medio de conducción entre equipos e instalaciones y la tierra. En general, un SPAT consiste proveer la interacción entre el aterrizaje intencional de electrodos enterrados y el aterrizaje no intencional que se crea cuando una persona es expuesta a un gradiente de potencial en la vecindad de equipos e instalaciones de puestas a tierra. Las definiciones más relevantes relacionadas a los SPAT se describen a continuación [2]:

- **Ground (Tierra).** Es una conexión conductiva intencional, accidental en la cual un circuito eléctrico o un equipo se conecta al planeta tierra o a algún cuerpo conductivo de relativamente gran extensión que reemplaza al planeta tierra [2].
- **Grounded (Puesto a tierra).** Es un sistema, circuito o aparato provisto con una tierra o tierras con el propósito de establecer un circuito de retorno a tierra y para mantener su potencial aproximado al potencial del planeta tierra [2].
- **Ground current (Corriente de puesta a tierra).** Es la corriente fluyendo hacia o desde el planeta tierra o su equivalente que sirva como tierra [2].
- **Ground electrode (Electrodo de puesta a tierra).** Es un conductor embebido en el planeta tierra y usado para colectar corriente de puesta a tierra desde el planeta tierra o para disipar corriente de puesta a tierra hacia el planeta tierra [2].
- **Ground grid (Malla de puesta a tierra).** Un sistema interconectado de electrodos de puesta a tierra arreglados en un patrón sobre un área especificada y enterrados bajo la superficie del planeta tierra [2].
- **Grounding system (Sistema de puesta a tierra).** Comprende el conjunto de todas las facilidades interconectadas de puesta a tierra en un área específica [2].

1.3.3 ESTUDIO DE SUELOS

Los suelos se comportan generalmente como resistencias y dieléctricos al mismo tiempo. Sin embargo, para altas frecuencias, se consideran únicamente resistivos [2]. La resistividad de los suelos depende principalmente de su humedad ya que la manera en que

conducen electricidad es principalmente por un medio electrolítico [2]. Otros factores que afectan la conductividad del suelo se mencionan a continuación [1]:

- Presencia y concentración de sales solubles.
- Composición propia del terreno.
- Estratigrafía.
- Granulometría.
- Compactación.
- Presión.

1.3.4 LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

El suelo actúa como un medio para disipar corriente de falla. Su resistividad depende de las condiciones físico-químicas que este posea [1]. Los valores estimativos basados en la resistividad de los tipos de suelo se muestran en la Tabla 1.1 y Tabla 1.2; sin embargo pueden variar significativamente en condiciones reales. En general, la resistividad de los suelos disminuye cuando la salinidad y la humedad aumenta; la temperatura [2].

El estudio de la resistividad del suelo de una subestación permite determinar la composición general del suelo y su grado de homogeneidad. La Tabla 1.1 presenta el rango típico de resistividad de suelos mientras que la Tabla 1.2 presenta un rango simplificado según la naturaleza del terreno [5].

Tabla 1.1. Rango de resistividad del suelo [5].

TIPO DE SUELO	RANGO DE RESISTIVIDAD(Ω-m)
Lama	5-100
Humus	10-150
Limo	20-100
Arcillas	80-330
Tierra de jardín	140-480
Caliza fisurada	500-1000
Caliza compactada	1000-5000
Granito	1500-10000
Arena común	3000-9000
Basalto	10000-20000
Agua de mar	1

TIPO DE SUELO	RANGO DE RESISTIVIDAD(Ω-m)
Soluciones Salinas	0.1-0.001
Minerales conductores	0.01

Tabla 1.2. Valores Promedio de resistividad de algunos tipos de suelos [5]

Naturaleza del terreno	Rango de resistividad (Ω-m)
Terrenos cultivables y fértiles; terraplenes compactos y húmedos.	50
Terraplenes cultivables poco fértiles y terraplenes.	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables.	3000

Se utiliza un telurómetro para medir la resistividad aparente de los suelos; este es un equipo portátil que permite crear un circuito temporal con corriente y voltajes conocidos para determinar la resistencia de los sistemas de puesta a tierra, así como la resistividad del suelo. En campo se utilizan distintos métodos para medir la resistividad del suelo. Los mismos se describen en la sección 1.3.7.

El valor de la resistividad es igual en todo punto y dirección de un medio si el conductor es homogéneo e isotrópico [2]. El suelo, sin embargo, generalmente tiene varias capas con resistividades diferentes; la mayoría, no son homogéneos, sino que están conformados por diversos tipos de sustratos normalmente horizontales. Por esa razón, las mediciones deben hacerse en varios lugares dentro del área de la subestación.

1.3.5 TIPOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Los sistemas más simples de puesta a tierra consisten en un único electrodo fijado en el terreno; el uso de un solo electrodo es la forma más común de realizar puestas a tierra. En el caso de SPAT más complejos se utiliza arreglos de varias varillas conectadas entre sí, de redes en malla, de placa y de bucles de puesta a tierra [2]. A continuación, se detallan los tres sistemas de puesta a tierra más relevantes:

a. Electrodo de puesta a tierra

Los electrodos son elementos metálicos desnudos, que están en contacto directo con el terreno como se aprecia en la Figura 1.1. Los electrodos están constituidos por materiales

resistentes a humedad y a la acción química del terreno. Los materiales más utilizados son cobre, acero y hierro [6].

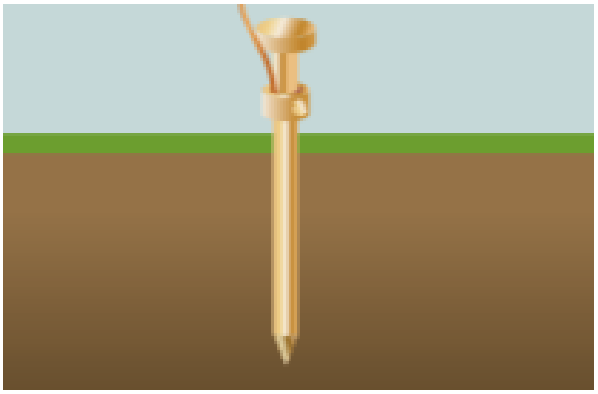


Figura 1.1. Electrodo de puesta a tierra simple [7].

b. Malla de puesta a tierra

Una malla de puesta a tierra está formada por conductores de cobre desnudo o cables de acero galvanizado, que se unen entre sí. Generalmente se instalan bajo tierra a una profundidad de 0.6m [6], como se presenta en la Figura 1.2.

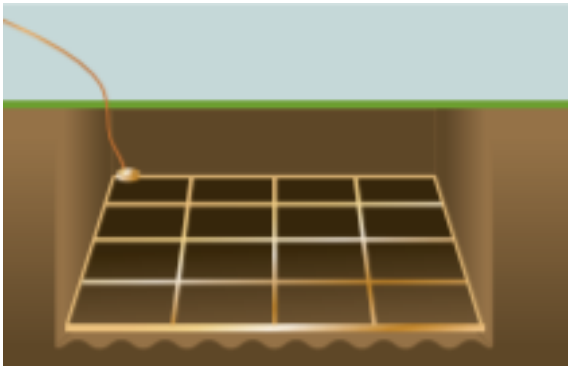


Figura 1.2. Red de malla de puesta a tierra [7].

c. Placa de puesta a tierra

Las placas de puesta a tierra se instalan de cobre o hierro con baño de zinc. Suelen tener 4 [mm] de grosor, y una superficie útil inferior a $0.5\mathrm{m}^2$. Se las coloca enterradas en posición horizontal, de forma que la arista superior quede al menos 50cm bajo la superficie del terreno como se indica en la Figura 1.3 ; si existe más de una placa estas se colocan a una separación de 3m [6] .

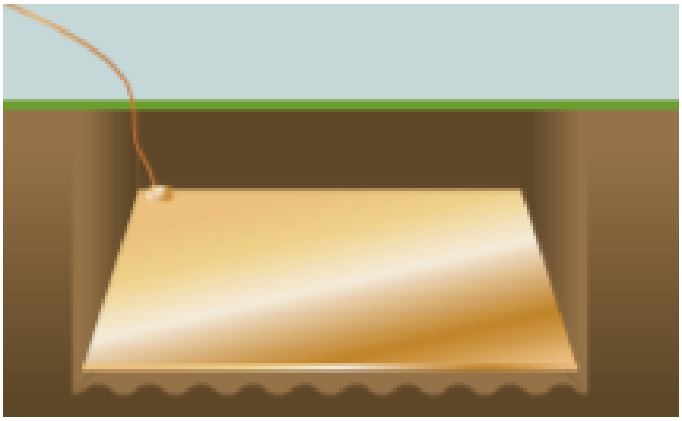


Figura 1.3. Placa de puesta a tierra [7].

1.3.6 FUNCIONAMIENTO DEL TELURÓMETRO

El telurómetro utiliza la ley de Ω para calcular la resistencia del suelo [8]. Crea un circuito temporal en el que la corriente y la caída de voltaje son conocidos; esto permite determinar la resistencia del suelo. El equipo está conformado por una fuente de corriente y voltaje a frecuencia industrial comprendida en los 50 - 60 Hz.

La Figura 1.4 muestra el principio de funcionamiento de telurómetro con sus respectivas partes. Se inyecta una corriente constante a través de una varilla auxiliar (C) enterrada a una distancia de 20m del electrodo del sistema de puesta a tierra bajo prueba (T). La corriente retorna al medidor a través de la varilla auxiliar (P). La corriente, al fluir a través del material resistente (tierra), produce una caída de voltaje. Esta caída de voltaje es proporcional a la corriente y a la resistencia del sistema de puesta a tierra. El medidor conoce la cantidad de flujo de corriente y mide la caída de voltaje resultante del proceso antes mencionado.

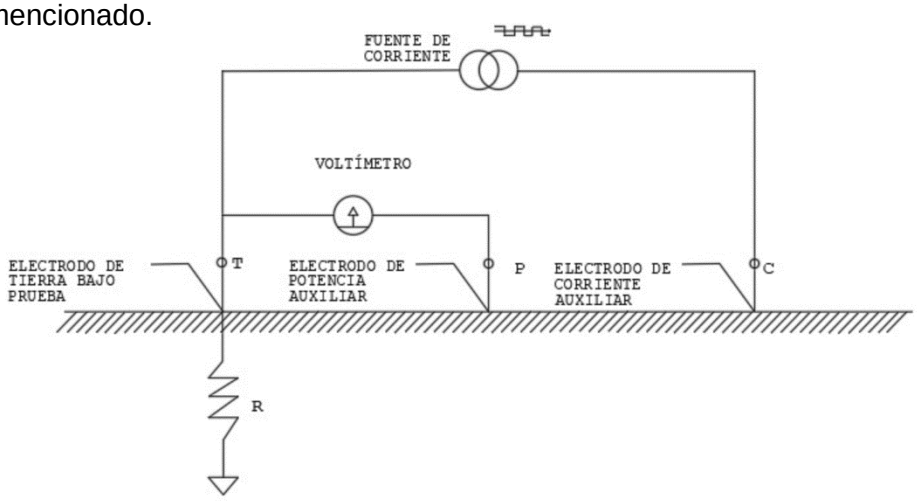


Figura 1.4. Principio de funcionamiento del Telurómetro [8].

a. Método de Wenner

Es el método más seguro en la práctica para medir la resistividad promedio de volúmenes extensos en suelos naturales [9]. Otros métodos no serán descritos en el presente documento. Consiste en calcular la resistividad aparente del terreno de un sistema de puesta a tierra mediante cuatro electrodos que se colocan en el suelo; la Figura 1.5 presenta el esquema de conexión de los electrodos y el telurómetro.

Se inyecta corriente de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2, mientras que el potencial que aparece se mide entre los dos electrodos restantes P1 y P2. Los electrodos se disponen en línea recta y a igual distancia entre ellos. Se deben enterrar a 5% de profundidad del espaciamiento que existen entre los electrodos. Los electrodos están conectados al instrumento de medida mediante cables aislados. La Figura 1.5, indica el esquema de conexión de los electrodos y del telurómetro.

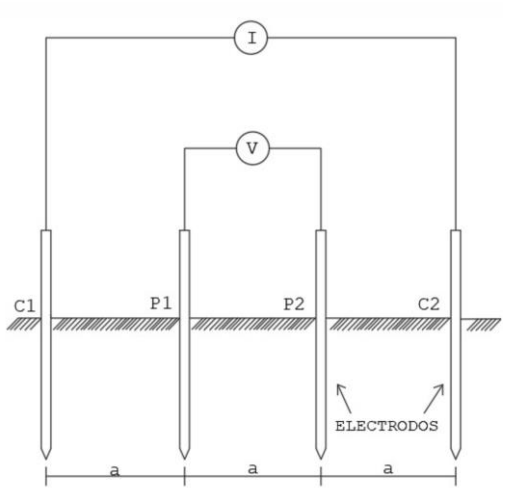


Figura 1.5. Disposición de los electrodos en el método Wenner [3].

La resistividad aparente, se calcula internamente mediante la ecuación (1.1) [5]:

$$p = \frac{4\pi AR}{\left[1+\left[\frac{2A}{\left(A^2+4\times B^2\right)^{0.5}}\right]-\frac{2A}{\left(4A^2+4B^2\right)^{0.5}}\right]} \tag{1.1}$$

Donde:

p = Resistividad promedio a la profundidad A en Ω-m.

A = Distancia entre electrodos en metros.

B = Profundidad de enterrado de los electrodos en metros.

R = Lectura del telurómetro en Ω.

Si la distancia enterrada de los electrodos (B) es relativamente pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (A), la ecuación (1.1) se simplifica en la ecuación (1.2) [5]:

$$p = 2\pi AR \tag{1.2}$$

1.3.7 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

La medición de la resistencia de un SPAT se realiza una vez que se haya terminado la instalación; con esto se verifica que se ha alcanzado la resistencia de diseño.

MÉTODO DE LA REGLA 62%

Este método fue desarrollado por G. F. Tagg en 1964 [11]. Las zonas de influencia de los SPAT pueden ser grandes así que, para evitar la superposición de estas áreas, se toma distancias considerables entre el electrodo de corriente y el SPAT a evaluar. Este método toma como hipótesis que el espacio de influencia del SPAT es una semiesfera, con la que se obtiene el valor asociado de 0,6180 para la distancia de influencia [11].

La distancia entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra por evaluar debe ser entre 5 y 6 veces la mayor dimensión de la puesta a tierra o el diámetro equivalente. La diferencia con el método de la caída de potencial está en que el punto donde se debe tomar el valor verdadero de la resistencia de puesta a tierra es con el electrodo de tensión a 0,618 del electrodo de corriente auxiliar (C) [11].

El método de la regla 62% se aplica cuando el SPAT consiste en un solo electrodo, cable o placa. El método consiste en colocar tres electrodos en línea recta e inyectar una corriente entre el electrodo a medir y un electrodo de corriente auxiliar (C) como se observa en la Figura 1.6. Esto permite medir el voltaje entre el SPAT y un electrodo de potencial auxiliar (P). Este procedimiento minimiza la influencia entre electrodos. El electrodo de corriente generalmente se coloca a una distancia considerable del SPAT, al menos 6 veces superior a la dimensión más grande de la puesta a tierra [10].

El electrodo de la fuente voltaje debe colocarse en la misma dirección o en dirección opuesta del electrodo de corriente. La distancia para el electrodo de potencial se elige aproximadamente al 62% de la distancia del electrodo de corriente. Esta aproximación está establecida en la posición teórica del 61.8% para medir la resistencia exacta del electrodo para un suelo de resistividad homogénea [10].

La ubicación del electrodo de voltaje es crítica para medir la resistencia de un SPAT. La localización tiene que estar libre de cualquier influencia del SPAT a medir y del electrodo auxiliar de corriente. Para determinar si el electrodo de voltaje está fuera de la zona de influencia del SPAT, se tiene que realizar varias mediciones de resistencia moviendo el electrodo de voltaje a varios puntos en los que sí se encuentre el SPAT [10]. La Figura 1.6 presenta la descripción grafica del método del 62%.

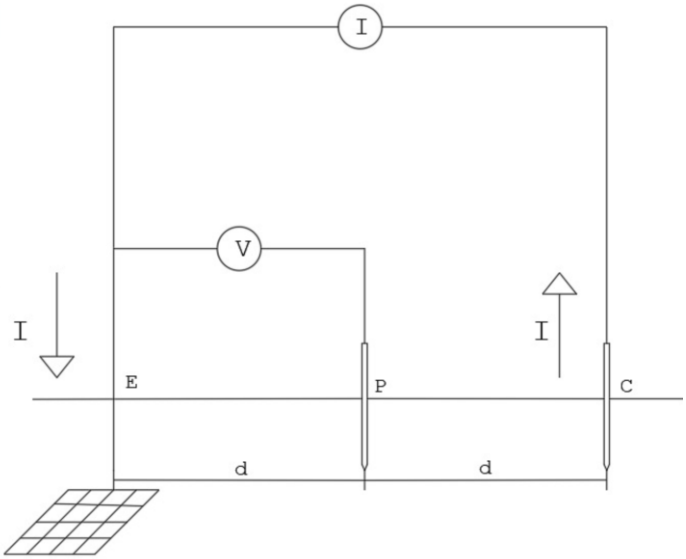


Figura 1.6. El método de la regla 62% para medir la resistencia de SPAT [10].

1.3.8 MODELOS PARA LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

El propósito de realizar las mediciones es obtener un modelo que ofrezca una aproximación real del suelo. Las mediciones de resistividad del suelo permiten conocer la resistividad y el espesor de cada una de las capas hasta la profundidad que influencia la puesta a tierra. El modelo del suelo que se obtiene con las mediciones es una aproximación de las condiciones reales del terreno [10]. A continuación, se mencionan los tres modelos de suelos en función de las capas de material:

a. Modelo de suelo Homogéneo

Este modelo se utiliza cuando solo existe una variación moderada de la resistencia aparente. Solo se debe utilizar cuando la diferencia entre las capas es mínima. Este modelo consiste en trabajar con un valor promedio para la resistividad del suelo. La resistividad aproximada para un suelo uniforme se obtiene mediante el promedio aritmético de las resistividades aparentes medidas en varios sitios y direcciones dentro del área como indica la ecuación (1.3) [10]:

$$\rho = \frac{\rho_{a1} + p_{a2} + --- + \rho_{an}}{n} \quad (1.3)$$

Donde:

$\rho_{a1} + p_{a2} + - + \rho_{an}$ = Resistividades aparentes

n = Número total de medidas tomadas

La mayoría de los suelos no satisfacen este criterio. En la práctica, la resistividad de los suelos varía significativamente. Un suelo puede ser considerado como uniforme si la diferencia entre los dos valores extremos de las resistividades medidas es menor del 30% [10].

b. Modelo de suelo de dos capas.

Es una representación más realista de las condiciones del suelo. Este modelo consiste en trabajar con una capa superior de profundidad finita y con resistividad diferente a la de la capa más baja. El cambio abrupto de la resistividad en los bordes de cada capa de suelo puede describirse por medio del factor de reflexión k , definido en la ecuación (1.4) [10]:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (1.4)$$

Donde:

ρ_1 = Resistividad de la capa superior en Ω-m.

ρ_2 = Resistividad de la capa inferior en Ω-m.

c. Modelo de suelo multicapa.

Es un modelo para condiciones de suelo más complejas. Este se utiliza cuando un modelo de suelo de dos capas no es factible, es decir como cuando las capas son tanto horizontales como verticales. La técnica para interpretar resistividades de suelo altamente no uniforme es el uso del método de elementos finitos. Este considera las características anisotrópicas, propiedades que varían con la dirección, de la conductividad del medio y es aplicable para distintas geometrías [5].

Método estadístico BOX-COX

Este es un método estadístico que se utiliza para corregir el sesgo en la distribución de errores. Entre las variables que se corrigen con este método se puede mencionar: *"varianzas desiguales (diferentes valores de la variable predictor) y principalmente para corregir la no linealidad en la relación de las variables (mejora la correlación entre las*

variables)" [10]. Este método es altamente utilizado en estudios de SPAT para determinar si se debe considerar un suelo como homogéneo.

Se considerará un suelo como homogéneo cuando los valores definitivos y representativos de resistividad aparente obtenidos para cada espaciamiento, no se aparten en más de un 30% del valor máximo de los mismos [2], [10].

En el método estadístico BOX-COX se busca un valor que tiene una probabilidad de 70% de ser el real. Esto implica que, entre 100 medidas de resistividad, 70 se encuentra dentro del rango esperado. Si la condición se cumple, el suelo se considera homogéneo [14]. Las ecuaciones 1.5 a la 1.8 describen el procedimiento de la implementación del método BOX-COX para SPAT [10].

a. En una columna se tabulan los datos de resistividad aparente medida p_i

b. En otra columna se colocan los logaritmos naturales de cada una de las medidas

$$x_i = L_{npi} \tag{1.5}$$

c. Se hallan la resistividad promedio x como:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n} \tag{1.6}$$

d. En otra columna se colocan el resultado de $(x_i - x)^2$

e. Se calcula la desviación estándar S como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n}(x_i - x)^2}{n}} \tag{1.7}$$

f. De la distribución normal se toma Z para 70%, que da 0.524411.

g. Se halla la resistividad (con probabilidad del 70% de no ser superada) por la siguiente fórmula:

$$r = AntiLn(SZ + x) \tag{1.8}$$

1.3.9 GEOMETRÍA DE LA MALLA

Las limitaciones de los parámetros de una malla de puesta a tierra están basadas en las restricciones físicas y económicas de las mismas. Es poco práctico instalar siempre una

placa de cobre como sistema de puesta a tierra [5]. Los parámetros más comunes en cuanto geometría de mallas de puesta a tierra son:

- La distancia (D) entre conductores en una malla de puesta a tierra están entre el rango de 15 >D>3 m.
- La profundidad típica (h) está entre el rango de 1.5>h>0.5 m.
- Los calibres típicos de conductores ACM están en el rango de 500MCM <ACM<2/0 AWG.
- El diámetro del conductor de la malla tiene un efecto despreciable sobre el voltaje de la malla.
- El área del sistema de puesta a tierra (A) es el factor más importante en la determinación de la resistencia del sistema de puesta a tierra ya que reduce el GPR.

1.3.9.1 Parámetros críticos para un Sistema de Puesta a Tierra

En un SPAT hay factores que representan riesgos eléctricos. Es importante controlar los mismos dentro de los límites admitidos [11]. A continuación, se describen los parámetros de un sistema de puesta a tierra que deben ser controlados:

a. Corriente Limite Tolerable por el Cuerpo.

La magnitud y duración de la corriente conducida a través de un cuerpo humano en 50 o 60 Hz debe ser menor a que el valor que puede causar fibrilación ventricular del corazón. La duración para que una corriente de 50 o 60 Hz puede ser tolerable por la mayoría de las personas está relacionada con su alcance, para mayor referencia ver la ecuación (1.9), Se supone que el 99.5% de todas las personas de manera segura puede soportar, sin fibrilación ventricular, el paso de una corriente con la magnitud y duración determinada por la ecuación (1.10) [2].

$$S_B = {I_B}^2 t_s \tag{1.9}$$

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{S_B}} \tag{1.10}$$

Donde:

I_B = Magnitud rms de la corriente a través del cuerpo en A.

t_s = Duración de la exposición a la corriente en s.

S_B = La constante empírica relacionada con la energía de choque eléctrico tolerado.

b. Factor de decremento (D_F)

En el diseño de una malla de puesta a tierra se tiene que considerar la corriente asimétrica de falla. Esta resulta al multiplicar la corriente simétrica de falla por el factor de decremento mostrado en la ecuación (1.11) [5].

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f}\left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \tag{1.11}$$

Donde:

t_f = Duración de la falla en s

T_a = Constante de tiempo de la componente DC.

$$T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} \times \frac{1}{2\pi f} \tag{1.12}$$

X, R = Componentes de la impedancia subtransitoria de falla que se usan para determinar la relación X/R [5].

1.3.9.2 Voltajes convencionales de seguridad en un SPAT

En un sistema de puesta a tierra la interacción entre una persona y las facilidades puestas a tierra crean situaciones en las que puede ocurrir un shock eléctrico durante una falla como se muestra en la Figura 1.7. A las principales interacciones se las denomina voltajes de paso, de toque y transferido. Estos voltajes convencionales de seguridad representan factores de peligro para las personas [2], por lo que deben ser controlados. El valor de estos voltajes depende mayormente de:

a. El valor de la corriente de falla.

b. El área de la malla de puesta a Tierra.

c. La resistividad del suelo, si es alto o baja en un suelo homogéneo o de varias capas.

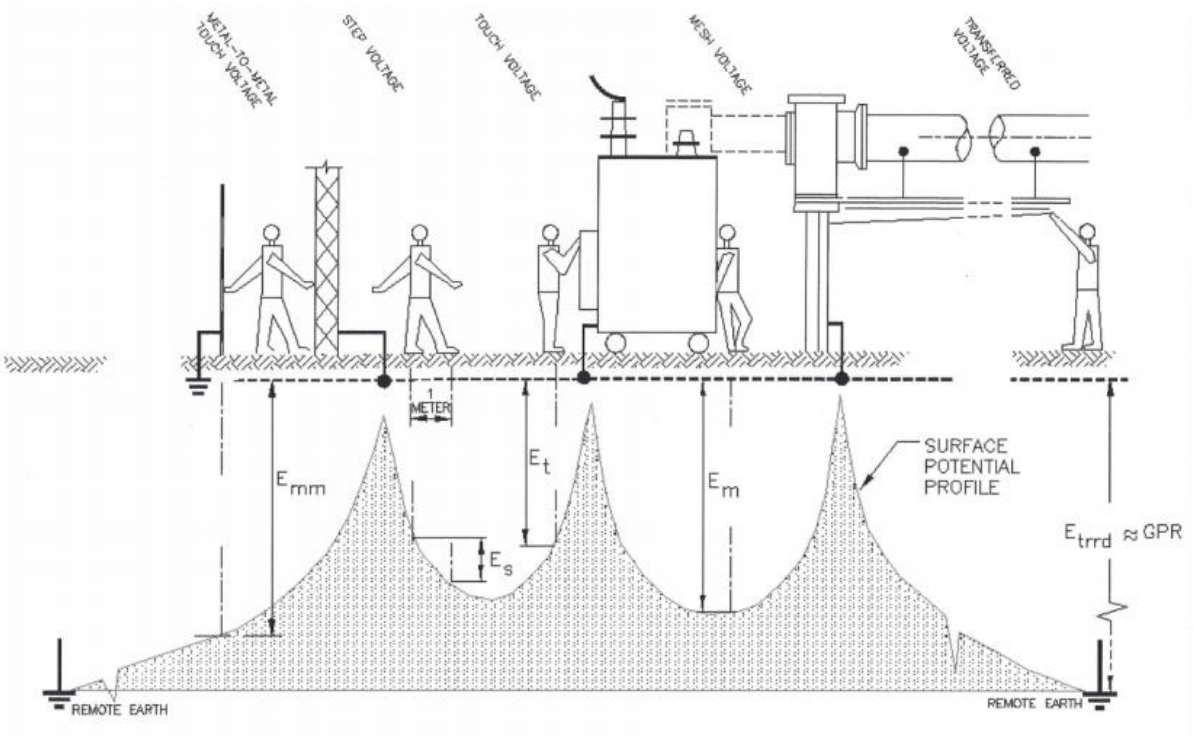


Figura 1.7. Situaciones comunes de shock en facilidades puestas a tierra [2].

a. **Ground potential rise (GPR).** El máximo potencial eléctrico que un electrodo de puesta a tierra puede obtener relativo a un punto de tierra lejano. Este voltaje, GPR, es equivalente a la máxima corriente de la malla multiplicada por la resistencia de la malla [2].

b. **Mesh voltaje (Voltaje de malla).** El máximo voltaje de toque dentro de una malla de puesta a tierra [2].

c. **Step voltage (Voltaje de paso).** Es la diferencia de potencial en la superficie que puede experimentar una persona al hacer puente entre los pies con una distancia de 1 m sin hacer contacto con ningún objeto puesto a tierra [2]. Para una persona con un peso de 50 kg, el límite de voltaje de paso corresponde a las ecuaciones (1.13), (1.14) y (1.15) [2].

$$V_{Paso50} = (100 + 6C_s \times \rho_s)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \tag{1.13}$$

$$k = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \tag{1.14}$$

$$C_s = 1 + \frac{16b}{p_s}\sum_{n=1}^{\propto} K^n R_{m(2nh_s)} \tag{1.15}$$

Donde:

V_{Paso50} = Voltaje de paso para una persona de 50 kg o más en Voltios.

C_s = Factor de reducción de capa superficial. Este debe calcularse en base a IEEE Std 80. Para fines prácticos, se puede hacer referencia a la Figura 1.8.

ρ_s = Resistividad del material en la superficie en Ω-m.

ρ = Resistividad de la tierra debajo de la capa superficial en Ω-m

t_s = Duración de la corriente de exposición en segundos.

b = Radio disco metálico circular que representa el pie en metros.

K = Factor de reflexión entre las diferentes resistividades de materiales.

$R_{m(2nh_s)}$ = Resistencia de tierra mutua entre dos placas coaxiales, similares, en paralelo, separados por una distancia (2nhs), en un medio infinito de la resistividad, ρ_s, en Ω-m

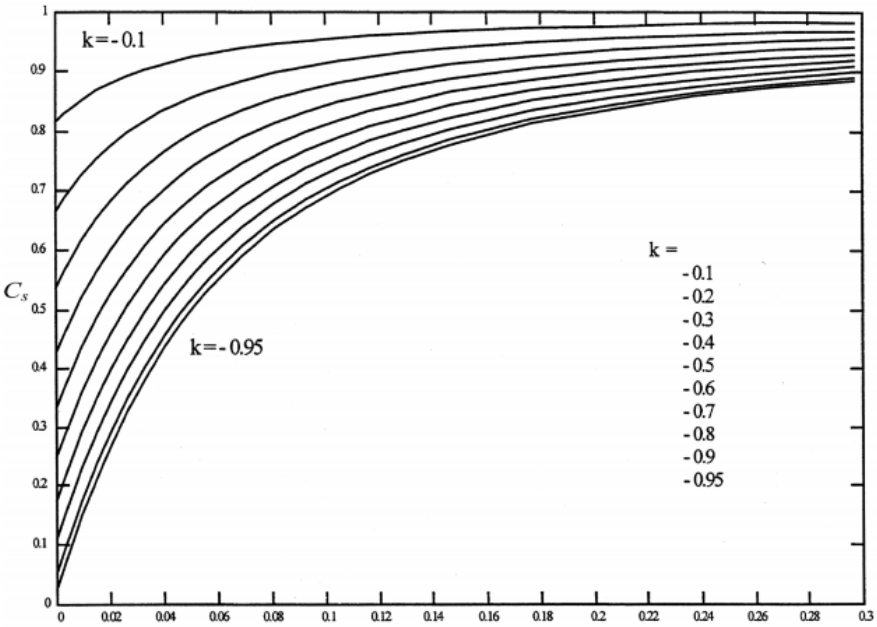


Figura 1.8. Factor de reducción superficial [2]

d. **Touch Voltage (Voltaje de toque).** Es la diferencia de potencial entre el GPR de un sistema de puesta a tierra y el potencial en un punto en la superficie sobre la cual una persona puede estar parada mientras que al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura puesta a tierra. Las mediciones de voltaje de toque pueden ser en “circuito abierto” (cuando no se toma en cuenta la resistencia del cuerpo en el circuito de medición) o “circuito cerrado” (cuando se toma en cuenta la

resistencia del cuerpo en el circuito de medición) [2]. El voltaje de toque se calcula con la ecuación (1.16).

$$V_{toque\ 50} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \tag{1.16}$$

Donde:

$V_{toque\ 50}$ = Voltaje de toque para una persona de 50 kg o más en Voltios.

e. **Transferred Voltage (Voltaje de Transferido).** En un caso especial del voltaje de toque; es un voltaje que se puede generar dentro o fuera de la subestación, desde o hacia un punto remoto externo al sitio del sistema de puesta a tierra [2].

1.3.10 MÉTODOS PARA DETERMINAR DISTRIBUCIONES DE POTENCIAL

La distribución de voltajes en un sistema eléctrico guarda información importante para estudios de ingeniería. Existen dos principales maneras para determinar distribuciones de potencial en regiones: El método de tanque electrolítico y los métodos numéricos [26].

En cuanto a los métodos numéricos, se puede mencionar cuatro principales:

a) Método de simulación de carga

b) Método de simulación de carga de superficie

c) Método de diferencias finitas

d) Método de Elementos Finitos

a) El método de tanque electrolítico

El método de tanque electrolítico consiste en construir un medio electrolítico análogo a un sistema de estudio en el que se pueda medir los potenciales eléctricos directamente. Este método se ha utilizado generalmente con agua de grifo y corriente AC para evitar la polarización del medio [26]. En este método, se utiliza un electrodo o sonda para medir voltajes en el medio y determinar líneas equipotenciales. En estos tanques, por lo general se colocan láminas o mallas en las paredes para representar fronteras equipotenciales. La Figura 1.9 representa un modelo de tanque electrolítico como se presenta en la sección 2.2.

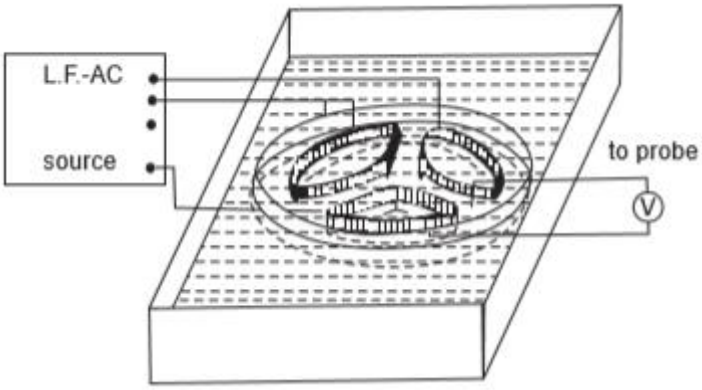


Figura 1.9 Modelo de tanque electrolítico. Tomado de [26]

b) Método de simulación de carga

Este método consiste en distribuir cargas ficticias en la superficie del conductor. Estas cargas pueden tener formas como puntos, líneas, anillos u otras dependiendo de la forma del cuerpo a analizar. El objetivo final es obtener en figuras resumidas el cuerpo de estudio de manera que se pueda analizar en cada elemento. Al final se suman los valores de intensidad de campo según cada una de las distintas geometrías. Este método permite simplificar geometrías curvas al descomponerlas en geometrías más simples. Este documento no se desarrolla el presente método a profundidad porque no es utilizado en el desarrollo del estudio. Más información de este método se describe en [26]

c) Método de simulación de cargas de superficie

Este método es una mejora del método de simulación de cargas en el que se toma en cuenta el efecto superficial del contorno de las cargas. Esto permite obtener mejores resultados de la configuración geométrica en su totalidad. Este documento no se desarrolla el presente método a profundidad porque no es utilizado en el desarrollo del estudio. Más información de este método se describe en [26]

d) Método de diferencias finitas

Este método consiste en dividir la geometría del problema en elementos rectangulares (2d) o hexaédricos (3d). En este método se asumen cargas dentro de cada elemento y su valor de potencial se computa de acuerdo con los potenciales de sus vecinos o según las restricciones de borde. Este método es útil para estudiar geometrías simples de caracterizar en elementos continuos y semejantes. Sin embargo, al trabajar con geometrías irregulares especialmente en 3d, se recomienda el uso del método de elementos finitos. Este documento no se desarrolla el presente método a profundidad porque no es utilizado en el desarrollo del estudio. Más información de este método se describe en [26]

1.3.11 SISTEMAS DISCRETOS

Los sistemas discretos son un conjunto finito de elementos que interactúan entre sí. Un sistema discreto puede aproximarse a un sistema real o a un sistema ideal para fines prácticos de análisis del comportamiento de sus componentes. Un sistema discreto debe tener suficientes elementos y tomar en cuenta los principales fenómenos que gobiernan el comportamiento del sistema real para que se comporte como su par. Cuando un sistema tiene un número infinitamente grande de elementos, se le conoce como sistema continuo y obedece a las leyes de las ecuaciones diferenciales de física como las de transferencia de calor, deformación de cuerpos y las ecuaciones de Maxwell [12].

1.3.11.1 Método de elementos finitos (FEM)

FEM por sus siglas en inglés (Finite Elements Method) es la utilización de un sistema discreto para estudiar un sistema real o un sistema ideal; este permite aproximar campos de variables bajo fenómenos físicos [13]. El método es útil para estudiar sistemas cuya complejidad hace impráctico o imposible su caracterización y solución como un sistema continuo. El método consiste en dividir a los cuerpos de un sistema en una cantidad finita de elementos de manera que al analizar cada uno de ellos se requiera operaciones matemáticas simples de definir y resolver. La Figura 1.10 representa la discretización de una sección hemisférica. Cada elemento está confinado entre nodos y dentro de cada elemento se asumen comportamientos continuos del fenómeno en estudio.

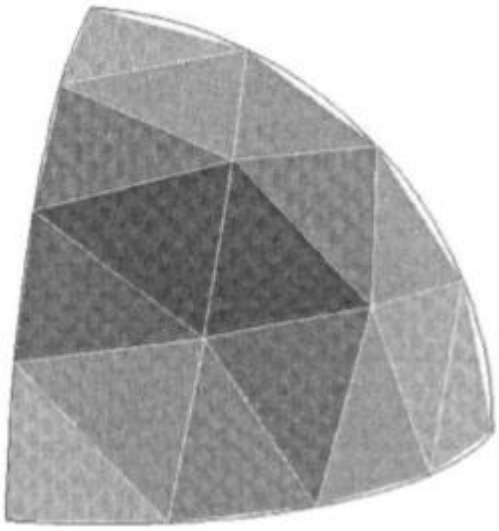


Figura 1.10. Sección hemisférica discretizada en elementos [13].

Una ecuación que rige el comportamiento de un fenómeno físico puede aproximarse en una cantidad finita de operaciones más sencillas; las ecuaciones diferenciales pueden

aproximarse a ecuaciones algébricas al utilizar como base las series de Fourier. Mientras más elementos tenga la aproximación de la serie de Fourier de una ecuación física; más preciso será el resultado. Similarmente, mientras más elementos tenga el modelo discreto, más precisa será la simulación. El manejo de la cantidad bruta de operaciones necesarias para el método de elementos finitos no es práctico para un calculista humano. Las herramientas computacionales de la actualidad permiten realizar los cálculos necesarios para estudiar fenómenos mediante el método de elementos finitos [12].

1.3.11.2 Secuencia general del FEM

La solución analítica de un sistema con geometría compleja tiene alta dificultad. Adicionalmente, las cargas y condiciones de borde del sistema a estudiar también pueden alcanzar alta complejidad. El FEM considera cuatro pasos para la modelación de sistemas en los que se puede programar de manera ordenada las características y condiciones a las que rigen el sistema a estudiar [13].

a. Modelación de la geometría.

b. Mesheado (discretización).

c. Especificación de las propiedades de los materiales.

d. Especificaciones de condiciones de borde y cargas.

a. Modelación de la geometría

Las estructuras reales son muy complejas y deben ser reducidas a geometrías que puedan ser procesadas en software de simulación. Estas geometrías se pueden construir como gráficos digitales en diferentes paquetes de software de Diseño Asistido por Computador, CAD por sus siglas en inglés (Computer Aided Design). Estas geometrías por lo general pueden ser leídas por programas de modelado y simulación. Es importante verificar la compatibilidad entre el software CAD y el de Simulación; de que se requiera que las geometrías se modifiquen o simplifiquen antes de que se puedan simular [13].

Los detalles finos constituyen generalmente un rol estético que solo dificultan la simulación. Se recomienda ignorar, suprimir o simplificar detalles que no aportan a la simulación. Un ejemplo es simplificar un cable por una línea y analizarlo en una sola dimensión o simplificar una placa por una superficie plana y analizarla en dos dimensiones. Se requiere experiencia y buen juicio de ingeniería para optimizar el diseño de la geometría de un

sistema. La Figura 1.11 muestra varias geometrías creadas en paquetes CAD; los diseñadores simplifican la geometría para hacer posible las simulaciones.

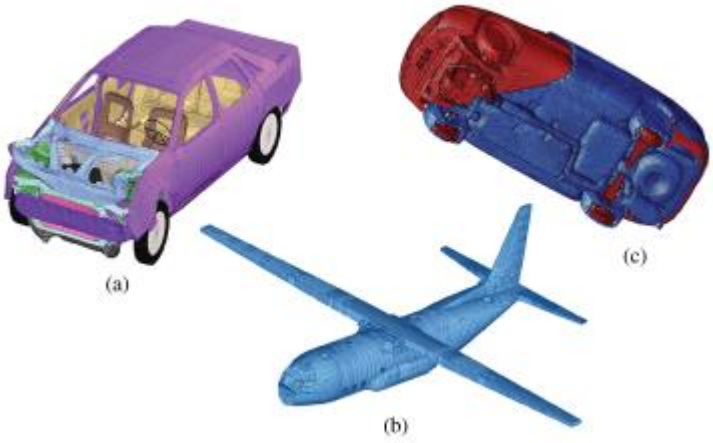


Figura 1.11. Varias geometrías creadas en paquetes CAD [14]

b. Mesheado (discretización)

Este paso convierte una geometría en un conjunto finito de piezas conocidas como elementos. Dentro de cada elemento, se analiza el fenómeno y luego su interacción con los nodos circundantes. La solución del conjunto total de nodos es la solución del problema entero.

La conformación de un mesheado a partir de una geometría es clave para la simulación. Mientras más elementos tenga un mesh, más se aproxima al modelo real. Por otro lado, un mayor número de elementos implica un mayor esfuerzo computacional que no siempre mejora significativamente los resultados de la simulación. La mayoría de los paquetes de mesheado permiten un proceso semi automático en que el diseñador especifica generalidades del proceso y el software genera los elementos. Se requiere experiencia y criterio para detallar los parámetros con los cuales se realiza el mesheado de una geometría. Entre los parámetros que el diseñador debe optimizar se tiene el tamaño de los elementos, las zonas que deben refinarse y el tipo de elementos que se generarán. Los tipos de elementos pueden ser triangulares o cuadrados. Los elementos triangulares son más versátiles y fáciles de generar mientras que los elementos cuadrados producen resultados más precisos. La Figura 1.12 muestra una geometría bidimensional y su respectivo mesh mediante elementos triangulares; se muestra también la misma placa

luego de refinar el mesh. La Figura 1.13 muestra una geometría tridimensional generada con elementos cuadrados.

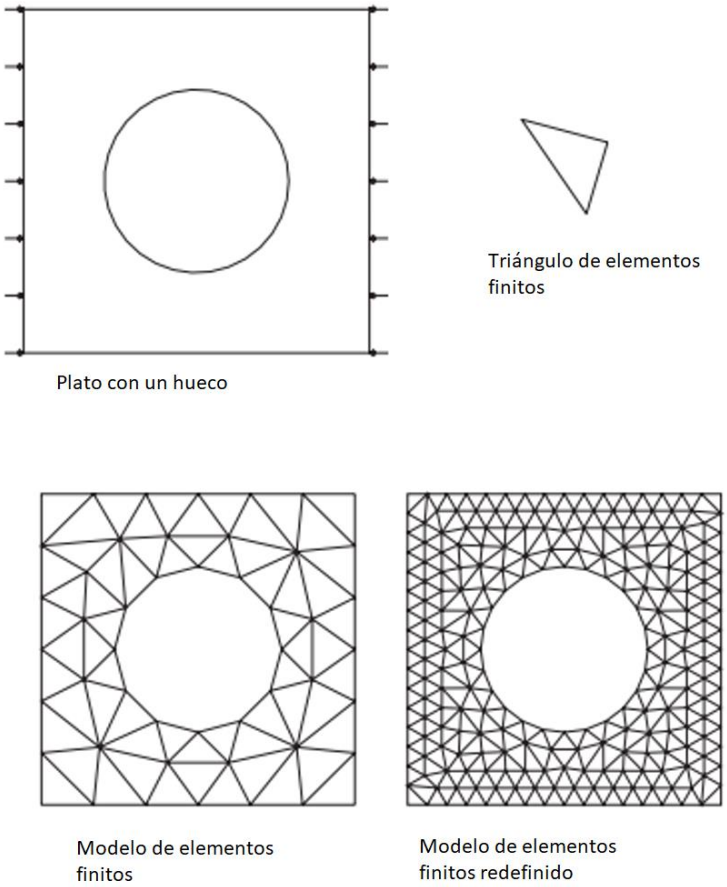


Figura 1.12. Mesheado y refinación de geometría bidimensional [14].

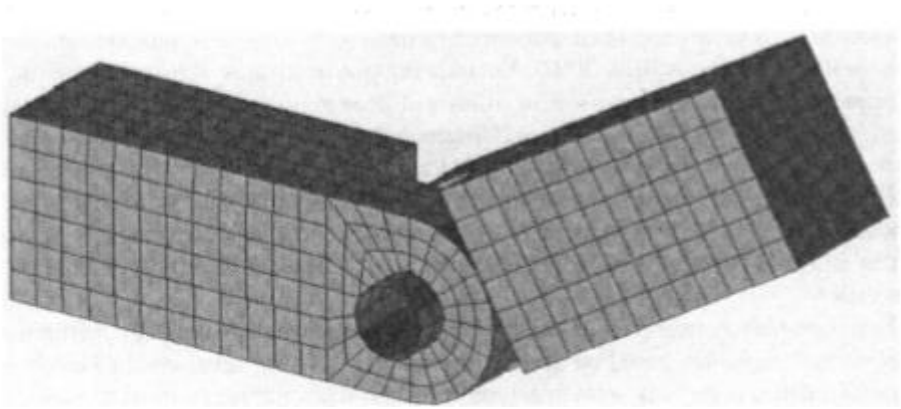


Figura 1.13. Mesheado de geometría tridimensional [13].

c. Especificación de las propiedades de los materiales

Cuerpos y fluidos se comportan de manera distinta según su composición. En mecánica, prima la densidad y las propiedades elásticas. En comportamiento térmico, cada material

se comporta según el coeficiente de conductividad térmica. En eléctrica, uno de los principales factores es la conductividad eléctrica. Para el FEM, es importante definir los materiales de cada región para que la simulación pueda analizar el comportamiento del sistema. La mayoría de los paquetes de simulación contienen bases de datos ya programadas para los materiales más comunes. Se debe determinar mediante experimentos las propiedades de materiales que no se encuentren disponibles [13].

d. Especificación de condiciones de borde y cargas

Las condiciones de borde y cargas permiten al software de simulación establecer restricciones en ciertas regiones. Estas restricciones rigen el comportamiento de los elementos involucrados mientras que el software de simulación computa el comportamiento de los demás nodos en función de sus adyacentes. En simulaciones en las que el transcurso del tiempo es un factor importante, también se deben especificar las condiciones iniciales de todos los cuerpos. Una simulación no se realizará correctamente si las condiciones de borde y cargas son insuficientes, demasiadas o contradictorias. Se requiere entender claramente el fenómeno, el sistema y su interacción con el medio circundante para programar adecuadamente las condiciones de borde y cargas. Las especificaciones de borde pueden ser: desplazamiento 0, una temperatura fija, o una conexión a tierra. Cargas pueden ser: fuerzas, radiación energética o la inyección de una corriente eléctrica. La Figura 1.14 muestra sistemas discretos con condiciones de borde y cargas definidas; se puede notar adicionalmente que los sistemas son análogos según estudios mecánicos, termales y eléctricos.

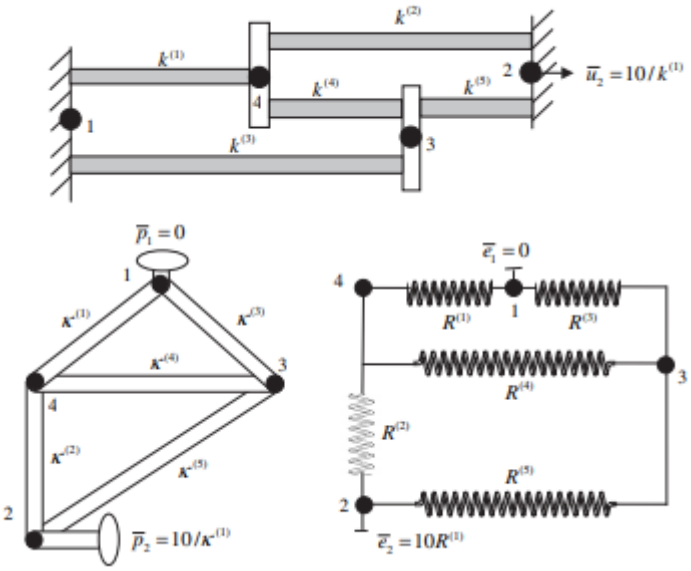


Figura 1.14. Condiciones de borde y cargas aplicados a sistemas discretos [14].

1.3.12 MODELAMIENTO DE UNA MALLA DE PUESTA A TIERRA

En un sistema de Puesta a Tierra, cuando la malla se encuentra igualmente espaciada, el voltaje de la malla se incrementará a lo largo de las cuadrículas desde el centro hasta las esquinas de la malla. Este incremento de voltaje depende del tamaño, espaciamiento de los conductores paralelos, del diámetro y profundidad de los conductores. Todas estas son condiciones variadas y particulares.

El propósito de modelar una malla de puesta a tierra es conocer los gradientes de potencial de tierra a niveles de voltaje y corriente, de manera que los limita para evitar poner en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla [5]. El método de cálculo tradicional del sistema de puesta a tierra utiliza enfoques analíticos en el que el suelo se considera como medio uniforme y los electrodos se consideran como simétricos. Si la proximidad uniforme del suelo no es óptima y los electrodos contienen irregularidades, dichos métodos pueden dar como resultado un sistema de puesta a tierra inseguro o mal diseñado.

El FEM, se ha utilizado como un excelente método numérico para calcular el sistema de puesta a tierra [5]. Con fines prácticos, es apropiado delimitar la región de estudio con conductores perfectos que sirven como fronteras, las cuales tienen potenciales constantes y equivalen a una tierra remota. Esto convierte a la determinación del campo y el potencial eléctrico o densidad de carga en las superficies que forman la frontera [15].

1.3.13 ECUACIONES GOBERNANTES

Como se mencionó en 1.3.11.1, el FEM consiste en aproximar el comportamiento de cada elemento bajo la influencia de un fenómeno físico. La ciencia ha logrado describir muchos de los fenómenos físicos en simples ecuaciones diferenciales como se muestra en la Figura 1.15. Entre estas se puede mencionar: deformaciones elásticas, movimiento de fluidos viscosos, conducción térmica, difusión de calor, vibraciones y conducción eléctrica. A estas ecuaciones que dictaminan el comportamiento de los fenómenos se las llama ecuaciones gobernantes. Estas, a pesar de su simplicidad en forma diferencial, presentan un grado de dificultad ya que dependen de la geometría del dominio, de las restricciones de las fronteras y de las condiciones iniciales del sistema [14], [16], [17]. La solución mediante FEM de las ecuaciones gobernantes es reconocer los operadores diferenciales como factores lineales conjugados con una matriz que representa las interacciones entre nodos llamada matriz de rigidez.

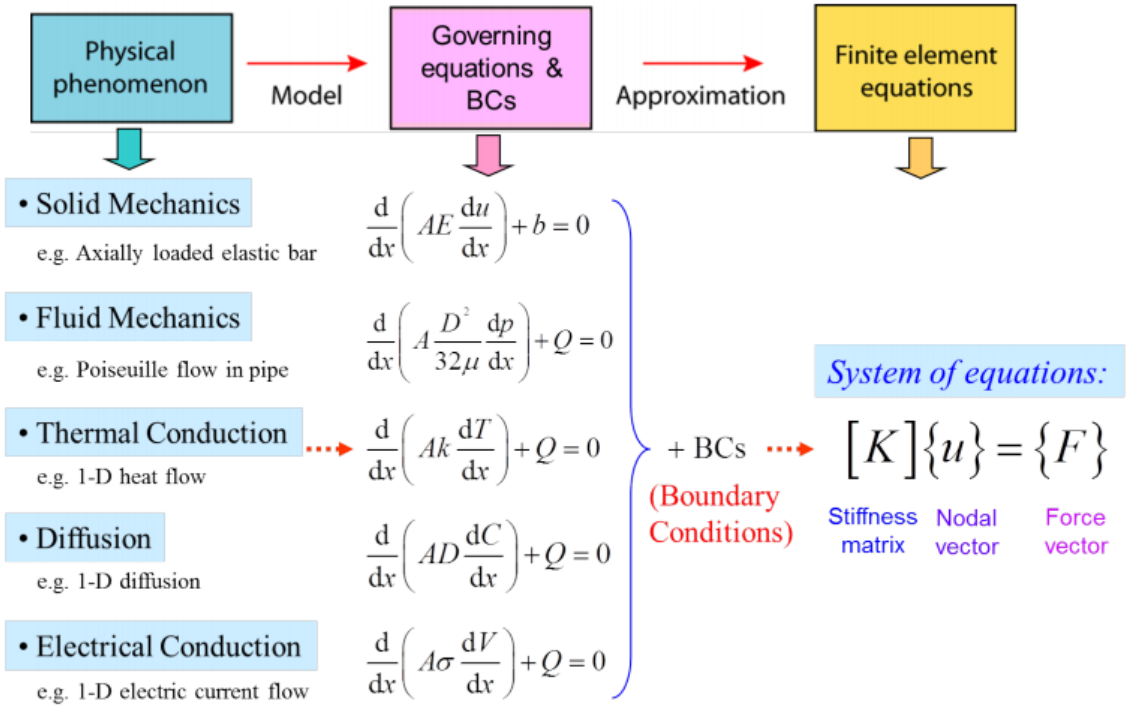


Figura 1.15. Ecuaciones gobernantes de distintos fenómenos físicos [17].

1.3.14 SOLUCIÓN DE SISTEMAS MEDIANTE FEM Y MATRIZ DE RIGIDEZ

Como se ha mencionado en secciones anteriores, el FEM consiste en la aproximación de ecuaciones diferenciales para cada elemento en el dominio de estudio. Considere el elemento simple *e* limitado por sus fronteras *i* y *j* de la Figura 1.16 [16]. En este elemento las cargas F y μ interactúan con la propiedad k de manera lineal según las ecuaciones (1.17), (1.18), (1.19) y (1.20).

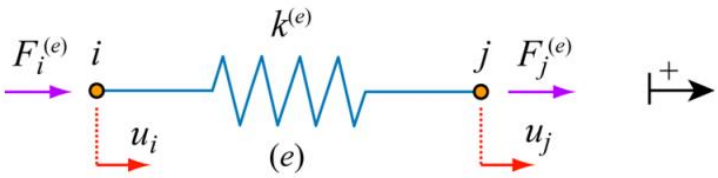


Figura 1.16. Evaluación en un elemento [17].

$$k^{(e)}u_i - k^{(e)}u_j = F_i^{(e)} \tag{1.17}$$

$$-k^{(e)}u_i + k^{(e)}u_j = F_j^{(e)} \tag{1.18}$$

La cual se puede expresar en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} k^{(e)} & -k^{(e)} \\ -k^{(e)} & k^{(e)} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_i^{(e)} \\ F_j^{(e)} \end{Bmatrix} \tag{1.19}$$

$$[K^{(e)}]\{U^{(e)}\} = \{F^{(e)}\} \tag{1.20}$$

Donde:

$[K^{(e)}]$ = Matriz de rigidez.

$\{U^{(e)}\}$ = Vector de fuerzas.

Este método fue originalmente considerado para problemas de deformación elástica y fuerzas, de ahí los nombres convencionales. Al tener una cantidad finita de elementos y nodos que interactúan entre sí, cualquier sistema discreto se puede analizar en función de las propiedades internas de cada nodo k y de las condiciones de borde conocidas. Este concepto se ilustra en la Figura 1.18 [16]. Cabe recalcar que U puede referirse a operaciones diferenciales que más adelante serán aproximadas acordemente

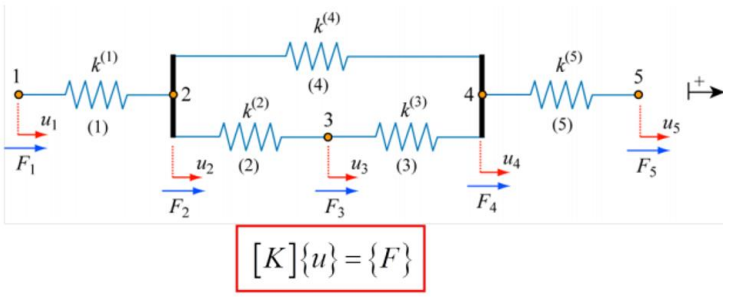


Figura 1.17. Sistema de cantidad finita de elementos y nodos interactuando [17].

$$\begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{array}
\begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{array} \\
\begin{bmatrix} k^{(1)} & -k^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ -k^{(1)} & k^{(1)}+k^{(2)}+k^{(4)} & -k^{(2)} & -k^{(4)} & 0 \\ 0 & -k^{(2)} & k^{(2)}+k^{(3)} & -k^{(3)} & 0 \\ 0 & -k^{(4)} & -k^{(3)} & k^{(3)}+k^{(4)}+k^{(5)} & -k^{(5)} \\ 0 & 0 & 0 & -k^{(5)} & k^{(5)} \end{bmatrix} \end{array}
\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \end{Bmatrix}$$

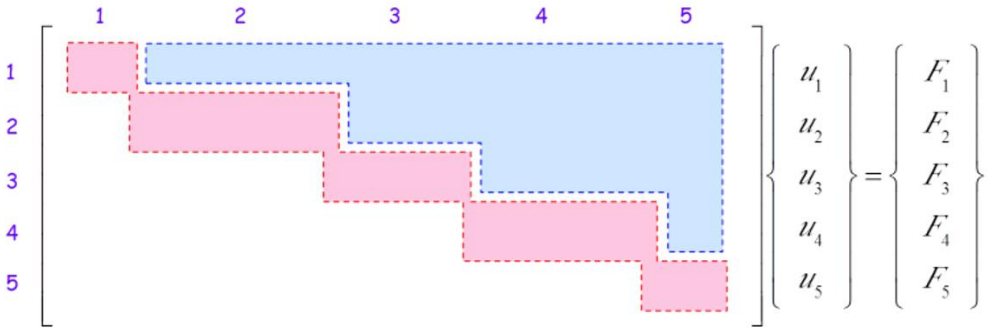


Figura 1.18. Matriz de rigidez para varios nodos [17].

1.3.15 ECUACIONES DE MAXWELL EN FEM

Las ecuaciones gobernantes para sistemas eléctricos en FEM son las ecuaciones de Maxwell. Estas se evalúan en cada elemento durante una simulación. El programa busca soluciones a partir de:

La ley de Gauss

Esta ley indica que el flujo eléctrico a través de la superficie de cada elemento es proporcional a la carga eléctrica dentro de tal elemento ecuación (1.21) [18]. Esto significa que la suma de flujo eléctrico de cada superficie de cada elemento debe obedecer a la carga en su interior. En FEM, esto implica que el software analizará cada elemento. Comparará la carga de cada unidad volumétrica con sus vecinas y dependiendo del área que los separa, y la diferencia de cargas, estimará el flujo eléctrico.

$$\oint_{s} \vec{E} \cdot \hat{n}\, da = \frac{q_{enc}}{\varepsilon_0} \tag{1.21}$$

Donde:

$\oint$ = Indica la integral de una superficie cerrada.

$\vec{E}$ = Indica al Vector del campo eléctrico.

s = Integral de superficie (no es una integral de volumen o línea)

$\cdot$ = El producto punto de $\vec{E}$ con $\hat{n}$.

$\hat{n}$ = Vector unitario normal a la superficie.

da = Incremento del área de superficie en metros cuadrados.

ε_0 = Permitividad eléctrica.

q = Cantidad de carga en culombios.

enc = Permitividad eléctrica del espacio libre.

La ley de Faraday

Indica que un flujo eléctrico a lo largo de un camino cerrado es proporcional a la variación de un campo magnético ecuación (1.22) [18]. Esto significa que, al circular por un campo eléctrico en un circuito cerrado, se manifestará un campo magnético. En FEM, esto implica que el software analizará las aristas de todas las superficies de todos los elementos y

determinará según la magnitud de estas cuánto flujo magnético se genera. Al flujo magnético lo relacionará con el campo eléctrico de los elementos involucrados.

$$\oint_C \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} = -\frac{d}{dt}\int_s \vec{B} \cdot \hat{n} da \tag{1.22}$$

Donde:

$\oint$ = Indica la sumatoria de las contribuciones de cada porción del camino cerrado C, en la dirección dada por la regla de la mano derecha.

C = Línea integral (no es una superficie o un volumen integral).

$\vec{E}$ = Campo eléctrico en V/m.

$\cdot$ = Producto punto entre $\vec{E}$ y la paralela de dl (a lo largo de la ruta C)

$\overrightarrow{dl}$ = Segmento incremental de la ruta C.

dt = Derivada con respecto al tiempo.

$\int_s \vec{B} \cdot \hat{n} da$ = Flujo magnético a través de cualquier superficie delimitada por C.

La ley de Ampere-Maxwell

Indica que una corriente eléctrica o una variación temporal del flujo eléctrico a través de una superficie produce un campo magnético circulando alrededor de cualquier trayectoria que encierre la superficie ecuación (1.23) [18]. Esto significa que, al circular por un campo eléctrico en un circuito cerrado, se manifestará un campo magnético. En FEM, esto implica que el software analizará las aristas de todas las superficies de todos los elementos y determinará según la magnitud de las superficies encerradas cuánta corriente eléctrica circula y cuánto varía el flujo eléctrico para determinar el campo magnético generado.

$$\oint \vec{B} \cdot \overrightarrow{dl} = \mu_0 \left(I_{enc} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\int_s \vec{E} \cdot \hat{n} da \right) \tag{1.23}$$

Donde:

$\oint$ = Indica la sumatoria de las contribuciones de cada porción del camino cerrado C, en la dirección dada por la regla de la mano derecha.

$\vec{B}$ = Campo magnético es teslas.

$\vec{E}$ = Campo eléctrico en V/m.

$\cdot$ = Producto punto entre $\vec{E}$ y la paralela de dl (a lo largo de la ruta C)

$\overrightarrow{dl}$ = Segmento incremental de la ruta C.

dt = Derivada con respecto al tiempo.

$\int_s \vec{B} \cdot \hat{n} da$ = Flujo magnético a través de cualquier superficie delimitada por C

ε_0 = Permitividad eléctrica.

I_{enc} = Corriente eléctrica en A.

Alternativa a Ecuaciones de Maxwell como Ecuaciones Gobernantes

Una alternativa al uso de las ecuaciones de Maxwell como ecuaciones gobernantes es el uso del método variacional. Este consiste en establecer un algoritmo para establecer los potenciales de cada elemento con el fin de minimizar la energía dentro de cada elemento y dentro del sistema total. En general el método consiste en evaluar la energía de interacción de los campos electromagnéticos debido a las cargas almacenadas en el volumen de cada elemento y su interacción con los otros elementos. Este documento no desarrolla el presente método a profundidad porque no es utilizado en el software de EF ANSYS. Más información de este método se describe en [25].

1.3.16 SOLUCIÓN NUMÉRICA DE ECUACIONES DIFERENCIALES

En la sección 1.3.15 se determinó que los sistemas eléctricos dependen de ecuaciones gobernantes. También se determinó que la solución a dichos sistemas consiste en una cantidad finita de cálculos para cada elemento y/o cara y/o arista y/o nodo. Sin embargo, las operaciones obtenidas de la interpretación de las ecuaciones gobernantes muchas veces son de orden diferencial y su solución requiere un poco más de trabajo.

La solución analítica de ecuaciones diferencias es algo complicado de codificar en un software, tanto porque dependen de las condiciones de borde, como porque algunas ni siquiera tienen integrales definidas. La solución numérica de ecuaciones diferenciales presenta una herramienta que permite aproximar los resultados de una ecuación diferencial a cantidades que permiten estudiar los fenómenos simulados. Se utilizan varios métodos para lograr este objetivo, tanto en una como en varias dimensiones, el más sobresaliente es el método de Euler.

Este método permite evaluar ecuaciones diferenciales sin necesidad de integrar. Para ilustrar el método, considere la definición de derivada en la ecuación (1.24) en la que $y(t)$

es una función conocida y derivable de la variable independiente que puede ser definida y evaluada en t_i y es desconocida en t_{i+1}. Considere también intervalos en la variable independiente donde la diferencia entre ambos valores es pequeña $t_{i+1} - t_i = h \approx 0$; Dado que un computador puede evaluar $y(t_i)$, $\frac{dy}{dt}(t_i)$, se obtiene la aproximación de $y(t_{i+1})$ (1.25) y (1.26) [19]–[21] .

$$\frac{dy}{dt}(t) = \lim_{h \to 0} \frac{y(t+h) - y(t)}{h} \tag{1.24}$$

$$\frac{dy}{dt}(t_i) \approx \frac{\Delta y}{\Delta t}(t_i) = \frac{y(t_{i+1}) - y(t)}{h} \tag{1.25}$$

$$y(t_{i+1}) = y(t_i) + h \times \frac{dy}{dt}(t_i) \tag{1.26}$$

De manera similar, se puede evaluar ecuaciones de distintos órdenes y en varias variables. Otros métodos aumentan la precisión y son más estables.

1.3.17 CONDICIONES DE FRONTERA EN EL INFINITO

La aplicación del FEM requiere de condiciones de frontera, debido a la necesidad para resolver problemas electrostáticos en regiones cerradas. Por otro lado, existen otros problemas que no tienen una frontera natural definida. De este modo el FEM simula y aproxima la solución para una frontera en el infinito [15].

El truncamiento de las fronteras externas radica en seleccionar una frontera lo suficientemente lejana al área de interés considerando que el potencial $V = 0$ y $\frac{\delta V}{\delta n} = 0$; en esta frontera. La distancia desde el centro del problema hasta la frontera deber ser al menos cinco veces la distancia desde el centro hasta los objetos de interés más externos [15]. En la Figura 1.19 se tiene las condiciones de frontera (borde) para una malla de puesta a tierra que cumple con lo anteriormente dicho.

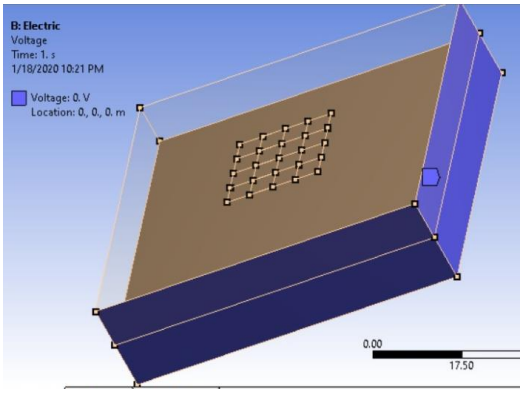


Figura 1.19. Condiciones de Frontera en una malla de puesta a tierra usando el software ANSYS.

1.3.17.1 Propiedades que deben tener los mesheados

En la actualidad, la generación de mesheados es un problema computacional y científico. Un mesheado se forma con un conjunto de puntos formando intersecciones de las líneas de un sistema de coordenadas. La principal particularidad de un sistema como el mencionado es que alguna línea coordenada sea coincidente con cada segmento de la frontera de la región física [14].

Las intersecciones de líneas coordenadas para definir los puntos del mesheado proveen una estructura organizacional que facilita que todos los cálculos sean elaborados en un volumen fijo. Para esto se necesita que las ecuaciones diferenciales se resuelvan en volúmenes definidos. De esta manera las coordenadas curvilíneas deben ser reemplazadas por coordenadas cartesianas como variables independientes [14]. En general, los mesheados deben tener las siguientes consideraciones.

a. Tipo geométrico:

- La densidad de los elementos en algunas regiones del mesh debe ser más alta dependiendo de la complejidad del estudio [14].
- En mesheados que estén formados por elementos con geometrías triangulares, se recomienda evitar ángulos obtusos [14].
- Los elementos que conforman los mesheados deben ser suficientemente rectangulares [14].

b. Tipo Físico:

- En las simulaciones de los elementos hay presencia de cambios físicos que condicionan la geometría de los elementos: anisotropía, formas de los elementos impuestos [14].

1.3.17.2 ANSYS

ANSYS es un software de simulación multisistemas enfocado a al desarrollo mediante la predicción del comportamiento de diseños en el mundo real. Este se enfoca en unificar capacidades de simulación de distintos fenómenos físicos en una sola plataforma. Esto ayuda a encontrar soluciones a problemas de ingeniería a través de le teoría de los elementos finitos para estructuras y de los volúmenes finitos para cualquier tipo de fluidos así como de interacciones en transferencia de calor, estructuras y sistemas electromagnéticos [22]. ANSYS es actualmente uno de los softwares líderes en simulación

de fenómenos físicos y uno de los primeros en integrar paquetes y librerías de electricidad y electromagnetismo a parte de los más comunes que son comportamiento de materiales y termodinámica.

1.3.18 EVALUACIÓN DE ERRORES PARA VALIDACIÓN DE MODELOS

Para validar la similitud entre modelos y sistemas físicos, se requiere seleccionar parámetros de comparación. Los parámetros de comparación permiten cuantificar el error entre las mediciones obtenidas en el modelo y las obtenidas en el sistema real [23]. Los parámetros más utilizados para validación de modelos son RMSE, MAE, MAPE y error porcentual.

a. Raíz del Error Cuadrático Medio. (RMSE)

Este parámetro resalta las diferencias más pronunciadas mientras entre los datos estimados y los valores reales. Mide el valor medio cuadrático del error. Este es un parámetro dimensional. Se presenta en la ecuación (1.26) [23].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \widehat{y_1})^2} \tag{1.26}$$

b. Error Medio Absoluto (MAE)

Este parámetro mide la magnitud promedio de la diferencia entre los datos estimados en el modelo y los datos del sistema real. Este es un parámetro dimensional. Como indica en la ecuación (1.27) [23].

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \widehat{y_1}| \tag{1.27}$$

c. Error Medio Absoluto Porcentual (MAPE)

Este parámetro mide porcentualmente el promedio de las diferencias entre los datos estimados en el modelo y los datos del sistema real analizados en la escala de los datos estimados. Su valor mínimo es cero, significa que las estimaciones y los datos medidos son iguales en todo el conjunto de datos. Este es un parámetro adimensional. Como presenta la ecuación (1.28) [23].

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}|(y_i - \widehat{y_l})/y_i\ | \tag{1.28}$$

d. Error Medio Relativo

Este mide la desviación relativa entre las estimaciones y los datos observados. En este, se divide el error medio para cada dato, lo cual lo hace independiente de la escala de los

valores estudiados. Puede expresarse como un número adimensional o como un porcentual [24].

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{\widehat{y_i} - y_i}{y_i} \tag{1.29}$$

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se exponen los pasos que se siguieron para la ejecución de este proyecto, respondiendo a preguntas entre las cuales están: cómo se realizó y qué se necesitó. Esencialmente se divide en tres vitales etapas que fueron desarrolladas a lo largo de este trabajo.

La primera etapa comprende el diseño e implementación metodológica, donde se definen los diferentes parámetros de ejecución; tanto en la implementación del modelo a escala, como en los parámetros para la implementación en el software de simulación.

La segunda etapa contempla la implementación de un modelo a escala, en el cual mediante el uso de una cuba electrolítica se sumerge una malla de puesta a tierra a escala; sometiéndola a la inyección de una corriente determinada, en un lugar determinado y constante durante toda la prueba; para que con una posterior toma de los resultados se pueda comparar con el modelo computacional desarrollado.

En la tercera y última etapa, se plantea una generalización del modelo tratado; con este se simularán diferentes modelos geométricos de mallas de puesta a tierra tales como triangulares, cuadradas y circulares; los cuáles serán sometidos a distintos escenarios de simulación, a distintos materiales, varias capas de suelo, diferentes valores de corriente, y también lugar de inyección de la corriente; permitiendo de esta manera conocer ciertos parámetros útiles al analizar los sistemas de puesta a tierra.

Este estudio permitirá conocer la distribución del potencial eléctrico en una malla de puesta a tierra en un suelo compuesto por varias capas; con el objetivo de comprender de mejor manera cómo influyen las variables en el desempeño de una malla de puesta a tierra, en el voltaje de paso, en el voltaje de toque y también en la elevación de potencial de tierra o GPR. Para lograr este proceso los modelos geométricos de las mallas de puesta a tierra serán elaborados en el software de diseño de tres dimensiones AutoCAD, la implementación metodológica será llevada a cabo en el software de simulación ANSYS.

La Figura 2.1 describe las etapas en las cuales se dividió el proceso, modelo inicial, validación del modelo y una generalización.

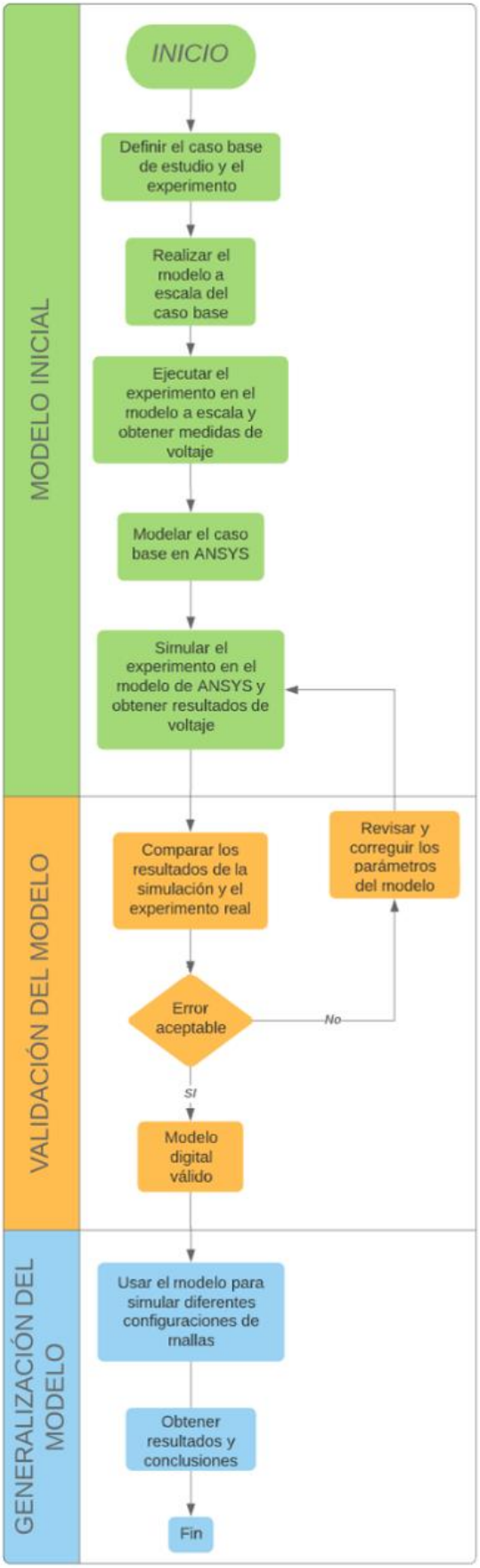


Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso a seguir durante el proyecto

2.1. MÉTODO EMPLEADO EN EL EXPERIMENTO

A grandes rasgos el método empleado en el desarrollo de este experimento estuvo contemplado por varias etapas, divididas principalmente por el software de simulación o diseño que se empleó.

Es necesario definir las características del sistema de puesta a tierra; donde estos valores son el punto de partida para la construcción de la malla. Definiendo valores como el calibre del conductor, vanos entre conductores, dimensiones de la malla.

Luego de determinar las características físicas de la malla, se procede a diseñarla, para lo cual se puede utilizar diferentes métodos para su elaboración. El método desarrollado en proyecto para construir la malla, y el medio. Es dibujar la geometría de la malla y la cuba electrolítica en el software AutoCAD, partiendo de las dimensiones y valores previamente definidos en la etapa inicial. Es posible también optar por otros caminos para realizar la construcción de la geometría, utilizando la propia sección de construcción de ANSYS, u otros programas como lo son SolidWorks o Step.

Para proceder con la simulación es necesario unificar las partes previas, y asignan los valores definidos en la etapa inicial al modelo geométrico. En ANSYS se procede a cargar la geometría que, en este método, se la construye en un programa externo. Una vez cargada, se procede a determinar las características de cada uno de los materiales. Por ejemplo, en el caso de la malla de puesta a tierra se asigna el valor de resistividad del cobre o del aluminio; en el caso de las capas de suelo se define su valor de resistividad por cada una de las capas.

Una vez que se asignan las características isotrópicas a los materiales, se procede a determinar las características del mallado para proceder con la simulación. En esta sección es posible determinar por el usuario el número máximo de elementos a analizar tales como los nodos y elementos, el tipo de transición, calidad del redondeo.

Se determinan las características de conducción de estado estable, donde se puede asignar valores de corriente o voltaje para realizar las pruebas determinando de acuerdo con las necesidades del usuario el punto, vértice, superficie o volumen donde se aplicará el valor de corriente. Finalmente, se obtiene los valores del campo eléctrico a lo largo del cuerpo de simulación. En Matlab se importan los resultados de ANSYS para poder analizarlos. Los datos obtenidos del programa son tratados para obtener los indicadores a analizar como lo son el voltaje de paso, voltaje de toque, y GPR en función de la geometría de la malla de puesta a tierra. En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de flujo del método utilizado en el proyecto:

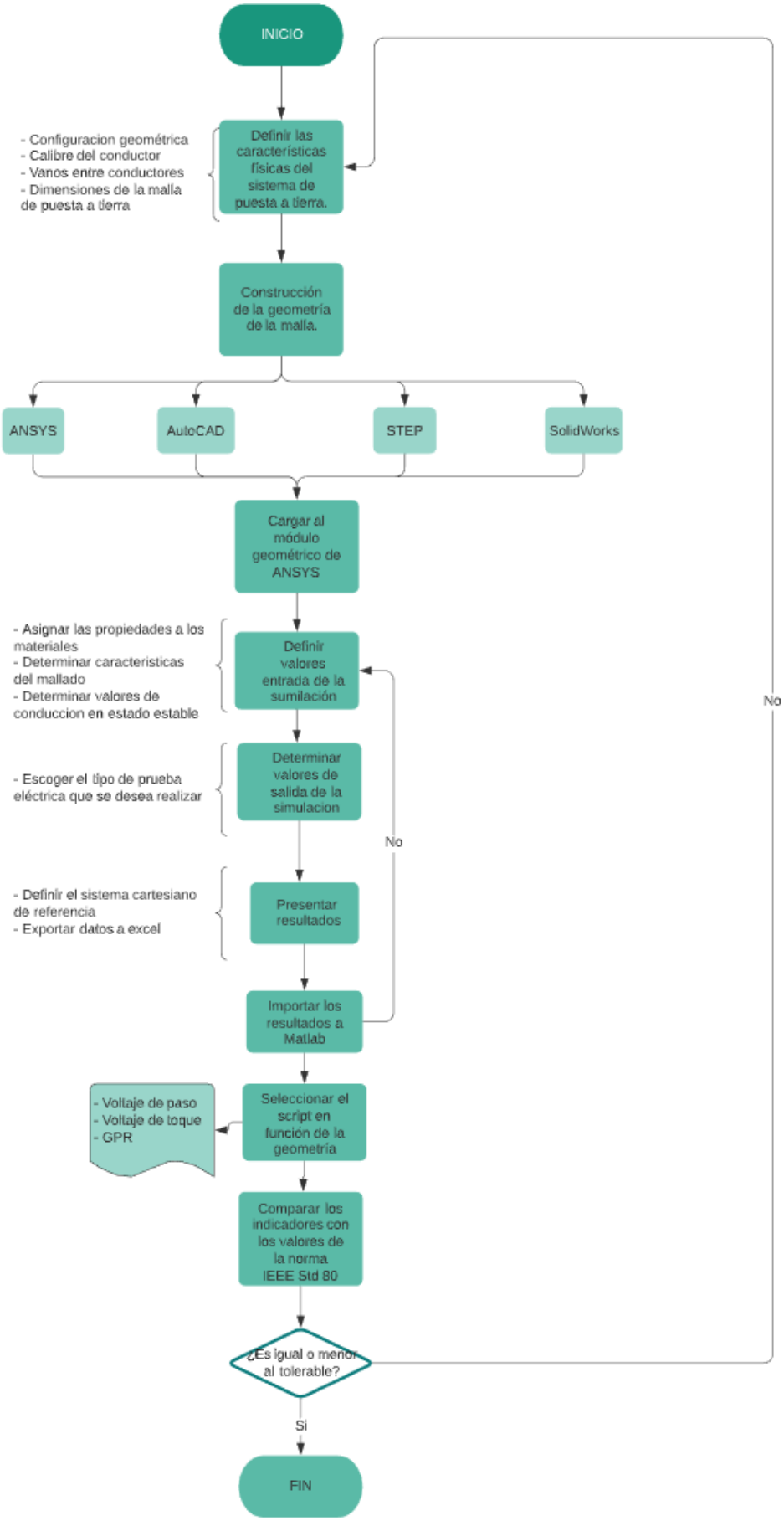


Figura 2.2. Diagrama de flujo del método utilizado para simular una malla de puesta a tierra mediante ANSYS, AutoCAD, y Matlab

2.2. DEFINICIÓN DEL EXPERIMENTO PARA VALIDAR EL MODELO

Para validar el modelo se define un experimento que consiste en un caso a escala de una malla de puesta a tierra cuadrada de 0.9 m x 0.9 m con vanos de 4.5 cm; sumergida en una cuba electrolítica que simulará el suelo y que se inyectará una corriente por una de sus esquinas. Una alternativa a las mediciones en redes de tamaño real y cálculos numéricos es reducir la malla de tamaño real por un factor de escala. Al aplicar este factor se reduce incluso el conductor y profundidad a la que la malla que está enterrada. El patrón de flujo de corriente y la forma en que se presentan los equipotenciales de voltaje se mantiene inalterados [24].

Las restricciones de los parámetros físicos de la malla de puesta a tierra generalmente se limitan a dos características principalmente: físicas y económicas. Para el diseño del caso base de este proyecto, específicamente de su geometría, se encontró que las limitantes fueron el área de la malla de puesta tierra, el área del suelo, las características del suelo, la corriente a inyectar, los espaciamientos entre conductores, el calibre del conductor, y determinar la profundidad a la cual iba a estar sumergida la malla.

Para establecer el tamaño del tanque electrolítico se lo hizo por medio de un estudio determinado en [24]. En donde al aplicar un voltaje a un electrodo hemisférico, que es la caracterización más simple de un electrodo donde su configuración geométrica posee la forma de una semiesfera, como se observa en Figura 2.3. La corriente fluye radialmente y los voltajes disminuyen gradualmente mientras se aleja del electrodo [24]. En lugar de la red, en la superficie de una tierra semi infinita y de radio R_1 se observa que la distribución de los equipotenciales será hemisférica. Un segundo electrodo de radio R_2 no cambiará los equipotenciales, tal como se ilustra en la Figura 2.3.

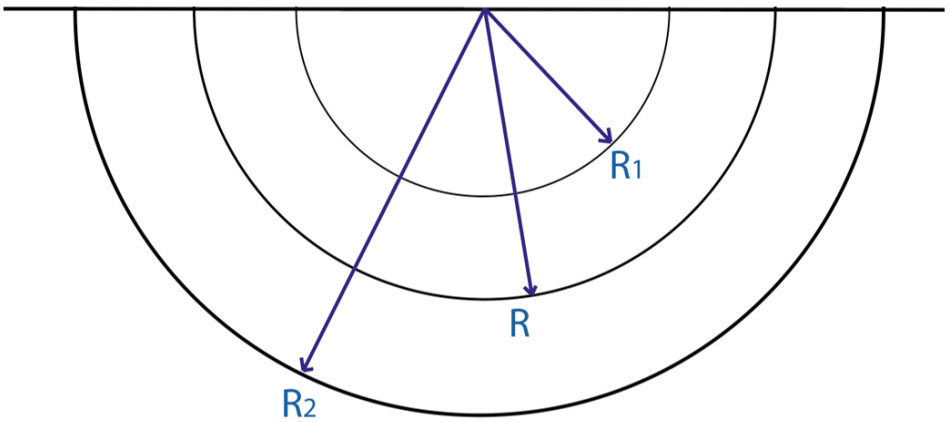


Figura 2.3. Distribución de los equipotenciales de voltaje en un electrodo hemisférico

Matemáticamente se obtiene que la resistencia entre los dos hemisferios se puede mostrar como la ecuación (2.1) [24]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \tag{2.1}$$

Donde:

$R =$ Resistencia entre los dos hemisferios

$\rho =$ Resistividad del medio

Al dejar que R_2 tienda al infinito se obtiene la ecuación (2.2) [24]:

$$Re = \frac{\rho}{2\pi R_2} \tag{2.2}$$

Re representa la porción de resistencia externa a R_2, desde ese punto al infinito. Y al aplicarse un voltaje entre los hemisferios la corriente que fluye es igual a la ecuación (2.3) [24]:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{2\pi V}{\rho}\frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \tag{2.3}$$

Si el voltaje en algún otro punto, por ejemplo, en el radio R, se mide con respecto al hemisferio exterior, el potencial de este punto con respecto al infinito puede obtenerse simplemente añadiendo un voltaje obteniendo la ecuación (2.4) [24]:

$$V = I\,Re = \frac{I\rho}{2\pi R_2} \tag{2.4}$$

Por lo tanto, un tanque hemisférico de radio r2 puede ser usado para contener el electrolito. Los límites máximos y mínimos vienen determinados de la siguiente manera; el límite máximo del factor de escala está determinado por el tamaño del conductor, el límite mínimo del factor de estaca viene definido por la dimensión del electrodo hemisférico exterior; Donde se determina que el diámetro del hemisferio debe ser al menos del doble de la dimensión máxima del vano. Las pruebas realizadas determinaron que el tamaño del conductor tiene un efecto secundario en relación con los perfiles de voltaje de la superficie, por lo tanto, al trabajar con conductores pequeños en un factor de escala 134:1 como lo es el cable 36 AWG no tiene mayor incidencia. [24]

2.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO A ESCALA

Para esta etapa constructiva se definió un escalado de la malla de 90 cm por 90 cm por lo citado en el subcapítulo 2.1. Se va a usar una cuba electrolítica que permite sumergir a la malla bajo la superficie del agua. el agua que está contenida dentro de la cuba representa el suelo, y finalmente, la cuba electrolítica en el caso de estudio es la piscina. Las dimensiones del medio electrolítico comprenden 450 cm x 220 cm x 84 cm. En el contorno de la piscina está elaborado un semi domo, que es una malla que sirve para la condición de frontera de voltaje de cero voltios y está construida por una malla electrosoldada. Esta malla electrosoldada se conectará directamente al neutro del regulador de voltaje siendo un retorno para la corriente que será inyectada. Debido a las dimensiones de la cuba electrolítica se tuvo como limitante el ancho de ésta, pero no influyó en la decisión del escalado.

En la construcción de la malla se utilizó un cable #24 AWG cuya sección comprende de 0.2050 [mm]² y posee radio de 0.5110 [mm] [24], las uniones de los cables fueron realizadas con estaño de soldar. Debido a la cantidad de nodos de la malla es necesario comprobar siempre que todos los nodos estén correctamente soldados, y además garantizar que en todos los puntos de la malla de puesta a tierra exista continuidad, la separación entre cables de la malla fue de 4.5 cm hasta llegar a obtener 20 divisiones.

En la Figura 2.4 se aprecia la construcción de la malla de puesta a tierra, el cable #24 AWG, y también el marco de madera que sirvió para la estabilización de la malla.

Debido a la necesidad de garantizar que la malla está sumergida, y que los puntos entre la malla sean equidistantes a la superficie agua, se tomó la decisión de realizar un marco de madera en donde cada uno de los cables de la malla se encuentren completamente estirados y sostenidos de esta estructura; solo así se pudo asegurar que no pierda la tensión adecuada como para ser sumergida bajo el agua. La decisión del marco de madera permitió asegurar que exista la menor cantidad posible de elementos dentro del agua, esto para que no interfieran en la medición de los datos entregando medidas erróneas o alteradas debido a la presencia de otros materiales dentro del agua ajenos a los que están siendo analizados.

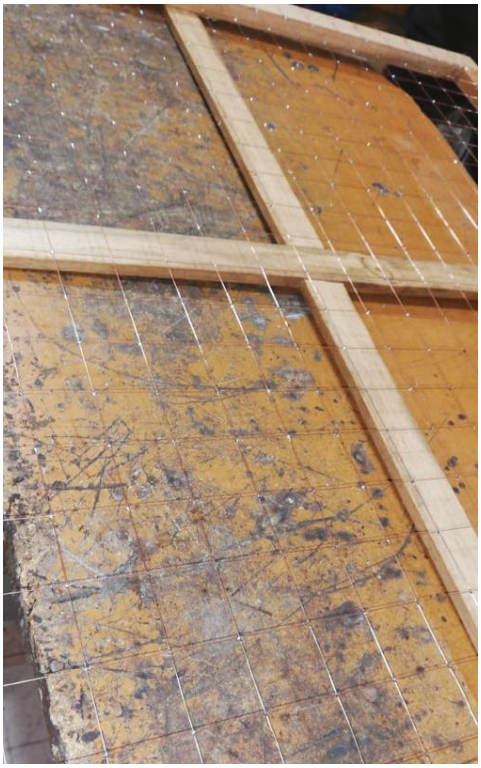


Figura 2.4. Construcción modelo a escala de la malla empleando alambre de cobre y un marco de madera

En la Figura 2.5 se observa a la piscina junto con la malla de puesta a tierra. Debido a la necesidad de que la malla sea sumergida, se utilizaron dos tubos PVC, que sirvieron de soportes para que pueda ser suspendida. La malla de puesta a tierra fue sumergida 0.6 cm bajo el nivel del agua, sostenida a los tubos mediante hilos nylon sujetados a cada una de las esquinas. Para la toma de mediciones se empleó una referencia móvil, en este caso un paralelepípedo de aluminio.

La necesidad de realizar las mediciones en dos cuadrantes obligó a tomar como referencia fija un paralelepípedo de madera colocado a lo largo de la piscina. Al igual que el paralelepípedo de aluminio, se colocó una cinta métrica graduada en su cara superior. Esta cinta métrica graduada permitió en todo momento realizar movimientos calculados y toma de datos de manera precisa mediante el uso de una sonda de voltaje colocada a la referencia móvil.

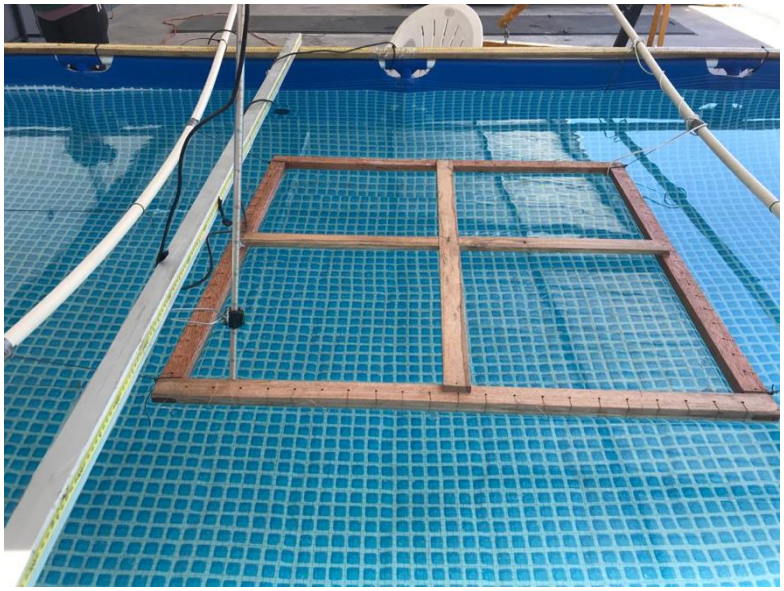


Figura 2.5. Ubicación de la malla de puesta a tierra en el centro de la piscina

Aumentar la conductividad del agua de la piscina representó un reto, para lo cual se tuvo que adicionar sal yodada. El problema de agregar la sal a la piscina fue que ésta no se diluyó fácilmente. Además, la malla electrosoldada que estaba formando el semi domo interfería al momento de intentar diluirla. Por lo que, se decidió hervir agua. Con el agua en temperatura de ebullición, se agregaron las fundas de sal y con un removedor se batió hasta que quedó completamente diluida. Al dejarla reposar por unos segundos, y sin rastro de que haya sal sin diluir se procedió a verter sobre el agua de la piscina; resultando una técnica efectiva y práctica para solucionar el problema que representaba mezclar la sal una vez instalados los elementos, tanto la malla como el semi domo.

Para este proceso cada vez que se adicionaba una cantidad de sal diluida a la piscina, se tomaba medidas de la resistividad del agua. Se realizó este proceso varias veces hasta obtener una resistividad adecuada, en el sentido de que sea constante y que permita inyectar la corriente; no existe una resistividad especifica normalizada. Es decir, depende del criterio del investigador determinar el valor a utilizar, como se observa en la Tabla 1.2 existe un rango de resistividad entre distintas naturalezas de terreno. Una vez definida la resistividad que se buscaba, se la controló durante el procedimiento de toma de datos paulatinamente. Lo que se buscaba al realizar este permanente control es que la resistividad del agua no altere sus valores y logre mantenerse lo más constante posible.

Mediante el uso de un telurómetro se procedió a aplicar el método de Wenner de 4 puntas [23]**.** Para asegurar que la medición sea lo más precisa posible, se tomaron varias medidas aleatorias para poder validar efectivamente que la resistividad se mantenga a lo largo del

proceso. Estas variaciones fueron sometidas a diferentes distancias, y también a distintas horas del día.

La Tabla 2.1 presenta la separación y también la dirección en las cuales se ubicaron las picas para la toma de la medición a lo largo de la piscina. Como referencia se tomó al lado que mide 2.2 metros de la piscina.

Tabla 2.1. Consideraciones medición de la resistividad del agua

Consideraciones al medir la resistividad del agua	
Distancia de separación entre picas	**Dirección tomada**
0.90 m	Vertical respecto a la referencia determinada previamente
0.20 m	Vertical respecto a la referencia determinada previamente
0.15 m	Horizontal respecto a la referencia determinada previamente

El circuito eléctrico que se utilizó para la toma de mediciones se detalla en la Figura 2.6 [24]**.** Dicho circuito consta de un autotransformador variador de voltaje conectado directamente a la red eléctrica a frecuencia industrial. El variador de voltaje se encuentra acoplado mediante conexión en serie a un reóstato, y también al semi domo ubicado dentro de la piscina. Conectado a la fase del variador de voltaje, se encuentra la sonda de voltaje. Esta sonda de voltaje recorrió toda el área de la superficie de la piscina, y se procedió a realizar la adquisición de los datos. Se utilizaron dos instrumentos de medición, una pinza amperimétrica y un voltímetro.

La variable de entrada que se controló en todo momento era la corriente que ingresaba, mediante el uso de la pinza amperimétrica fue posible llevar el control a todo momento. Si este valor presentaba una caída o a su vez, una subida de su valor predeterminado; mediante la variación del reóstato se lograba recuperar el valor definido manteniendo constante el valor de la corriente en todo momento de medición.

La sonda de voltaje conectada a un voltímetro, al ser móvil permitió obtener los valores superficiales de voltaje a lo largo de la piscina tanto en X como en Y al referirse a coordenadas cartesianas. Estos valores de voltaje y de corriente, fueron tabulados con su respectiva coordenada durante la toma de mediciones.

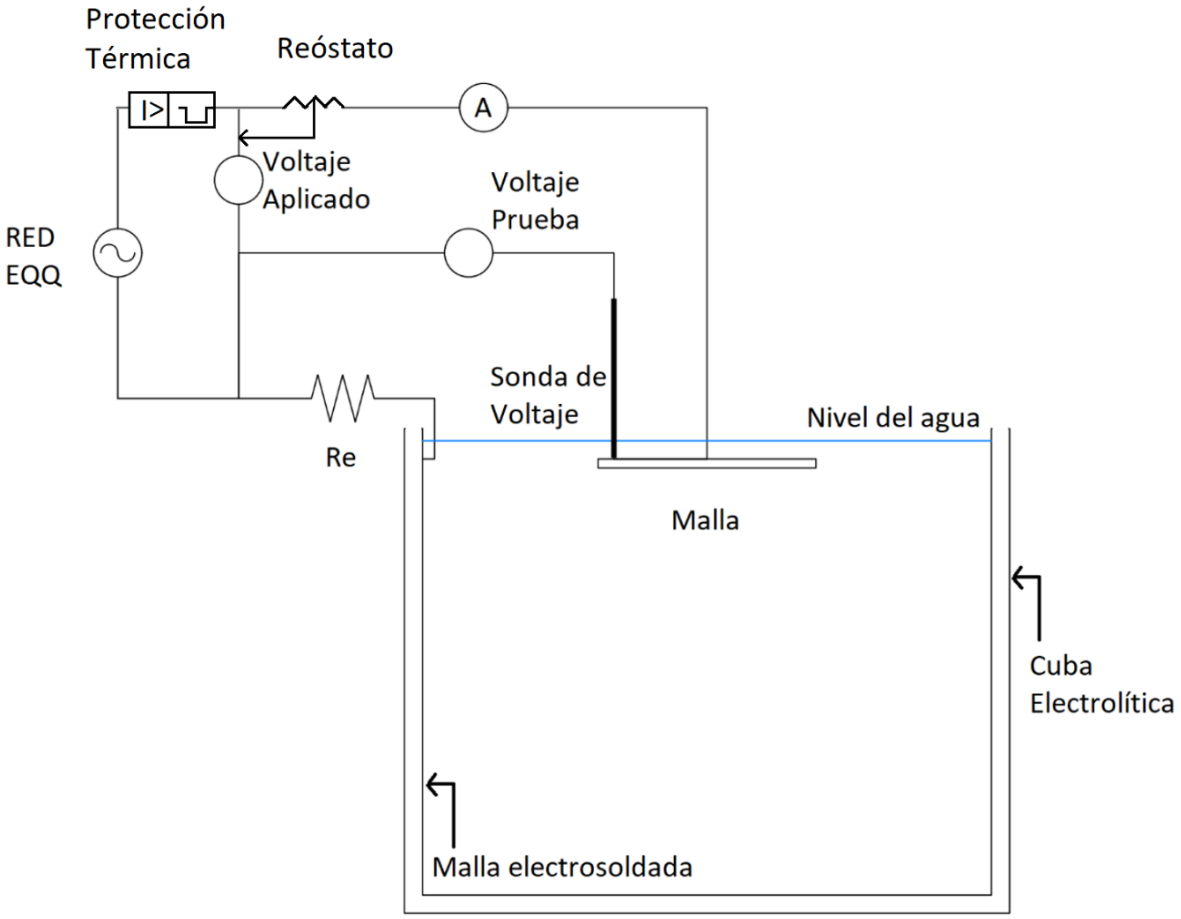


Figura 2.6. Conexiones eléctricas del modelo de malla de puesta a tierra con conexión a la red.

La Tabla 2.2 presenta el método, y los distintos casos que se realizaron para la medición de la resistividad del agua. Se realizaron 3 mediciones, la profundidad a la cual se enterró las picas fue constante; la distancia de separación entre picas varió, por ello la lectura del telurómetro también lo hizo. Después de haber obtenido estos datos, se aplicó la ecuación del cálculo de la resistividad de Wenner definida en la ecuación (1.1) de la sección 1.3.6.

Tabla 2.2. Valores de la profundidad de las picas, distancia de separación, lectura del telurómetro y la resistividad del agua de la cuba electrolítica.

VALORES DE RESISTIVIDAD COMPLETA DEL AGUA				
Método utilizado: Método de medición de Wenner de 4 puntas				
	Profundidad de las picas enterradas	**Distancia de separación**	**Lectura del telurómetro**	**Resistividad**
Medición 1	10 cm	0.90 m	1.08	6.2366 Ω-m
Medición 2	10 cm	0.20 m	6.19	10.3641 Ω-m
Medición 3	10 cm	0.15 m	6.21	8.55702 Ω-m

Estos resultados fueron promediados con el método BOX – COX definido en 1.3.8 para corregir la distribución de errores y varianzas desiguales. Obteniendo un valor de resistividad que será usada posteriormente en la validación. La Tabla 2.3 presenta las desviaciones y media geométrica de estos valores, así como el valor de la resistividad.

Tabla 2.3. Valores de las deviaciones de la relación BOX – COX.

$\boldsymbol{pi}$	$\boldsymbol{xi}$	$(\boldsymbol{xi}-\boldsymbol{x})^2$
6.2366	1.8304	0.0732
10.3641	2.3259	0.050
8.55702	2.1467	0.0020
$xmedio$	2.1010	
$desviación$	0.2048	
$resistividad$	9.1018 Ω-m	

Donde

pi = Resistividad aparente medida

xi = Logaritmos naturales de las resistividades aparentes medidas

x = Resistividad promedio

$xmedio$ = Valor medio de los de los logaritmos naturales de las resistividades aparentes

2.4. VALIDACIÓN DEL MODELO A ESCALA

Para realizar el proceso de validación se toman los datos característicos del experimento del modelo base, y se los aplica en una simulación en el programa ANSYS con condiciones similares a la del experimento. Posterior a esto, para efectuar la validación, se toman los valores medidos y se los importa directamente al MATLAB. Una vez que estos valores están cargados en MATLAB, se utiliza la herramienta CFTOOL que permite obtener los modelos de las curvas en tres dimensiones. Una vez importados los datos del modelo físico, se carga también los datos del modelo experimental. Se evalúan los resultados de las curvas en las mismas coordenadas X e Y, y con los valores evaluados se determina las métricas de error de la Tabla 2.4 definidas en la sección 1.3.17.

Tabla 2.4. Índices de error a utilizar en la validación del método

INDICES DE ERROR
RMSE
MAE
Error relativo en porcentaje
MAPE

2.5. CASOS DE ESTUDIO MODELO VALIDADO

Con la finalidad de comprender y entender que sucede al someter a una malla de puesta a tierra a distintos escenarios, se han planteado varias situaciones para simularlas. Entre los escenarios de simulación, se presentan: distintas configuraciones geométricas, distinta resistividad de los materiales, varias capas de suelo, diferentes valores de corriente que será inyectado, en diferentes lugares de la malla. Todo esto permitirá comprender de mejor manera los fenómenos que ocurren al producirse una descarga.

Como variación de la configuración geométrica de una malla de puesta a tierra se van a tratar 3 casos, presentados en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5. Configuraciones geométricas que se utiliza en las simulaciones

Configuración Geométrica
Triangular
Cuadrada
Circular

Respecto a la resistividad de los materiales, se tiene dos casos a tratar. Descritos en la Tabla 2.6:

Tabla 2.6. Materiales que se utilizan y su resistividad

Materiales	Resistividad [Ω-m]
Cobre	1.694E-08
Aluminio	2.67E-08

Para la simulación se tomarán 2 capas de suelo definidas en la Tabla 2.7. En lo que a capas de suelo respecta, es necesario definir la resistividad de cada capa, y también la altura.

Tabla 2.7. Características de las capas del suelo, resistividad, y altura

Capa	Resistividad [Ω-m]	Altura [m]
Capa 1	4500	5
Capa 2	400	10

Finalmente, las dos variaciones de corriente a utilizar durante el experimento, como la ubicación por la cual esta corriente ingresara por la malla como se ilustra en la Tabla 2.8:

Tabla 2.8. Valores de corriente a utilizar y su ubicación del ingreso de corriente en la malla

	Valor de Corriente	**Ubicación ingreso corriente en la malla**
Caso 1	10 kA	Centro
Caso 2	5 kA	Esquina

Se definieron 16 casos de estudio, para el desarrollo de este proyecto expresados de manera resumida en la Tabla 2.9. El objetivo es observar los efectos de la geometría, de las resistividades de los materiales, del valor de la corriente, del lugar de inyección de la corriente y del número de capas. Para ello los casos de estudio son hipotéticos. Estas mallas no fueron diseñadas y el diseño no es del alcance de este proyecto. Al analizar los casos de estudio se puede evaluar las mallas para conocer si son o no adecuadas; y en caso de que fueran o no producto del diseño se pueda poner a prueba el diseño evaluando su viabilidad.

Tabla 2.9. Casos de estudio a desarrollarse en el proyecto.

CASO ESTUDIO	**CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA**	**MATERIAL**	**CAPAS DE SUELO**	**VALOR DE CORRIENTE**	**VALOR INYECCIÓN CORRIENTE**
A	CUADRADA	COBRE	2 CAPAS	10 kA	CENTRO
B	CUADRADA	COBRE	2 CAPAS	5 kA	CENTRO
C	CUADRADA	COBRE	2 CAPAS	10 kA	ESQUINA
D	CUADRADA	COBRE	2 CAPAS	5 kA	ESQUINA
E	CUADRADA	ALUMINIO	2 CAPAS	10 kA	CENTRO
F	CUADRADA	ALUMINIO	2 CAPAS	5 kA	CENTRO
G	CUADRADA	ALUMINIO	2 CAPAS	10 kA	ESQUINA
H	CUADRADA	ALUMINIO	2 CAPAS	5 kA	ESQUINA
I	TRIANGULAR	COBRE	2 CAPAS	10 kA	CENTRO
J	TRIANGULAR	COBRE	2 CAPAS	5 kA	CENTRO
K	TRIANGULAR	ALUMINIO	2 CAPAS	10 kA	ESQUINA
L	TRIANGULAR	ALUMINIO	2 CAPAS	5 kA	ESQUINA
M	REDONDA	COBRE	2 CAPAS	10 kA	CENTRO
N	REDONDA	COBRE	2 CAPAS	5 kA	CENTRO
O	REDONDA	ALUMINIO	2 CAPAS	10 kA	ESQUINA
P	REDONDA	ALUMINIO	2 CAPAS	5 kA	ESQUINA

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO

En esta etapa se somete al modelo a escala a experimentación, obteniendo medidas de voltaje y de corriente. Para ello se inició con la construcción del semi domo, el cual está compuesto por una malla electrosoldada que cubre todas las paredes y el suelo de la piscina. Adicionalmente se elaboró el circuito eléctrico, conformado por una alimentación de 220 voltios a frecuencia industrial, a un regulador de voltaje cuyo neutro se encuentra conectado en serie a un reóstato y esta a su vez conectada directamente a la malla electrosoldada o semi domo que sirvió como referencia. Estos dos equipos permitieron controlar de una manera rápida, segura y adecuada la inyección de corriente a la malla. Con la finalidad de que esta permanezca siempre constante a lo largo del experimento para obtener una toma de datos adecuada.

En la Figura 3.1 se visualiza la ubicación del semi domo de malla electrosoldada en todo el contorno de la piscina. Teniendo una visión general de donde se realizaron las mediciones, por donde se inyecta corriente, y las referencias graduadas para la medición de los valores.

Figura 3.1. Ubicación del semi domo al contorno de la malla

Los instrumentos de medida que se utilizaron fueron una pinza amperimétrica, colocada a la salida de la fase del regulador de voltaje. Un multímetro, conectado en serie a la sonda

de voltaje y conectado al neutro del regulador. Una vez armado el circuito eléctrico se procedió a tomar las mediciones de resistividad del terreno, en este caso el terreno será agua. Para ello se procedió a realizar el método de Wenner de 4 picas, colocados a una profundidad y distancia determinada, realizando un monitoreo constante del valor obtenido. Se realizaron medidas antes de iniciar, durante el proceso y también al final mientras dure el periodo de adquisición y toma de datos.

Para la adquisición de los datos, la sonda de voltaje se desplazó por distintos puntos de la superficie de la piscina. Obteniendo a su paso valores de voltaje, que fueron tomados y tabulados en tiempo real con respecto a sus coordenadas. Por otro lado, el amperaje inyectado se mantuvo constante, el monitoreo del valor de la corriente inyectada fue de suma importancia durante el proceso. Si llegaba a darse el caso que esta corriente varia su valor sobre o por debajo de su referencia establecida, se procedía a regular el reóstato hasta igualar al valor inicial de la corriente. Este control de los valores de corriente permitió garantizar la validez de los datos adquiridos en condiciones iniciales.

Finalmente, para el desplazamiento de la sonda alrededor de la superficie de la piscina. Se realizó en un medio seguro y con implementos de seguridad personal, empleando guantes dieléctricos para la manipulación de los elementos de medida durante el experimento. Así también como un interruptor automático o ‘breaker’ independiente únicamente para el circuito descrito en la Figura 2.6.

La Figura 3.2 presenta una de las mediciones tomadas de resistividad del agua, mediante el uso de un telurómetro por el método de 4 puntas de Wenner [23]. En este caso en específico la adquisición de estos valores fue realizada a una distancia de 0.9 metros entre picas, estas se encontraban enterradas una profundidad de 0.1 metros sobre el nivel del agua dando como lectura el telurómetro un valor de 1.08 como indica la Tabla 2.2. Es importarte recordar al momento de realizar la medición que se debe respetar el orden de ingreso en el cual están distribuidas las picas en el telurómetro. Asimismo, es imperante que las picas se encuentren haciendo contacto con el medio a la distancia determinada. Si alguno de estas condiciones no se cumple, el telurómetro no será capaz de medir la resistividad del terreno o en su defecto brindará valores erróneos de medición.

Figura 3.2. Medida de la resistividad de la piscina mediante el telurómetro

3.2. MODELACIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA EN ANSYS

En el programa de simulación ANSYS se procedió a estudiar un modelo virtual basado en el caso base, una malla de 90 cm x 90 cm. Los datos de ingeniería contienen la información de las propiedades físicas de los materiales. El estudio virtual analiza el flujo de corriente eléctrica al pasar por la malla por el agua salada; por tanto, se requiere indicar al programa la propiedad de resistividad de estos materiales. El catálogo de ingeniería de ANSYS Workbench contiene una amplia variedad de materiales y sus respectivas propiedades. También es posible añadir nuevos materiales y personalizarlos de acuerdo con la conveniencia del usuario y sus necesidades.

En la Figura 3.3 se observan los módulos que dispone ANSYS, en el cual el módulo eléctrico al ser arrastrado al área de trabajo despliega cada una de las configuraciones que debe cumplir; datos de ingeniería es donde se cargan y asignan los valores característicos de cada material; geometría es donde se define la forma; modelo es donde se asigna las características de mallado.

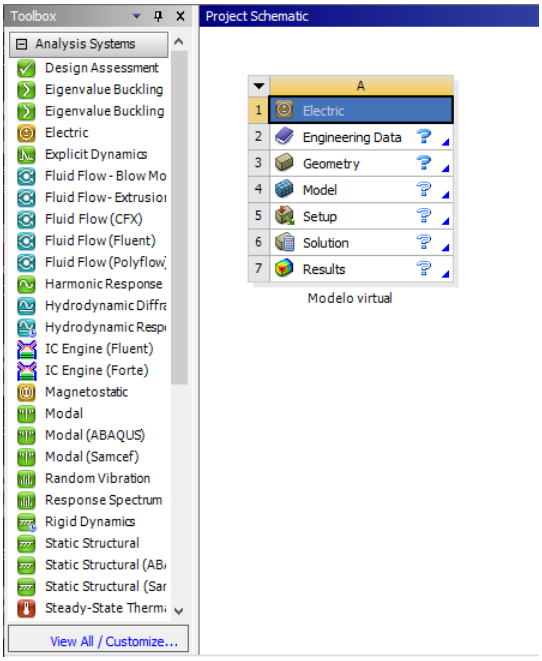


Figura 3.3. Catálogo de ingeniería de ANSYS, donde se encuentran los módulos que contiene

La malla de puesta a tierra del modelo físico de la validación es de cobre. La biblioteca de ANSYS ya contiene el cobre como un material predefinido. Por lo que tiene cargadas sus resistividades a diferentes temperaturas. El material presenta características definidas, como la densidad, la resistencia a la tracción, la resistencia al rendimiento de la compresión, la conductividad térmica isotrópica, calor especifico, resistividad isotrópica. Todas estas, características inherentes e ideales necesarias para realizar distintos procesos de simulación.

La Figura 3.4 presenta la selección del cobre como elemento para el análisis del presente estudio. A este material le corresponde una curva de resistividad variable con respecto a la temperatura. Se observa que si la temperatura del agua aumenta también lo hará su resistividad en ohmios por metro. Es posible además modificar las características isotrópicas de la resistividad, determinando así valores en los rangos de temperatura deseados.

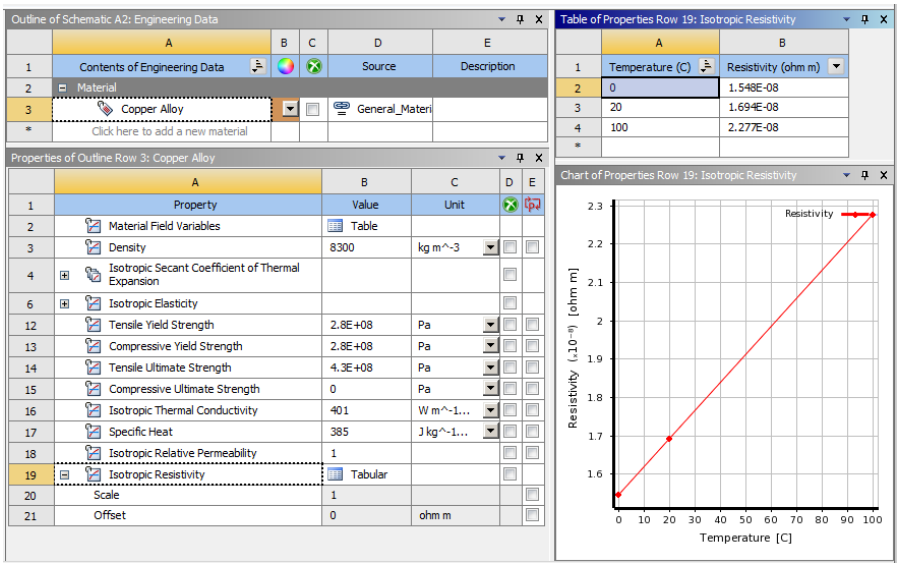


Figura 3.4. Características isotrópicas del cobre, donde es posible determinar su temperatura y resistividad

El agua utilizada en el modelo físico era una solución salina en agua potable. Este fluido no está especificado en la librería de ANSYS Workbench. Por lo que, se utiliza un telurómetro para determinar la resistividad del agua salada del modelo a escala. El valor obtenido se cargará en los datos de ingeniería de la simulación.

Se determinó en la sección 2.2, en la Tabla 2.3 el valor de la resistividad del agua salada que es equivalente a un valor de 9.101856 Ω-m, a una temperatura de 22°C.

La Figura 3.5 presenta las características isotrópicas del material, ubicada dentro de los datos de ingeniería. Este caso es distinto al anterior, ya que aquí no se posee las características isotrópicas medidas. Motivo por el cual se procede a modificar estos valores a los necesitados, tanto en resistividad en Ω-m como en temperatura en °C.

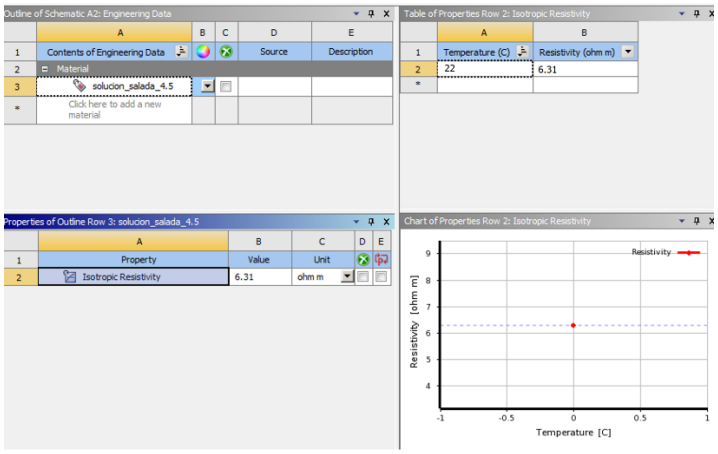


Figura 3.5. Características isotrópicas del agua salada, donde es posible determinar su temperatura y resistividad

Para el modelamiento de la malla de puesta tierra, se utilizó el programa AutoCAD. Se asignaron los valores inherentes del cable #24 AWG, utilizado en la etapa de simulación física cuya sección comprende de 0.2050 [mm]² y radio de 0.5110 [mm] [3]. Creando una malla de dimensiones de 90 cm por 90 cm, con una juntura perfecta en sus nodos. Los espaciamientos de cada uno de los conductores se determinó que sea de 0.45 cm por lado, como se observa en la Figura 3.6 donde se muestra la construccion de la malla.

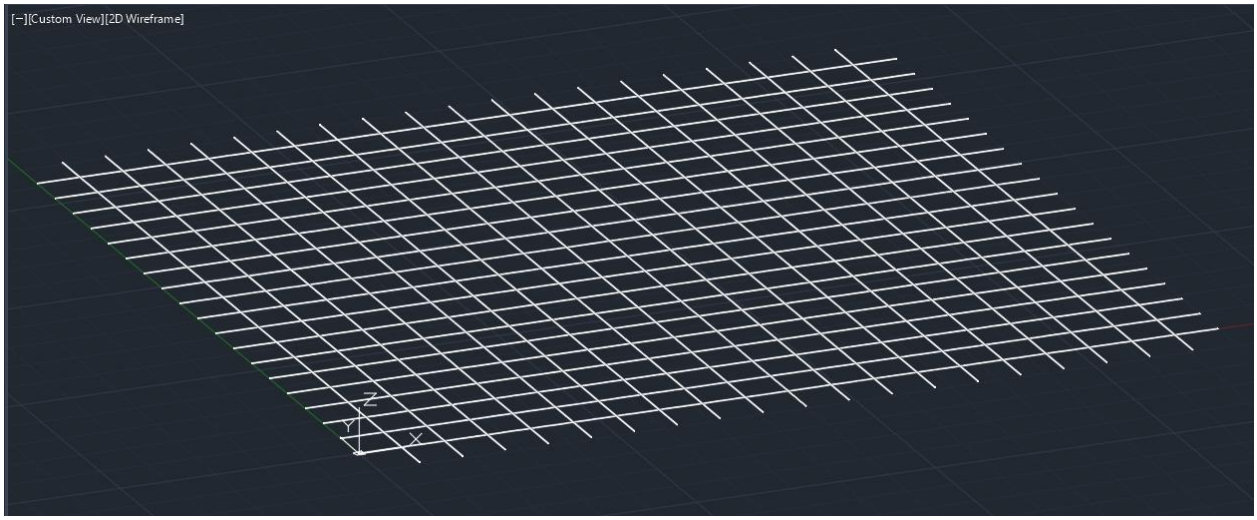


Figura 3.6. Construcción de la malla de puesta a tierra en AutoCAD

La Figura 3.7 presenta la creación de la cuba electrolítica. Para lo cual se procedió con la elaboración de un paralelepípedo, de las dimensiones de 4,5 x 2,2 x 0,84 m. En este tanque electrolítico se realizaron las mediciones, pruebas y abarca a la malla de puesta a tierra en su centro. Siendo un cuerpo geométrico con cuatro paredes, y una sola base.

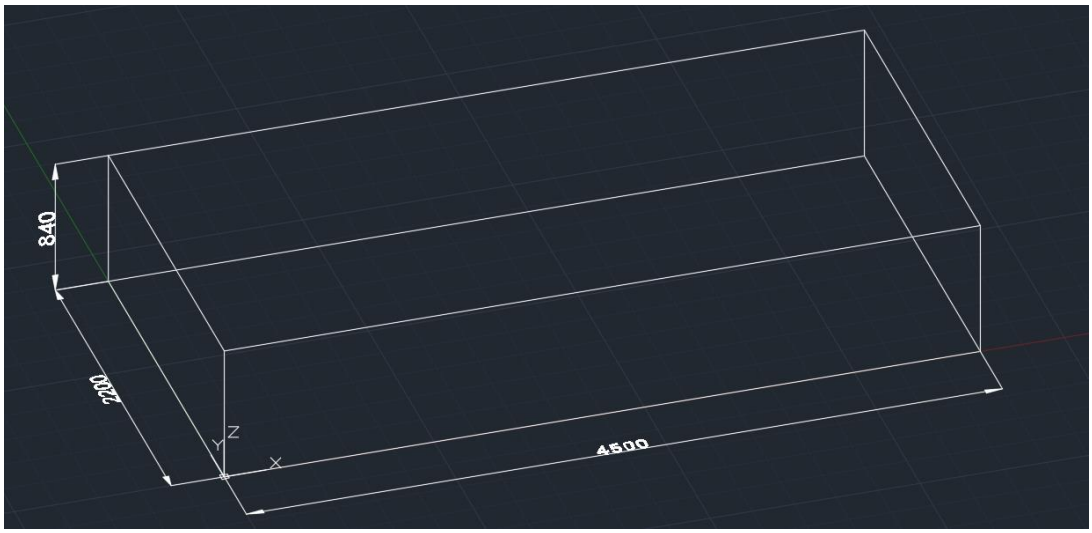


Figura 3.7. Construcción del tanque electrolítico en AutoCAD

Posterior a la elaboración de las piezas por separado, se procedió a unirlas en el mismo programa. Para ello, en la Figura 3.8 se observa cómo se sobrepone la malla en la parte central de la piscina. Es necesario en este paso, ubicar a la malla en la parte central y también ponerla a una profundidad de 0.06 cm.

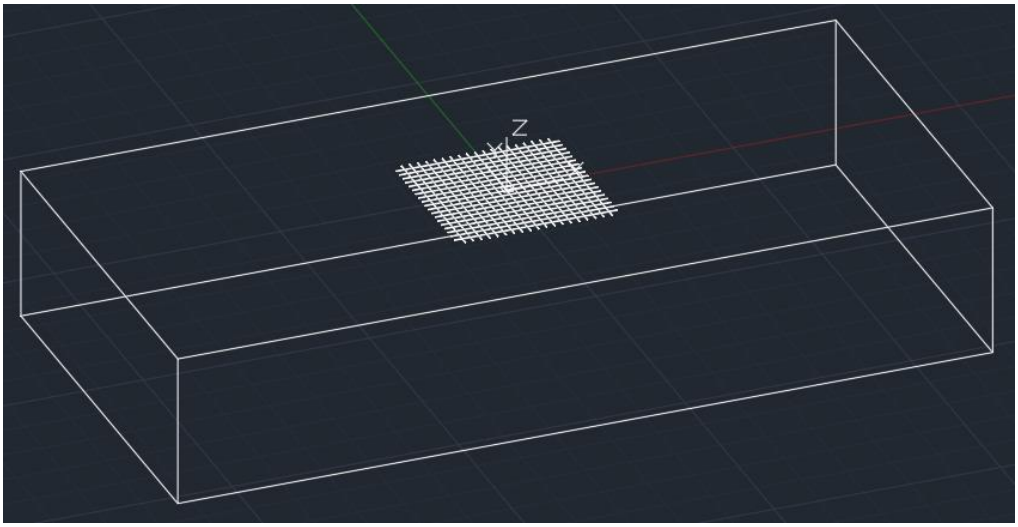


Figura 3.8. Tanque electrolítico ubicado junto con la malla de puesta a tierra en AutoCAD

El software ANSYS, es un programa que permite tratar los sólidos en un entorno de tres dimensiones. Motivo por el cual es necesario cargar en el módulo geométrico, ubicado en la Figura , el tanque electrolítico y también la malla de puesta a tierra previamente construida en AutoCAD. Para ello la extención que necesita ser el archivo a cargar debe ser *.IGES*, que permitirá importar la figura al módulo geométrico del programa ANSYS. En la Figura 3.9 se observa el tanque electrolico cargado al módulo eléctrico en la configuración del modelo geométrico.

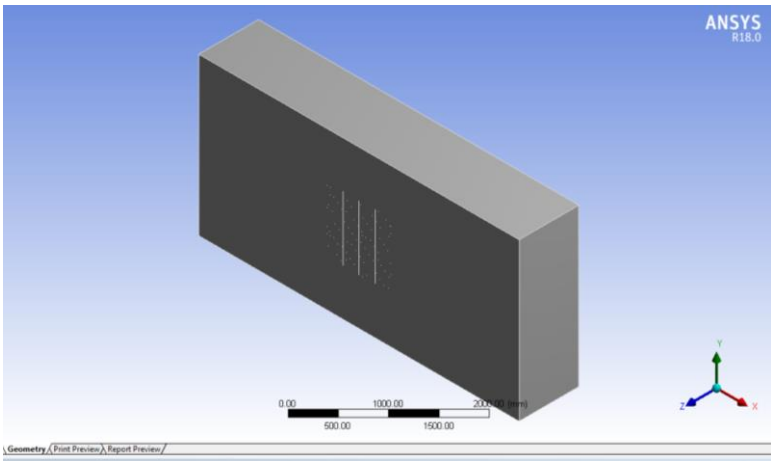


Figura 3.9. Tanque electrolítico ubicado junto con la malla de puesta a tierra importado en ANSYS

Una vez que el modelo geométrico está cargado en ANSYS, es necesario determinar las propiedades de frontera, características del mallado, valor y lugar de inyección de la corriente o voltaje. Para ello en la sección de propiedades se puede asignar el material determinado, en el caso de la simulación la inyección de la corriente se hace por un punto del extremo de la malla y también se determina en el programa esta particularidad indicando el valor de la corriente a trabajar.

En la Figura 3.10 se logra visualizar que el modelo se encuentra cargado, pero es necesario determinar la información registrada en los datos de ingeniera, como lo es el material, el comportamiento en función de la temperatura. En esta etapa es posible determinar varias características, como establecer el comportamiento de la rigidez del material conductor, ubicado en la cuarta fila en donde es posible asignarle características como si es flexible o rígido, la referencia de la temperatura, y en la sección especifica de "material" se puede seleccionar características de materiales predeterminados o los que el usuario previamente haya creado o modificado.

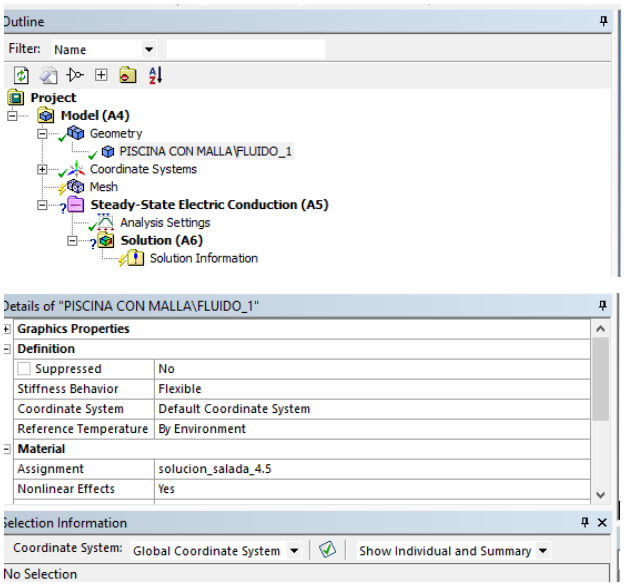


Figura 3.10. Asignación de los materiales a la geometría.

Se procede a determinar los por menores de la configuración de la simulación, en base a las características del mallado. En la sección del mallado se establece: el tipo de mallado a realizar, la transición, el tamaño mínimo del mallado, limites en los errores. Esto permite realizar diversas simulaciones, con diferentes consideraciones.

Es decir, variando la precisión del mallado la simulación logra ser más exacta o menos exacta; esto debido a la cantidad de nodos y número de elementos que toma en cuenta para realizar la simulación. Este proceso tiene sus ventajas y desventajas, como ventaja se puede considerar que la precisión de los resultados será más exacta; por otro lado, este

proceso demandará una mayor cantidad de recursos para la simulación. Debido a las características geométricas del caso a analizar, el mallado resulta beneficioso ya que el programa realiza un tipo de mallado a la cuba electrolítica, y un mallado mucho más fino y detallado a la malla de puesta a tierra. Esto se produce debido a la relación existente entre el tanque electrolítico en comparación a la malla de puesta a tierra.

En la Figura 3.11 se observan las propiedades del mallado. En el cual ANSYS por sus características de simulación lo divide en triángulos al hablar de un elemento de dos dimensiones, que a su vez forma un tetraedro en cada uno de los respectivos nodos al hablar de un elemento de tres dimensiones. Se observa también que la parte del mallado de la malla de puesta a tierra tiene una estructura diferente a la de la piscina. Esto debido a la cantidad de elementos en las cuales se divide, el mallado en la malla de puesta a tierra es mucho más fino comparado con el de la piscina.

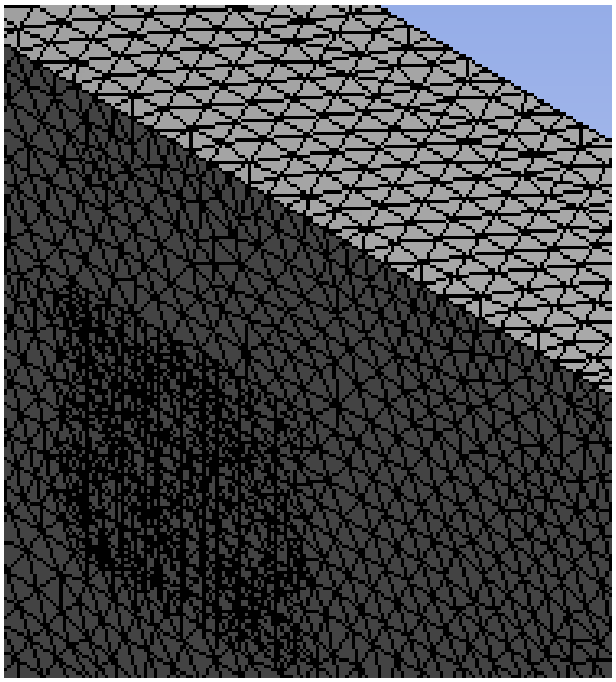


Figura 3.11. Mallado de la estructura, en el cual se divide en pequeños puntos aplicando el principio de las FEM.

En la Figura 3.12 se puede visualizar el mallado de la estructura, el cual se divide en pequeños puntos aplicando el principio de las FEM. Presentando un mayor detalle de las características del mallado de la piscina junto con la malla.

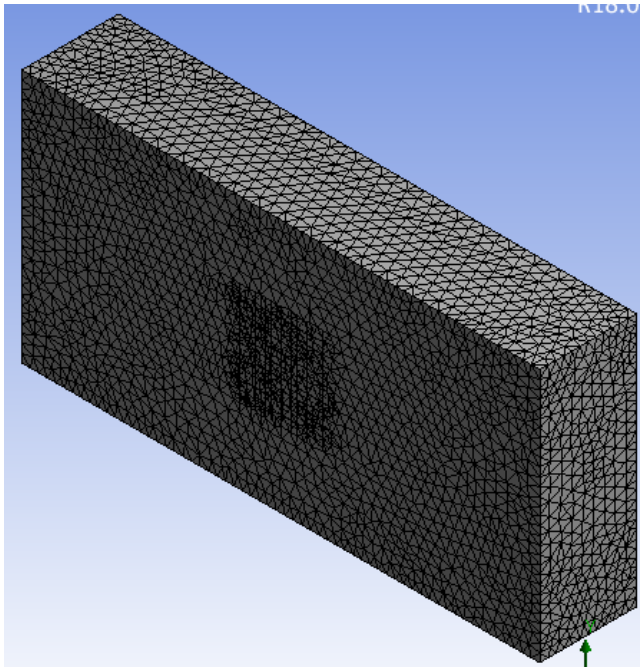


Figura 3.12. Mallado de la estructura, en el cual se divide en pequeños puntos aplicando el principio de las FEM.

Después de haber definido la geometría, cargado al sistema el material que posee la figura geométrica, y definir las características de simulación como el mallado se procedió a determinar las características eléctricas de conducción en estado estable. Para ilustrar lo anterior mente mencionado se encuentra la Figura 3.13. Es posible determinar características de entrada de voltaje y de corriente para la simulación, definiendo particularidades de esta como su valor, su magnitud, y si presenta un desfase. Para el caso de simulación tratado es necesario ingresar un valor de corriente.

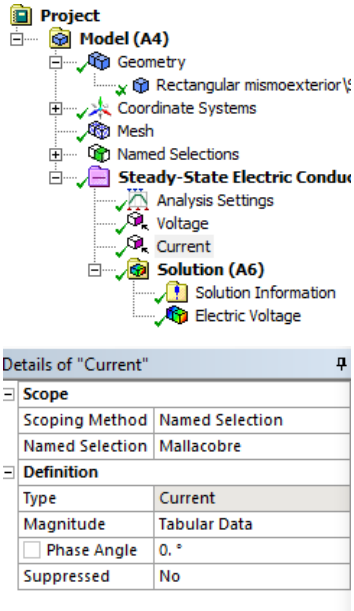


Figura 3.13. Determinar el valor y lugar de inyección de la corriente

Adicionalmente a definir los valores de entrada, es necesario determinar el lugar por el cual ingresará la corriente, o tendrá el nivel de voltaje. Para ello el usuario puede seleccionar un punto, un vértice, una cara, o completamente el volumen del cuerpo geométrico. Las opciones se muestran en la Figura 3.14.

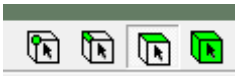


Figura 3.14. Opciones para seleccionar el lugar geométrico

En la Figura 3.15 se selecciona la cara superior del elemento para asignarle un valor de corriente deseado.

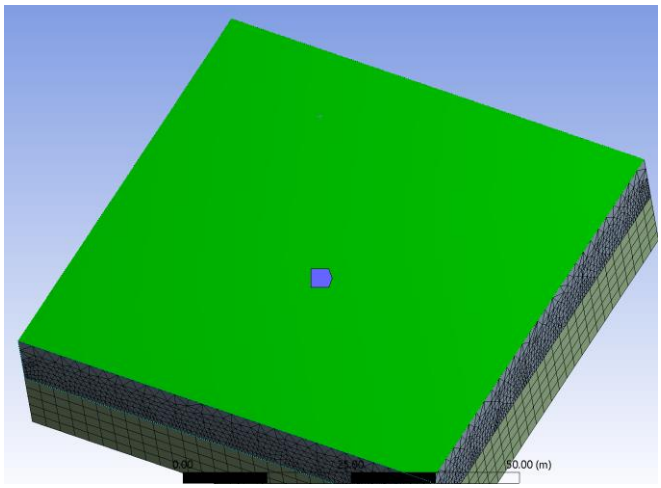


Figura 3.15. Selección de elemento de acuerdo a la superficie de la cara

Existe también la opción de seleccionar respecto a los elementos, la elección anterior es beneficiosa al momento de utilizar una figura geométrica con espacios definidos. En función del mallado existente es posible realizar la selección**.** También es posible realizar la selección en función de los elementos y forma del mallado. Siendo más flexible el rango de selección que se puede realizar.

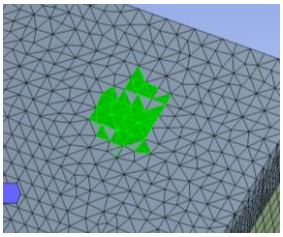


Figura 3.16. Selección de elementos en función del mallado

El software utilizado, ANSYS permite realizar distintas pruebas en su módulo eléctrico. En función de las necesidades del usuario se puede obtener distintos resultados; por ejemplo,

el voltaje eléctrico puede presentar un gran número de combinaciones. Como se detalla en la Figura 3.14 es posible determinar distintas zonas de medición, puede ser un vértice, una cara, un cuerpo entero o únicamente una sección.

Existen pruebas tales como intensidad de campo eléctrico, densidad total de la corriente, densidad de la corriente direccional, u obtener el calor producido. La Figura 3.17 las pruebas disponibles en el módulo eléctrico de ANSYS.

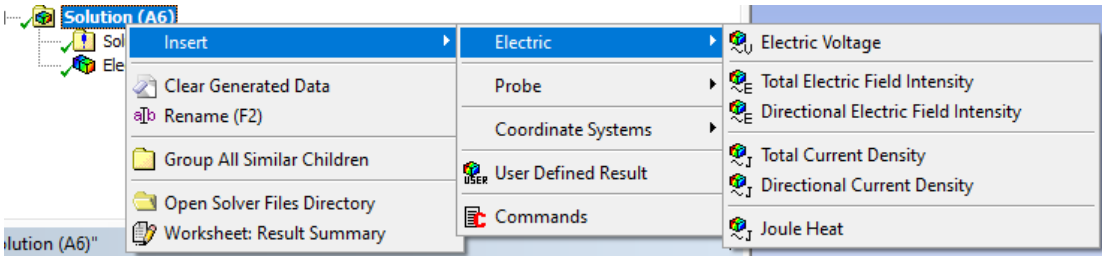
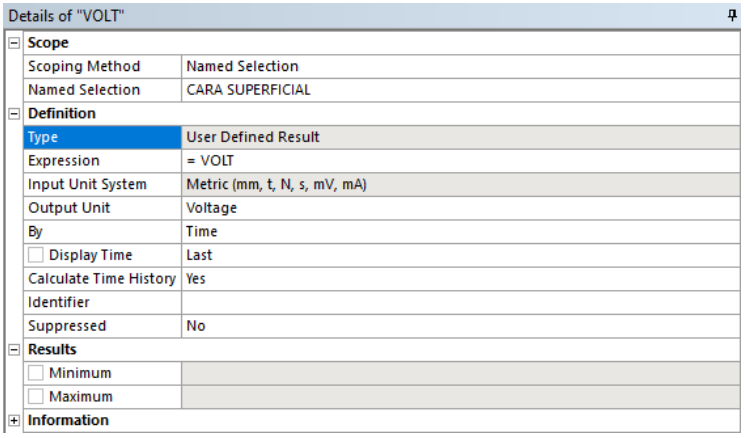


Figura 3.17. Pruebas disponibles en ANSYS

ANSYS cuenta con la posibilidad de que el usuario pueda definir o crear pruebas determinadas que se logren aplicar posteriormente sin la necesidad de volver a determinar los detalles deseados nuevamente. Para ello es necesario determinar las características de cada una de las variables de simulación. Definiendo su tipo, su ubicación, declarando la variable, la unidad de sistema. La Figura 3.18 se presenta cómo es posible definir las características de una variable de simulación, definiendo sus características inherentes como las unidades de medida, nombre y tiempo.



Details of "VOLT"

Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	CARA SUPERFICIAL
Definition	
Type	User Defined Result
Expression	= VOLT
Input Unit System	Metric (mm, t, N, s, mV, mA)
Output Unit	Voltage
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Minimum	
Maximum	
Information	

Figura 3.18. Determinar características de las variables de la simulación

Posterior a la selección de las pruebas que se realizaron, se obtienen los resultados como se presenta en la Figura 3.19, se puede observar que la distribución del voltaje alrededor

del modelo geométrico. Existe valor de voltaje elevado en el interior de la malla, que va disminuyendo paulatinamente con forme se acerca a las paredes del tanque electrolítico que representa la condición de frontera. Se puede observar gráficamente la presencia de las curvas equipotenciales a distintos niveles de voltaje.

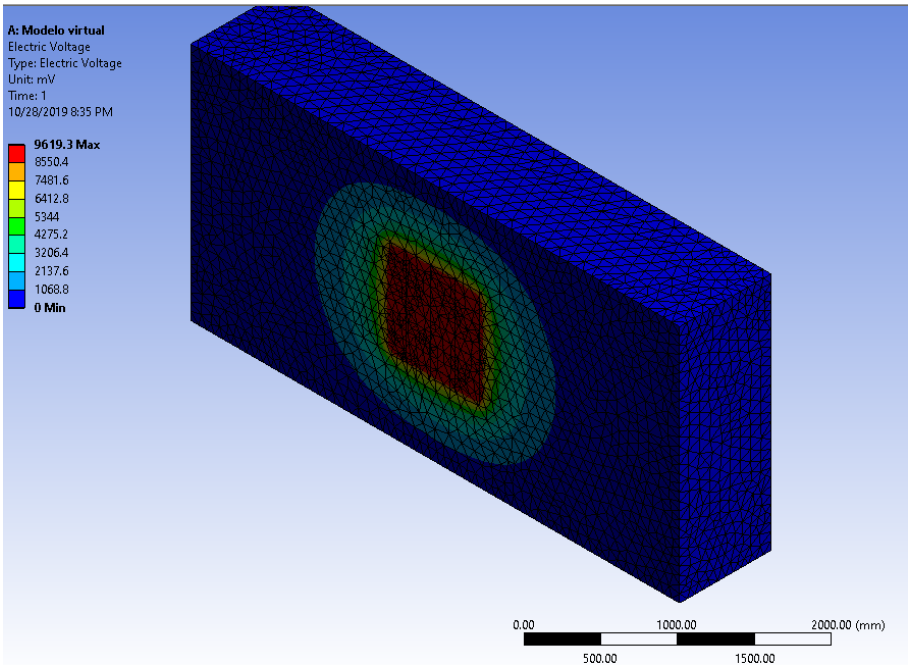


Figura 3.19. Resultados de la simulación y visualización de las curvas equipotenciales

ANSYS permite exportar los resultados obtenidos de la prueba realizada a diferentes formatos de almacenamiento. Estos pueden ser el formato de bloc de notas, como en formatos de visualización propios del programa. La Figura 3.20 indica las opciones disponibles para exportar los resultados obtenidos.

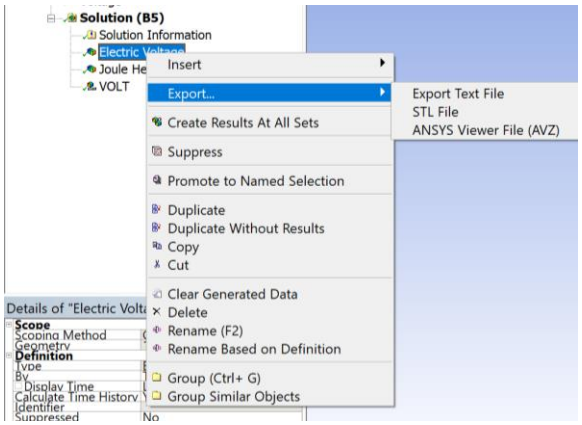


Figura 3.20. Opciones para la exportación de datos

Existe una limitante en este proceso y es que al momento de exportar los datos se visualiza únicamente los nodos, por número. Para ello es necesario configurar ANSYS, para poder

obtener una visualización de coordenadas cartesianas que facilitan el tratamiento de datos. Como se muestra en la Figura 3.21 en la cual la opción de exportar los resultados en coordenadas ya se encuentra habilitado.

Node Number	X Location (mm)	Y Location (mm)	Z Location (mm)	Electric Potential (mV)
1	2250.	-1100.	0.	0.
2	2250.	1100.	0.	0.
3	2250.	-1026.7	0.	0.
4	2250.	-953.33	0.	0.
5	2250.	-880.	0.	0.
6	2250.	-806.67	0.	0.
7	2250.	-733.33	0.	0.
8	2250.	-660.	0.	0.
9	2250.	-586.67	0.	0.
10	2250.	-513.33	0.	0.
11	2250.	-440.	0.	0.
12	2250.	-366.67	0.	0.
13	2250.	-293.33	0.	0.
14	2250.	-220.	0.	0.
15	2250.	-146.67	0.	0.
16	2250.	-73.333	0.	0.
17	2250.	1.1102e-013	0.	0.
18	2250.	73.333	0.	0.
19	2250.	146.67	0.	0.
20	2250.	220.	0.	0.

Figura 3.21. Visualización de datos exportados de ANSYS

Este proceso de configuración de ANSYS es necesario para la exportación de los datos junto con las coordenadas; se lo debe realizar en el menú de opciones como se ilustra en la Figura 3.22, definiendo los parámetros para realizar la exportación de resultados, donde se determina que los números de nodos este activo y se incluya la ubicación. Así se puede visualizar los valores y se puede tratarlos con mayor facilidad ubicándolos en un plano cartesiano de tres dimensiones.

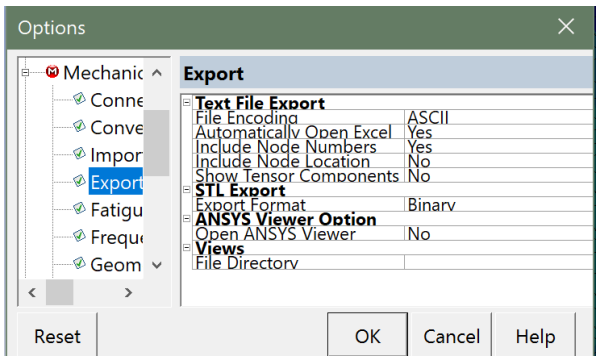


Figura 3.22. Configuración para obtener coordenadas

3.3. VALIDACIÓN

Una vez que se realizaron las mediciones del modelo físico a escala dentro de la cuba electrolítica, se procede a validar el método de simulación de elementos finitos comparando los valores de voltaje obtenidos en la simulación mediante los perfiles de voltaje obtenidos en el modelo medido y el modelo simulado.

Para la validación se tomaron cuatro índices de error detallados en la Tabla 2.4. Presentando resultados de validación tanto en la Figura 3.23 y Figura 3.24.

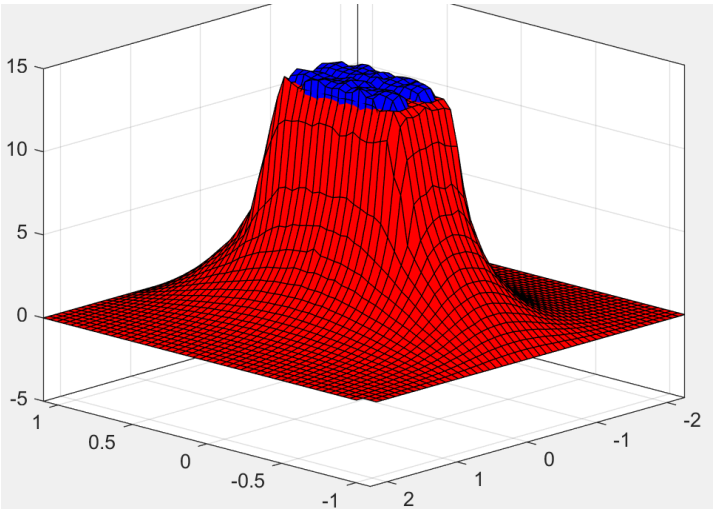


Figura 3.23. Vista lateral de la simulación de los errores del modelo real en color azul y el modelo simulado en color rojo

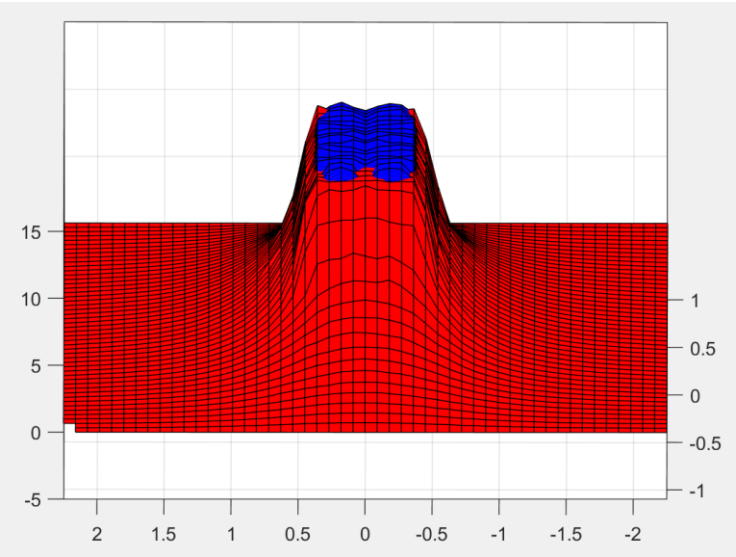


Figura 3.24. Vista frontal de la simulación de los errores del modelo real en color azul y el modelo simulado en color rojo

Se puede observar que el modelo real y el modelo simulado se aproximan bastante entre sí, considerando los errores de medición que pudo presentar el experimento al momento de realizar las mediciones, así como los errores de la simulación de FEM. También hay que tomar en cuenta la calibración de los equipos de medida, así también como errores humanos que pueden presentarse en el desarrollo de un proyecto.

Analizando los datos de la Tabla 3.1 se puede constatar los indicadores de error para los valores medidos en el caso base y la simulación, además son sumamente aceptables.

El valor RMSE es la raíz del error cuadrático medio, adicionalmente es el índice más empleado en modelos físicos; ponderando los pronósticos más alejados al valor medido. Presenta un valor de 2.0635 voltios, que es bajo y se puede visualizar en la Tabla 3.1.

El resultado obtenido del error medio absoluto o MAE calcula la magnitud promedio del error obtenido entre los datos estimados por el modelo y los datos medidos. En el caso del experimento presenta un valor 1.7882 voltios, que es bajo y aceptable.

El indicador MAPE presenta un valor del 12.3242% que es aceptable para una aproximación, midiendo el error promedio de las estimaciones.

Finalmente, como último indicador se presenta un error relativo en porcentaje igual al 3.2529% que es aceptable y bajo.

Todos estos valores de los indicadores significan que el modelo simulado y la realidad están bastante cerca, por lo que se puede aceptar el modelo de ANSYS como válido para analizar un SPAT mediante FEM, y una vez validado se procede entonces a simular casos de estudio reales.

Tabla 3.1. Resultados de los tipos de errores aplicados

INDICES DE ERROR	RESULTADO
RMSE	2.0635 [V]
MAE	1.7882 [V]
Error relativo en porcentaje	3.2529 %
MAPE	12.3242 %

Como se puede visualizar en la Figura 3.25 se presentan los resultados del voltaje eléctrico aplicado en el caso base del experimento.

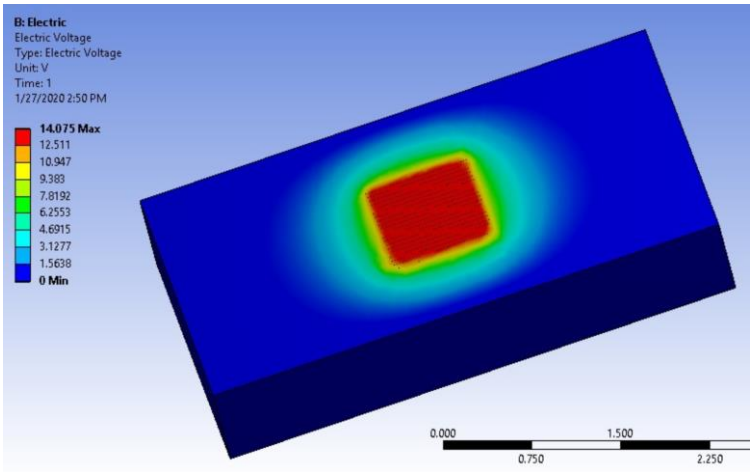


Figura 3.25. Resultados del voltaje eléctrico del caso base del experimento.

En la Figura 3.26 se puede visualizar desde una perspectiva ubicada sobre el experimento, las curvas equipotenciales que se producen para despejar la corriente de falla en el suelo.

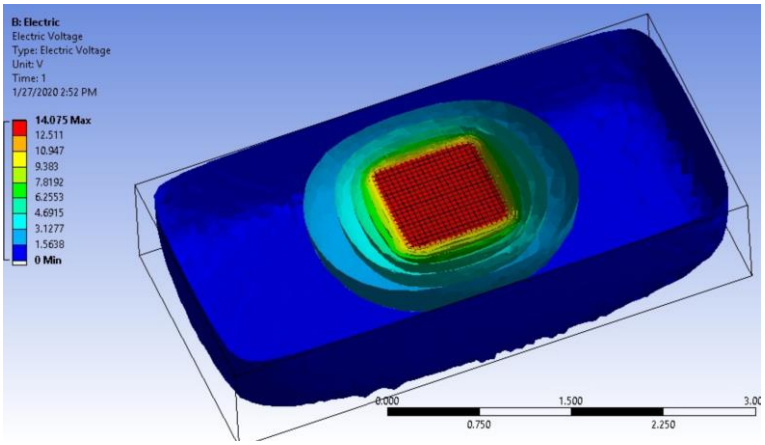


Figura 3.26. Resultados del voltaje eléctrico del caso base del experimento visualizando como curvas equipotenciales de voltaje desde una perspectiva A.

En la Figura 3.27 se presenta una perspectiva diferente del experimento, logrando visualizar de perfil las curvas equipotenciales.

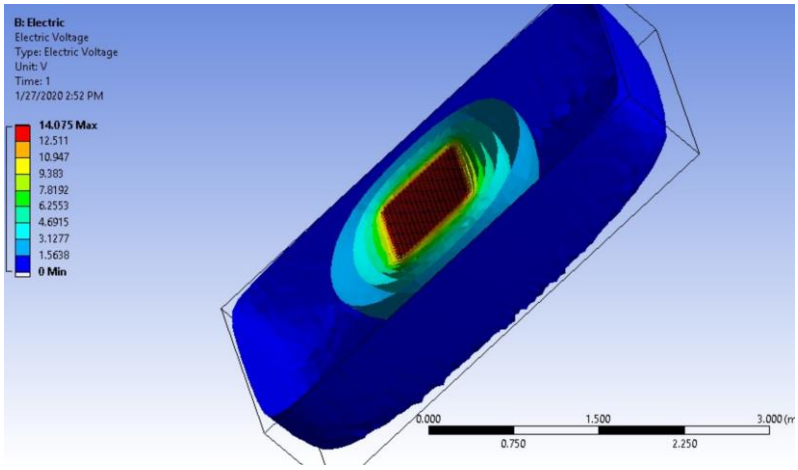


Figura 3.27. Resultados del voltaje eléctrico del caso base del experimento visualizando como curvas equipotenciales de voltaje desde una perspectiva B.

3.4. RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

En Tabla 3.2 se define los datos de entrada que se ingresaron en el sistema. Adicionalmente, se define que la resistividad del suelo de la capa 1 sea mayor a la resistividad del suelo de la capa 2. La malla fue ubicada 0.6 metros sobre el nivel del agua, y la temperatura del agua fue establecida para este estudio en un valor de 22 °C. Todas estas consideraciones fueron realizadas para todos los casos de estudio detallados en la tabla

Tabla 3.2. Datos de entrada para realizar la simulación del modelo de puesta a tierra

	Resistividad suelo capa 1	Resistividad suelo capa 2	Profundidad entierro malla	Temperatura del agua
Caso A	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso B	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso C	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso D	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso E	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso F	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso G	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso H	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso I	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso J	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso K	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso L	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso M	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso N	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso O	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C
Caso P	4500 Ω-m	400 Ω-m	0.6 m	22 °C

Una vez definidas las características del mallado de la simulación, se obtuvo el número de elementos finitos y cantidad de elementos de las configuraciones geométricas cuadrada, triangular, y circular. La Tabla 3.3 contempla los valores obtenidos en los casos de estudio de las simulaciones.

Tabla 3.3. Resultados de la simulación de número de elementos finitos y de la cantidad de elementos

	Número de elementos finitos	**Cantidad de elementos**
Caso A	3922505	2567037
Caso B	3922505	2567037
Caso C	3922505	2567037
Caso D	3922505	2567037
Caso E	3922505	2567037
Caso F	3922505	2567037
Caso G	3922505	2567037
Caso H	3922505	2567037
Caso I	3125741	3125741
Caso J	3125741	3125741
Caso K	3125741	3125741
Caso L	3125741	3125741
Caso M	2348906	2348906
Caso N	2348906	2348906
Caso O	2348906	2348906
Caso P	2348906	2348906

En la Tabla 3.4 se presentan los resultados de la simulación realizada a los casos de estudio, obteniendo el voltaje máximo del suelo que se presenta en el conductor, el volumen, y también el calentamiento producido.

Tabla 3.4. Resultados de la simulación obteniendo voltajes máximos, volumen, calentamiento.

	Voltaje máximo del cuerpo [V]	**Volumen $[m^3]$**	**Calentamiento $[W/m^3]$**
Caso A	564570	91208	2677000
Caso B	282280	91208	669410
Caso C	564580	91208	6314900
Caso D	282290	91208	1578700
Caso E	565320	91208	3640400
Caso F	282660	91208	910100
Caso G	565340	91208	9370700
Caso H	282670	91208	2342700

	Voltaje máximo del cuerpo [V]	Volumen $[m^3]$	Calentamiento $[W/m^3]$
Caso I	898730	87731	3796300
Caso J	449360	87731	949070
Caso K	899489	87731	11188000
Caso L	449740	87731	2797000
Caso M	774350	91208	9314700
Caso N	387170	91208	2328600
Caso O	771530	91208	12811000
Caso P	385770	91208	3202800

Una vez obtenidos los datos de la simulación se procede a calcular la potencia disipada y la resistencia de puesta de malla a tierra es calculada a partir de la potencia disipada en la ecuación (3.1) tabulándose en la Tabla 3.5 [22].

$$R_I = \frac{(Voltaje)^2}{Potencia\ disipada} \tag{3.1}$$

Tabla 3.5 Tabla de resultados de la potencia disipada y de la resistencia de la puesta de malla a tierra

	Voltaje máximo del suelo [V]	Potencia disipada [W]	Resistencia [Ω]
Caso A	504380	244163816000	1.0419201
Caso B	252190	61055547280	1.0416711
Caso C	504370	575969399200	0.4416712
Caso D	252190	143990069600	0.4416957
Caso E	505140	332033603200	0.7684958
Caso F	252570	83008400800	0.7684958
Caso G	505140	8546828205600	0.2985510
Caso H	252570	213672981600	0.2985478
Caso I	849210	333053195300	2.1652926
Caso J	424610	83262860170	2.1653550
Caso K	849950	981534428000	0.7360058
Caso L	424980	245383607000	0.7360231
Caso M	657840	849575157600	0.5093763
Caso N	328910	212386948800	0.5093618
Caso O	655440	1168465688000	0.3676630
Caso P	327720	292120982400	0.3676573

Se define el voltaje de paso tolerable y voltaje de toque tolerable existiendo límites tolerables. Los limites están divididos en dos subgrupos, para una persona de 50 kilogramos de peso y para una persona de 70 kilogramos de peso [23].

Para el voltaje de paso tolerable se define de la siguiente manera:

Para una persona con un peso corporal de 50 kg descrita en la ecuación (3.2):

$$V_{paso50} = (1000 + 6\, C_s . \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \tag{3.2}$$

Para una persona con un peso corporal de 70 kg descrita en la ecuación (3.3):

$$V_{paso70} = (1000 + 6\, C_s . \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \tag{3.3}$$

De la misma manera, el voltaje de toque tolerable está definido de la siguiente manera:

Para una persona con un peso corporal de 50 kg descrita en la ecuación (3.4):

$$V_{toque\ 50} = (1000 + 1.5\, C_s . \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \tag{3.4}$$

Para una persona con un peso corporal de 70 kg descrita en la ecuación (3.5):

$$V_{toque70} = (1000 + 1.5\, C_s . \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \tag{3.5}$$

Donde se tiene que cada una de las variables de las ecuaciones son:

V_{paso} = Voltaje de paso en voltios

V_{toque} = Voltaje de toque en voltios

ρ_s = Resistividad de la superficie del material en Ω-m

ρ = Resistividad de la tierra bajo el material de la superficie en Ω-m

t_s = Duración de la falla en segundos

El factor de corrección C_s sirve para calcular la resistencia efectiva y se calcula con la ecuación (3.6):

$$C_s = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \tag{3.6}$$

Se debe considerar que, para el caso de estudio experimental propuesto, no existe una capa superficial de protección. Por lo que $C_s = 1$ y $\rho_s = \rho$. En la Tabla 3.6 se puede

observar los valores tolerables calculados para una persona de 50 kilogramos y para una persona de 70 kilogramos.

Tabla 3.6. Tabla de resultados de la obtención de los voltajes de paso y voltajes de toque tolerables aplicando las definiciones.

	Voltaje de paso tolerable [V]		**Voltaje de toque tolerable [V]**	
	50 [kg]	**70 [kg]**	**50 [kg]**	**70 [kg]**
Caso A	3248	4396	899	1216.75
Caso B	3248	4396	899	1216.75
Caso C	3248	4396	899	1216.75
Caso D	3248	4396	899	1216.75
Caso E	3248	4396	899	1216.75
Caso F	3248	4396	899	1216.75
Caso G	3248	4396	899	1216.75
Caso H	3248	4396	899	1216.75
Caso I	3248	4396	899	1216.75
Caso J	3248	4396	899	1216.75
Caso K	3248	4396	899	1216.75
Caso L	3248	4396	899	1216.75
Caso M	3248	4396	899	1216.75
Caso N	3248	4396	899	1216.75
Caso O	3248	4396	899	1216.75
Caso P	3248	4396	899	1216.75

Finalmente, como variables de salida. Se procede a obtener de las simulaciones los voltajes de paso, voltajes de toque, y el GPR. Definidos en la sección de marco teórico en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Tabla de resultados de la obtención de los voltajes de paso, voltajes de toque y GPR de las simulaciones de ANSYS.

	Voltaje de paso [V]	**Voltaje de toque [V]**	**GPR [V]**
Caso A	87085	159400	504380
Caso B	43540	79700	252190
Caso C	87092	159380	504370
Caso D	43540	79700	252190
Caso E	87119	159470	505140
Caso F	43556	79731	252570
Caso G	87120	159450	505140
Caso H	43556	79724	252570
Caso I	187970	781060	849210
Caso J	93988	390540	424610
Caso K	188010	781200	849950
Caso L	94011	390610	424980
Caso M	162640	458260	657840
Caso N	81318	229120	328910

	Voltaje de paso [V]	Voltaje de toque [V]	GPR [V]
Caso O	162040	456570	655440
Caso P	81018	228290	327720

3.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez obtenidos los indicadores, es posible estudiar el comportamiento de las mallas de puesta a tierra de los casos de estudio propuestos en donde varia la geometría, el material y el suelo generando un conocimiento practico aplicable.

Como resultados de la simulación se tiene que el número de elementos finitos en las mallas cuadradas que comprende desde el caso A hasta el caso H es de 3922505, mientras que para el caso de las mallas triangulares este valor disminuye a 3125741, y para el caso de la malla circular esta malla obtiene un valor de 2348906. Como es posible visualizar estos resultados en la Tabla 3.3. Analizando estos resultados podemos determinar que una malla cuadrada posee un número más elevado de unión de elementos, conocidos como nodos, en relación con la malla triangular y circular. Esto debido al área mayor que representa.

Considerando la cantidad de elementos de estas configuraciones geométricas se obtiene la cantidad de elementos de estas mallas cuadradas, triangulares y circulares. Se posee una malla triangular posee una cantidad de elementos mayor respecto a la malla cuadrada y circular.

3.5.1. VOLTAJE MÁXIMO DE LOS CUERPOS SIMULADOS

Por medio de los resultados obtenidos, se puede determinar que el voltaje máximo al simular el cuerpo, que en este caso consiste en dos capas de suelo y la malla, es distinto al de la capa superficial, esto se observa en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5.

Adicionalmente, se determina que en una malla de puesta a tierra que posee la misma configuración geométrica, el mismo material, y es sometida a la misma cantidad de corriente se presenta un fenómeno interesante. En el caso específico de la Figura 3.28 y de la Figura 3.29; en las cuales se detalla una puesta de malla a tierra. Ambas simulaciones con configuración geométrica cuadrada, con el mismo material que es el cobre de resistividad 1.694E-08 Ω-m, ambos con dos capas de suelo donde la capa superior posee una resistividad de 4500 Ω-m, y la resistividad del suelo de la capa inferior es de 400 Ω-m, sometidos a una corriente igual de 10 kA de magnitud, pero con un lugar de inyección distinta de corriente. En el primer caso de la Figura 3.28 la inyección de la corriente se dio

por una esquina de la malla, mientras que en el caso de la Figura 3.29 se dio la inyección de la corriente por la parte central de la malla de puesta a tierra.

En la Figura 3.28 y Figura 3.29 se observa ambas capas de suelo, la capa superior e inferior. Así también la distribución de las curvas equipotenciales al contorno de la malla de puesta a tierra.

Basado en lo expuesto anteriormente, se puede inferir que no es determinante el punto de inyección de la corriente en la malla. Esto quiere decir que se mantendrá el mismo nivel máximo de voltaje. Se cumple si se mantiene la configuración geométrica, la resistividad del material, y el valor de corriente constantes y se puede constatar también en el resto de los casos, como por ejemplo en el caso B – D, y el caso E – G.

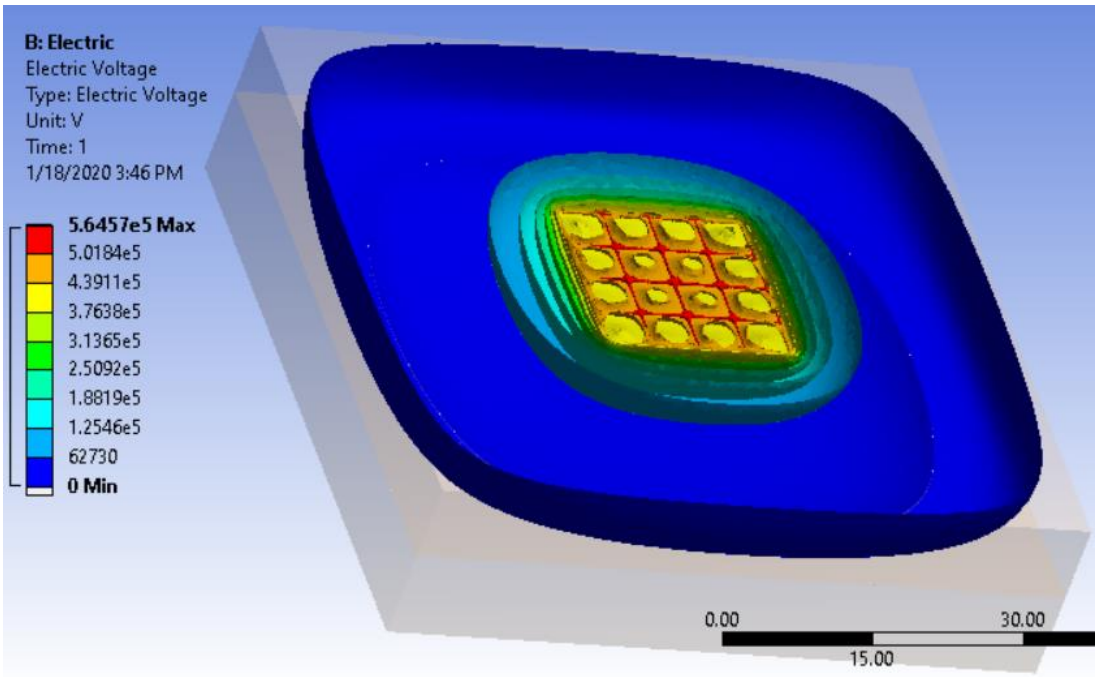


Figura 3.28. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio A.

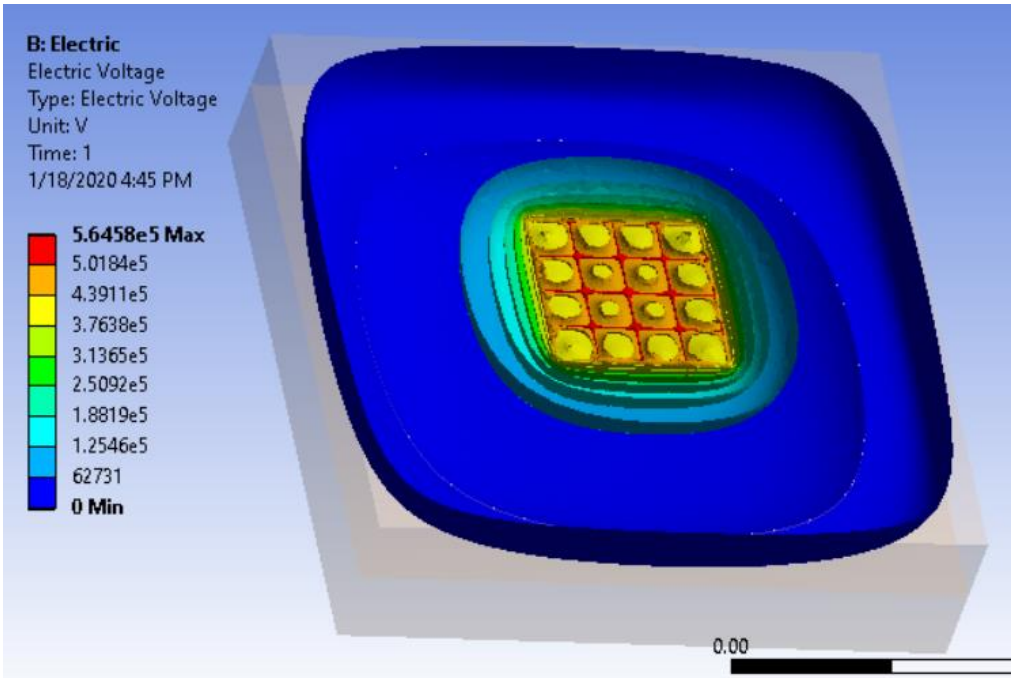


Figura 3.29. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio C.

3.5.2. RESULTADOS DE VOLTAJES DE LOS CUERPOS SIMULADOS

De las Figura 3.30, a la Figura 3.43 se aprecia como se disipa la corriente en el suelo. Se observa los valores de voltaje eléctrico que adquiere el suelo y la malla de puesta a tierra. Cómo se distribuyen estos voltajes formando unas curvas equipotenciales a lo largo de la piscina. Se logra determinar que dentro de la malla existen los valores más elevados de voltaje eléctrico, yendo desde su valor máximo ubicado dentro de la malla de puesta a tierra hasta llegar al valor mínimo en condiciones de frontera.

Desde la Figura 3.30 a la Figura 3.35, se visualiza las mallas de configuración geométrica cuadrada simuladas en los casos de estudio definidos en la Tabla 2.9.

Desde la Figura 3.36 a la Figura 3.39, se visualizan las mallas de configuración geométrica triangular simuladas definidas previamente en los casos de estudio de la Tabla 2.9.

Desde la Figura 3.40, a la Figura 3.43, se observa las mallas de configuración geométrica cuadradas simuladas definidas previamente en los casos de estudio de la Tabla 2.9.

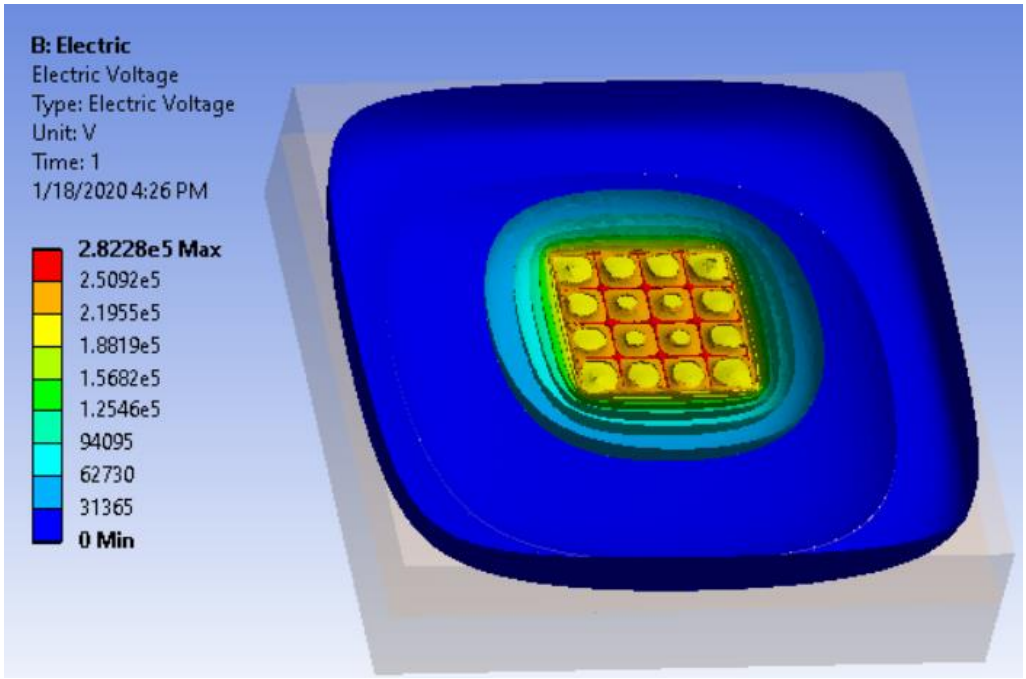


Figura 3.30. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio B.

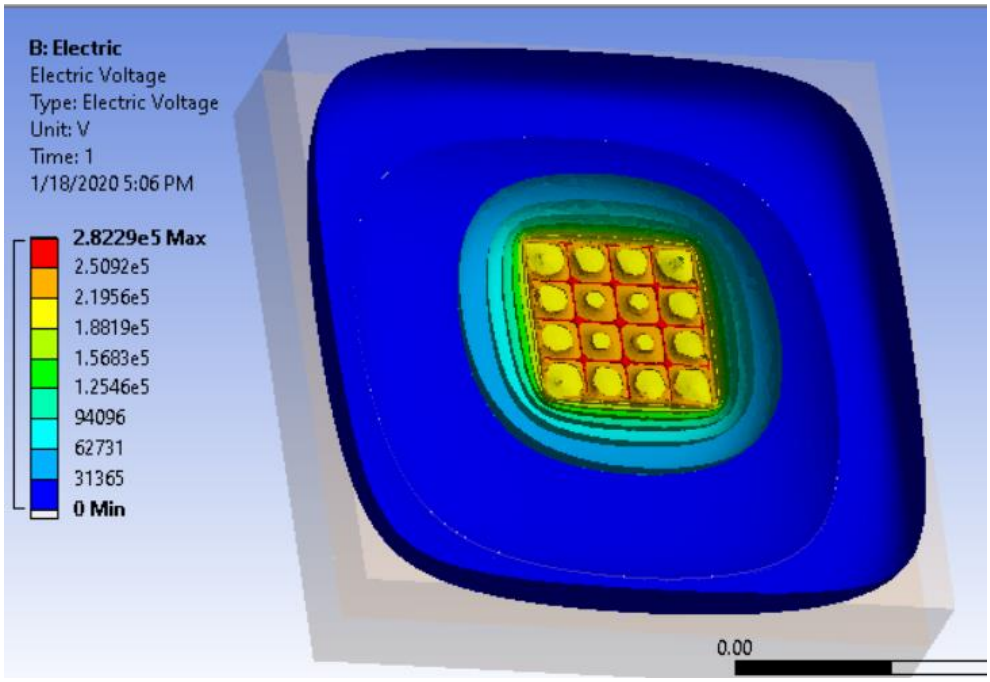


Figura 3.31. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio D.

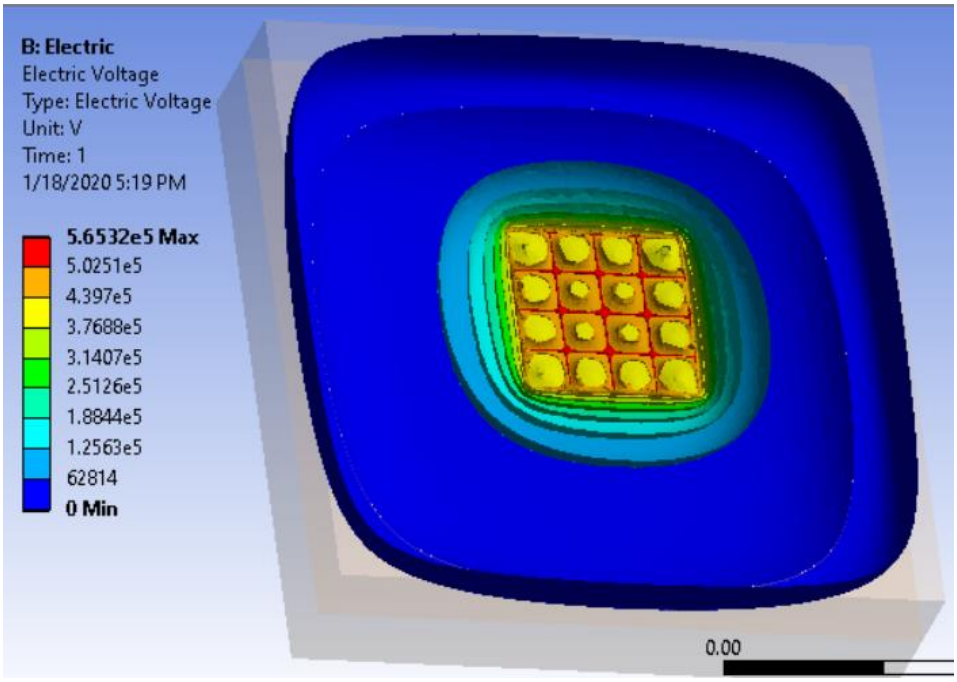


Figura 3.32. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio E.

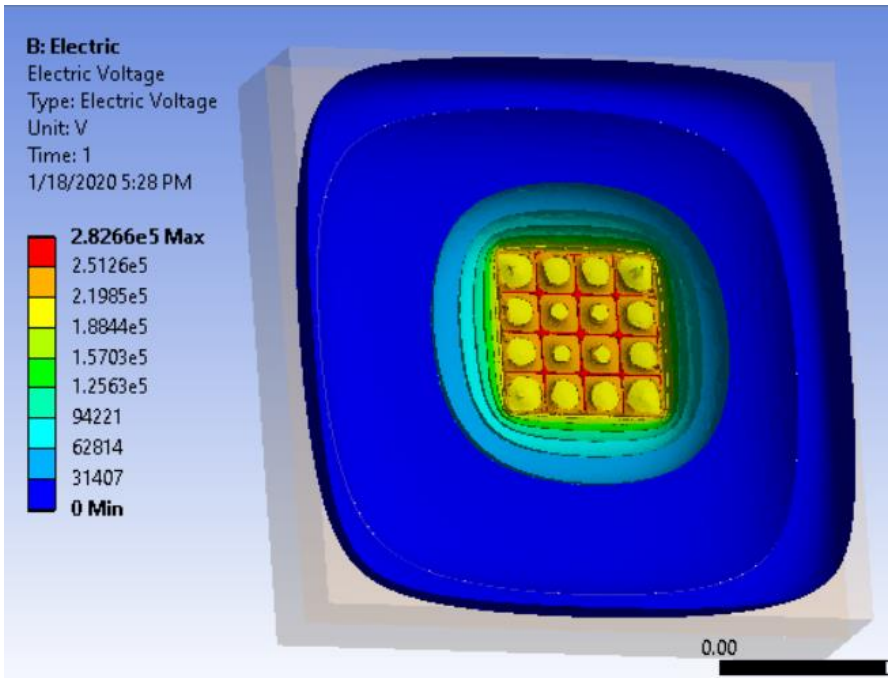


Figura 3.33. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio F.

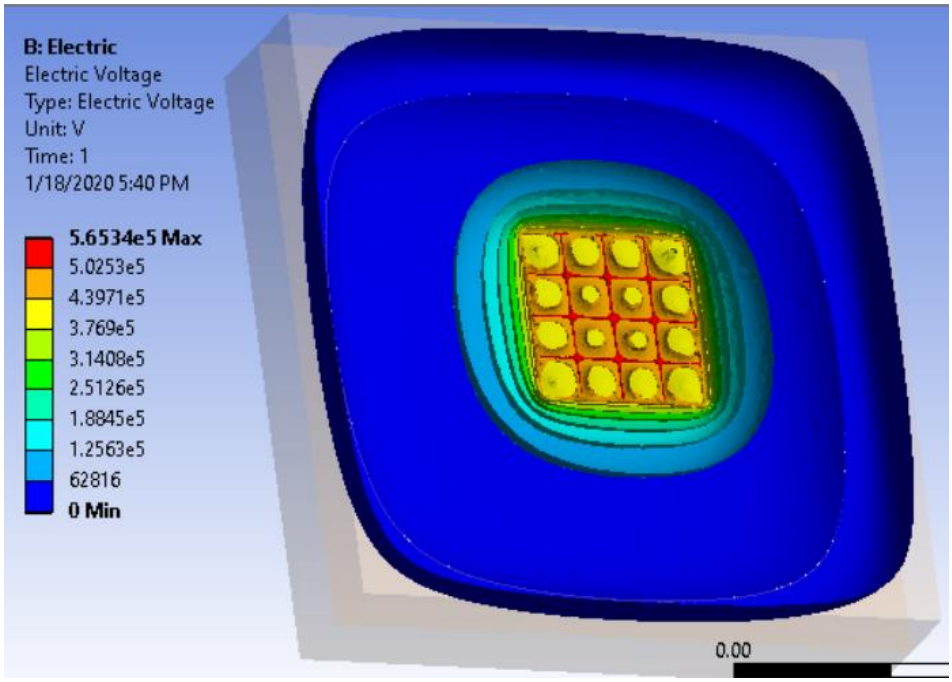


Figura 3.34. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio G.

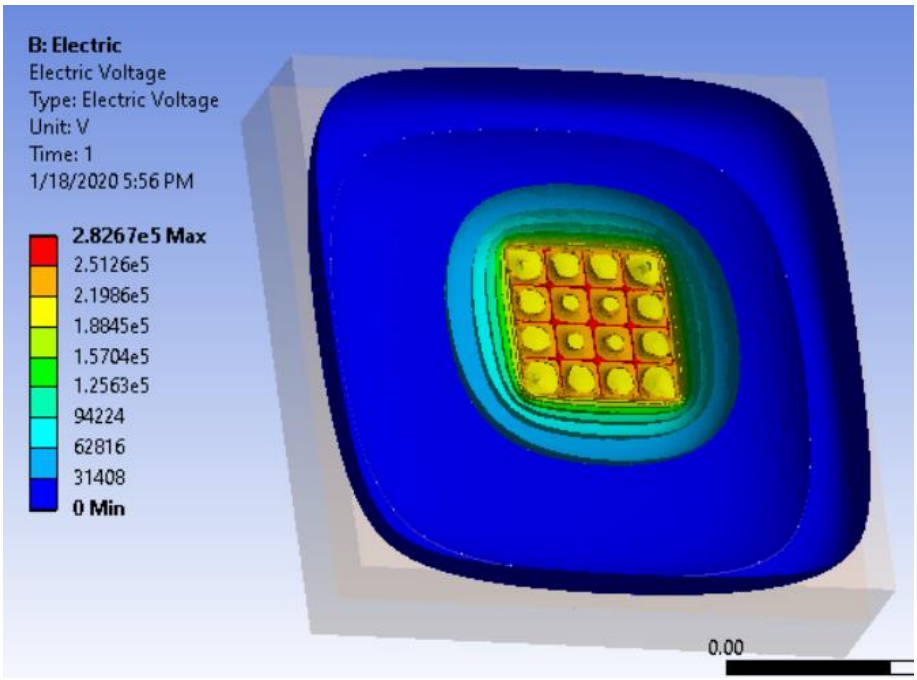


Figura 3.35. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio H.

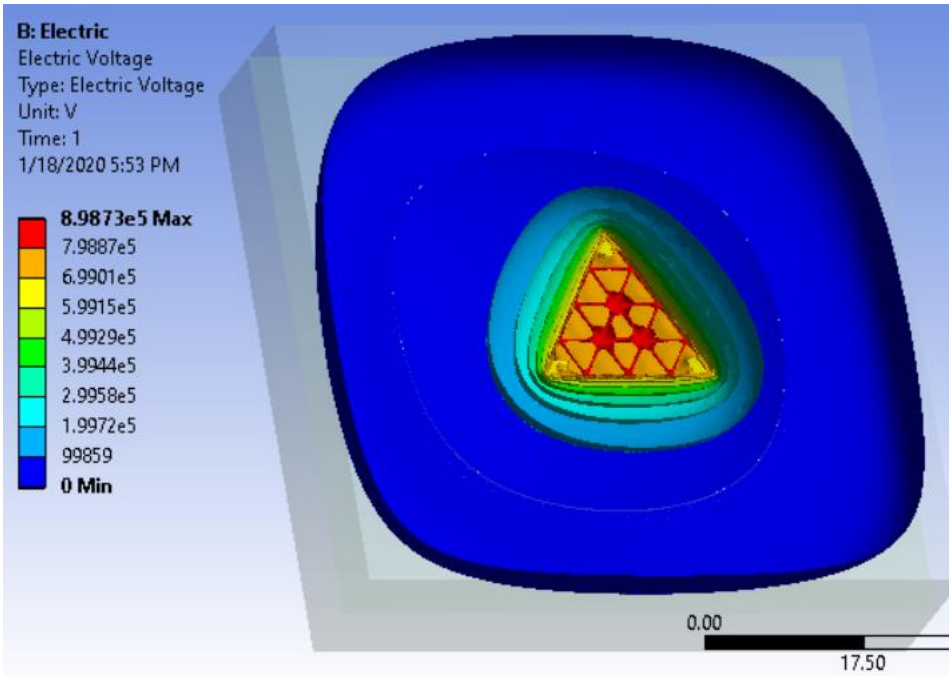


Figura 3.36. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio I.

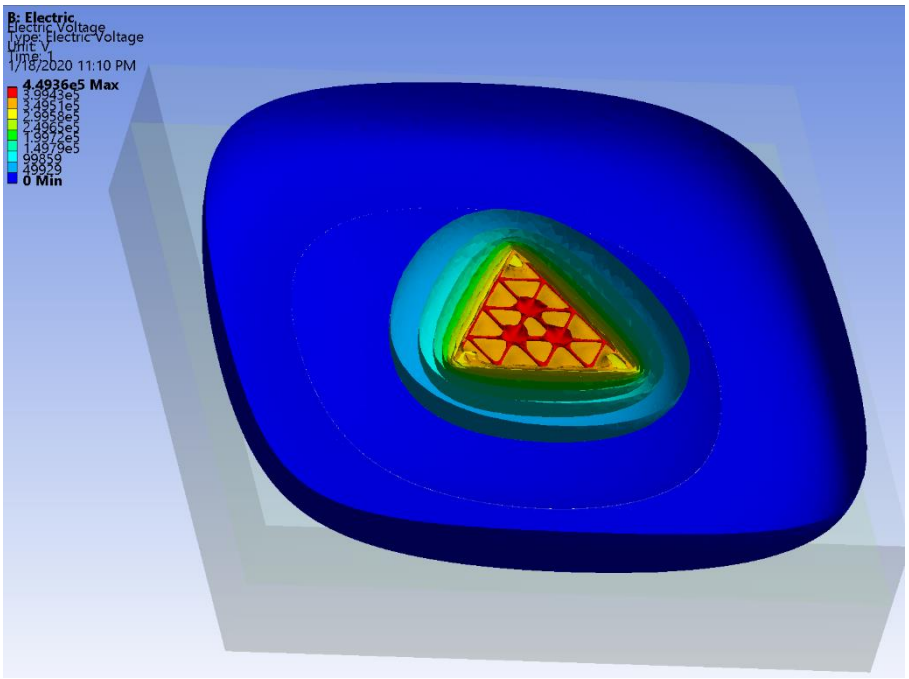


Figura 3.37. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio J.

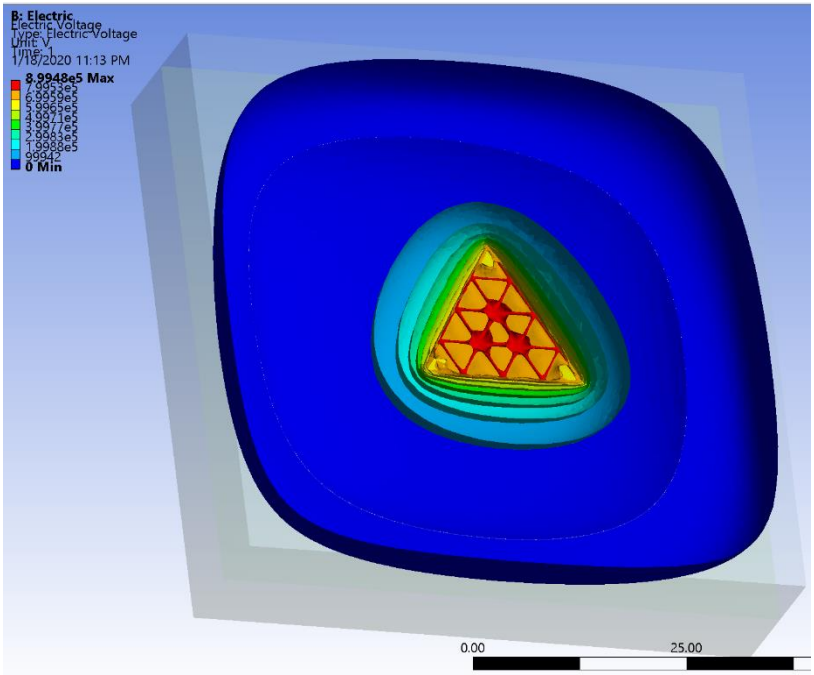


Figura 3.38. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio K.

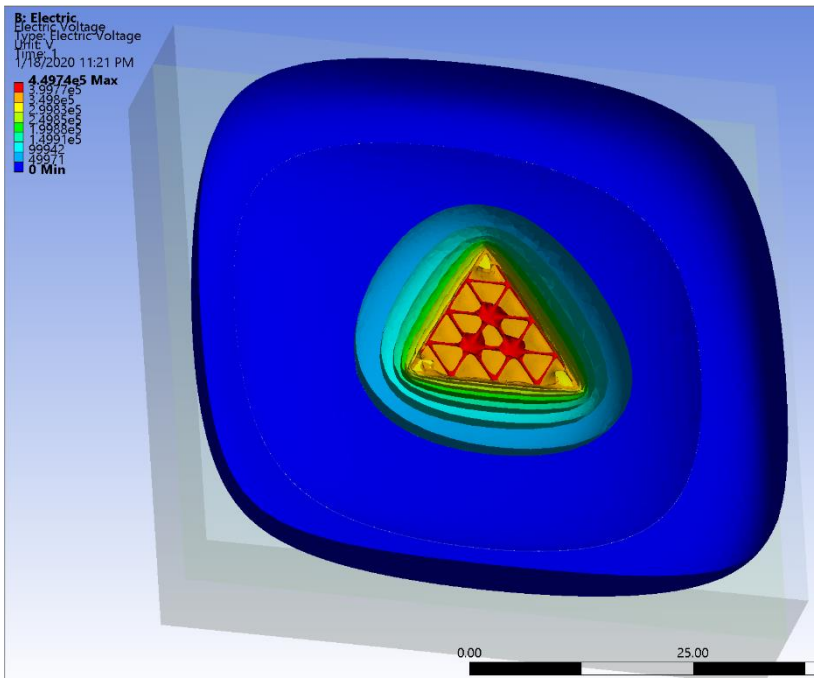


Figura 3.39. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio L.

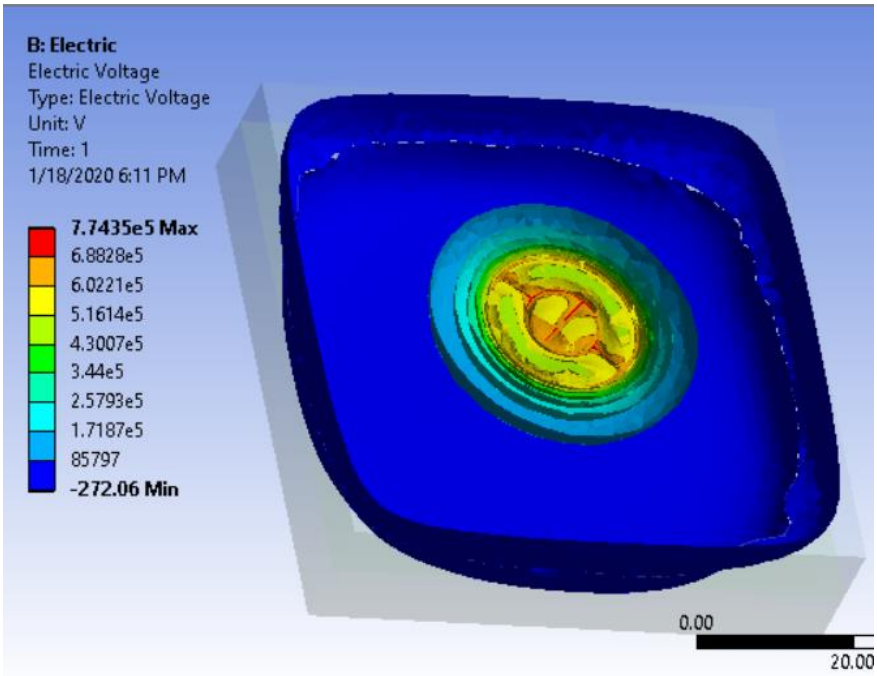


Figura 3.40. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio M.

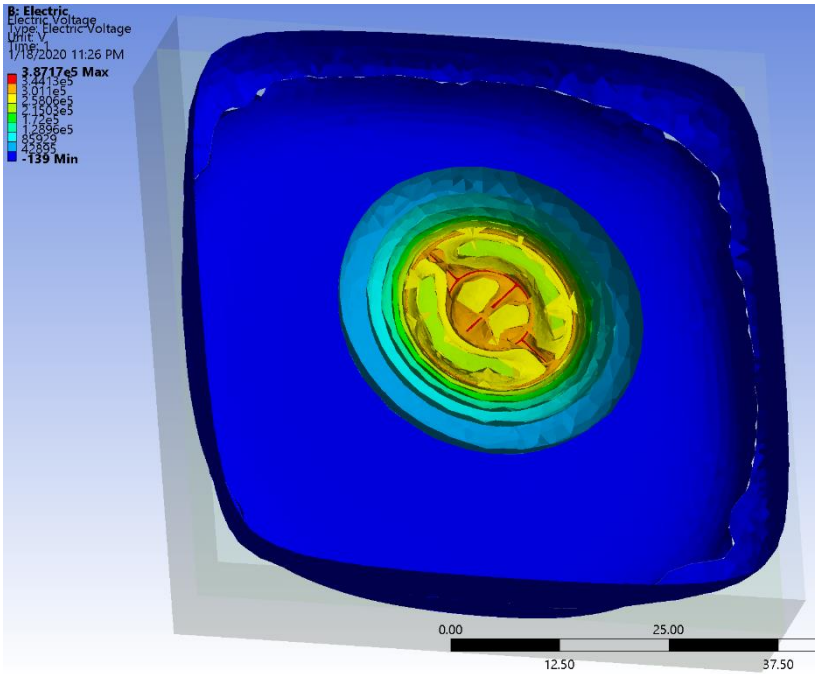


Figura 3.41. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio N.

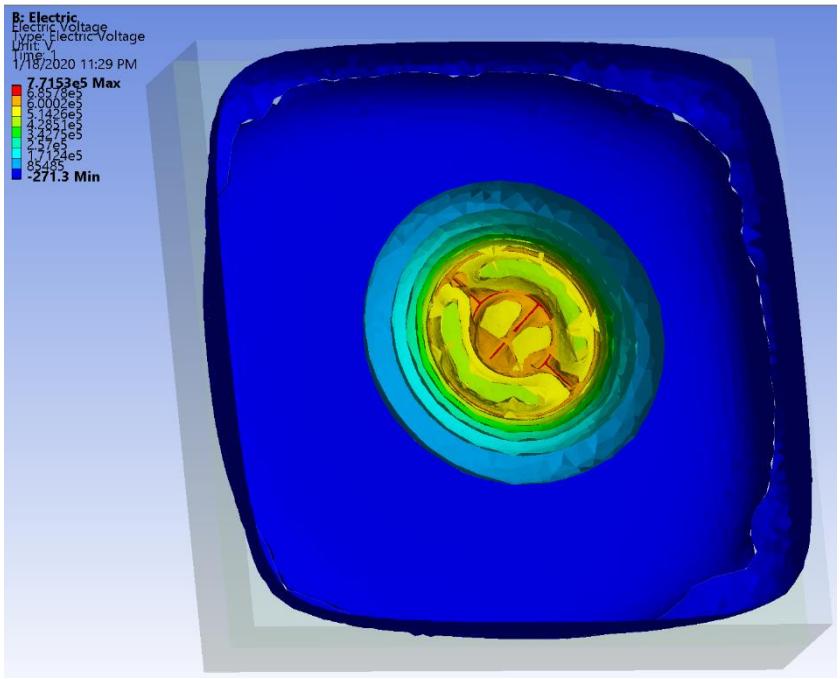


Figura 3.42. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio O.

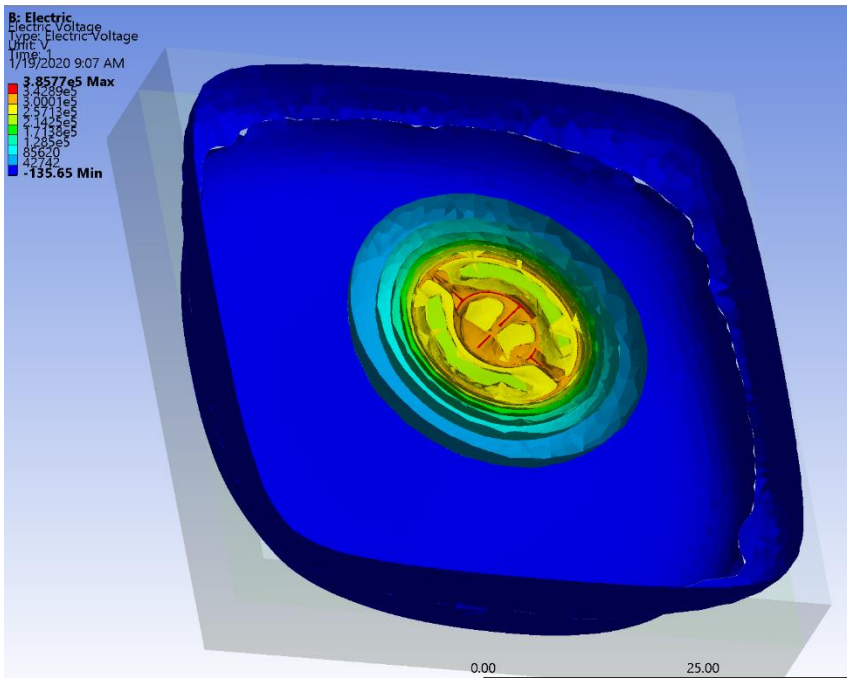


Figura 3.43. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio P.

3.5.3. VOLTAJE MAXIMO DE LA SUPERFICIE DEL SUELO (GPR)

El voltaje máximo de la superficie del suelo es el voltaje que se produce únicamente en la capa superficial del suelo en donde se encuentra enterrada la malla de puesta a tierra.

Estos voltajes tienen una relación similar a los voltajes de todo el cuerpo que se simuló, con la diferencia que son de menor valor.

Basado en lo expuesto anteriormente en la sección 3.5.1, se logra determinar que no es concluyente el punto de inyección de la corriente en la malla; esto quiere decir que se mantendrá el nivel máximo de voltaje. De esta manera se cumple si se mantiene la configuración geométrica, la resistividad del material, y el valor de corriente constantes.

En la Figura 3.44 se puede observar la ubicación del GPR en dos dimensiones en una malla de puesta a tierra, considerado como el valor máximo que puede alcanzar en relación con un punto de tierra distante. Mientras que en la Figura 3.45 se tiene el voltaje visto únicamente en la capa superficial del suelo.

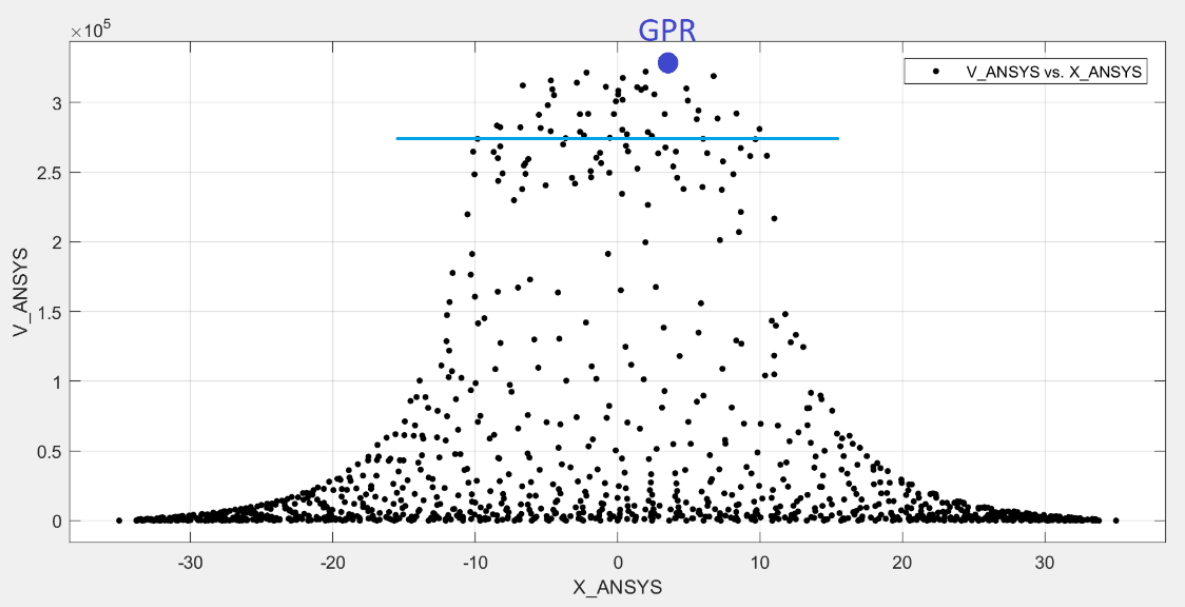


Figura 3.44. Ubicación del GPR en una malla de puesta a tierra de configuración geométrica caso de estudio P

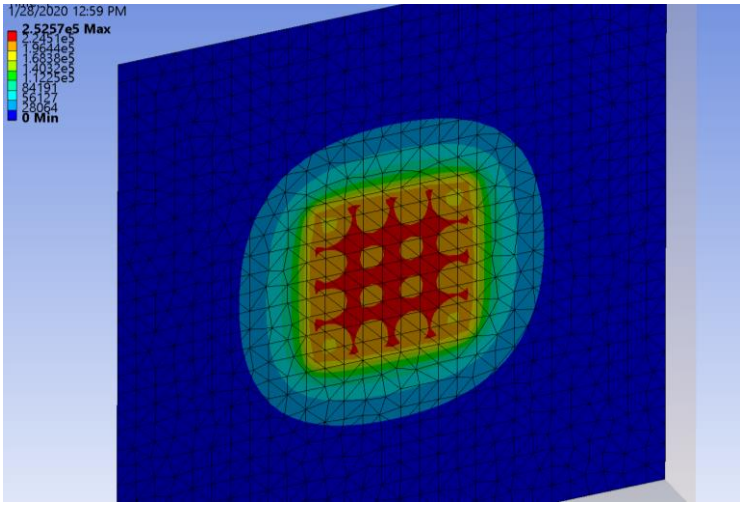


Figura 3.45. Resultados de voltaje eléctrico del caso de estudio H. Visto únicamente en la capa superficial del suelo.

3.5.4. RESISTENCIA DE LA PUESTA DE MALLA A TIERRA

Analizando una malla de puesta a tierra que posee la misma configuración geométrica, el mismo material y el punto por el cual ingresa la corriente a la malla es el mismo, genera un resultado peculiar.

En el caso específico de la Figura 3.32 y Figura 3.33, de malla de puesta a tierra de configuración cuadrada, material de aluminio, numero de capas 2, la corriente es inyectada en la parte central de la malla; se diferencian únicamente en el siguiente aspecto el caso E la corriente es de 10 kA y en el caso F la corriente es de 5 kA.

Ambas simulaciones presentan el mismo volumen, pero diferente voltaje máximo.

De esta manera se puede determinar que el valor de la resistencia de puesta de malla a tierra es independiente del valor de la corriente inyectada al ser calculada por medio de la potencia disipada. Por el contrario, el valor de la resistencia de puesta de malla a tierra varía si se emplean diferentes materiales, geometría, o el lugar de inyección de la corriente varia, tal como se puede visualizar en la Tabla 2.9.

Finalmente, en la resistencia de puesta a tierra influye donde está siendo inyectada la corriente.

Se puede mencionar que la fuente de corriente ve diferentes impedancias según el lugar donde se la inyecte; al inyectarse dos corrientes en el mismo punto se vera la misma impedancia, pero al inyectarla en un punto diferente el valor de impedancia cambiará.

3.5.5. VOLTAJE DE PASO

Para estudiar los resultados de voltaje de paso obtenidos en la Tabla 3.7, se obtiene que en una malla de puesta a tierra que posee la misma configuración geométrica, mismo valor de la corriente, y el punto por el cual ingresa la corriente a la malla es el mismo genera un resultado analizar. En el caso específico de la Figura 3.36 y de la Figura 3.38, de malla de puesta a tierra de configuración triangular, número de capas 2, y un valor de corriente igual a 10 KA, se diferencian en dos aspectos: el caso I el material de construcción el cobre y en el caso K la construcción del material es aluminio.

Se puede concluir que el valor del voltaje de paso máximo no depende en gran medida de la resistividad del material como se puede visualizar por ejemplo en los casos A – E y caso I - K, e independiente del lugar en donde se produzca la falla como en los casos A – C y caso E – G. Pero al tener un distinto valor de corriente o geometría este valor cambia, además depende directamente de la resistividad del suelo.

En el caso experimental el suelo tratado no contaba con una superficie de protección donde $\rho = \rho_s$ definido en la sección 3.4 y el tiempo de duración de la falla se lo tomó como de 1 segundo.

El voltaje de paso según la norma ANSI / IEEE Std 80-2013 está definido para dos casos en específico una persona con un peso de 50 kilogramos y 70 kilogramos. La norma brinda un criterio de voltaje de paso tolerable.

Al analizar los resultados obtenidos Tabla 3.7 y compararlos con los tolerables del caso experimental de estudio Tabla 3.6, se observa que estos valores obtenidos en el caso experimental son mayores a los tolerables. Lo que quiere decir que la malla de puesta a tierra simulada no es segura.

Por lo tanto, si la malla fuera producto de un diseño real se obtendría como evaluación que es insegura y se debería entonces elaborar un diseño adecuado del SPAT que permita cumplir con este valor tolerable, ampliar el área de cobertura de la malla de puesta a tierra o acortar la distancia entre las separaciones de los cables interiores de la malla, puede ser una opción de solución. En la Figura 3.46 es posible visualizar la definición de voltaje de paso, al calcular la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie al tener una distancia determinada de 1 metro.

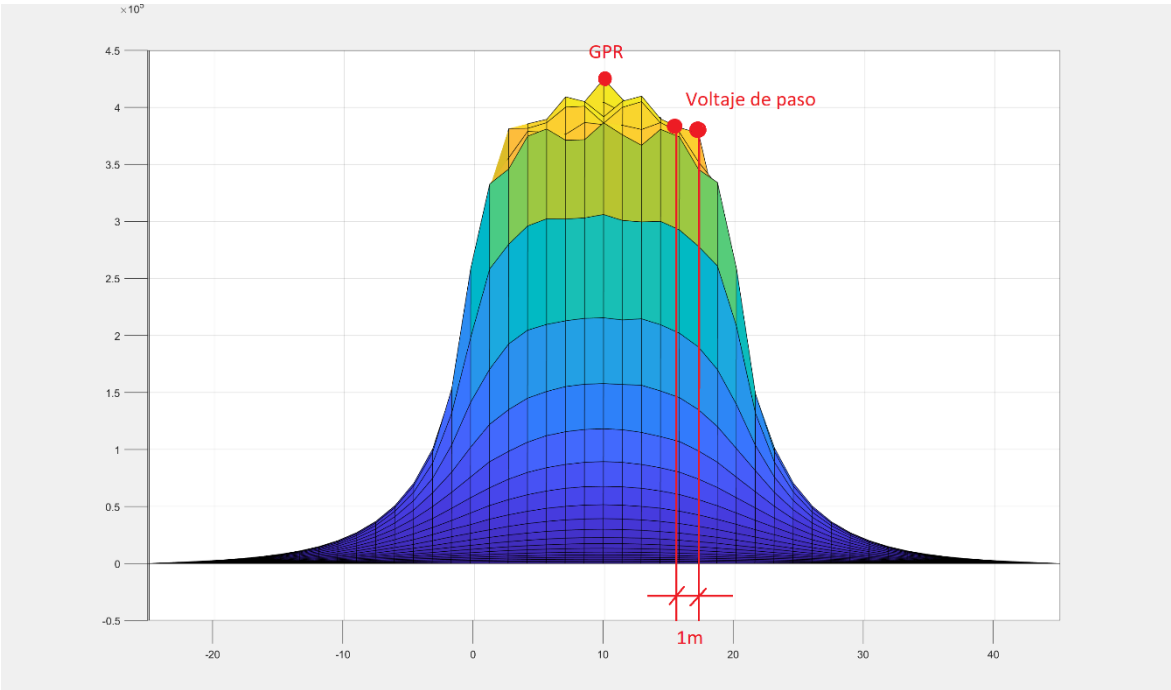


Figura 3.46. Ubicación del voltaje de paso y GPR en una malla de puesta a tierra de configuración geométrica triangular caso de estudio J

3.5.6. VOLTAJE DE TOQUE

Durante el análisis los resultados obtenidos del voltaje de toque máximo en la Tabla 3.7 de las simulaciones realizadas presentan una particularidad: este valor de voltaje de toque es igual en los casos en los cuales la corriente de ingreso a la malla de puesta tierra es la misma.

Es decir, el valor del voltaje de toque máximo se mantiene constante sin importar el lugar por el cual es inyectado. Esto se cumple únicamente si la configuración geométrica se mantiene, si el valor de la corriente es idéntico, y si además depende directamente de la resistividad del suelo. En el caso experimental el suelo tratado no contaba con una superficie de protección donde $\rho = \rho_s$ definido en la sección 3.4 y el tiempo de duración de la falla se lo tomó como de 1 segundo. De tal manera que se presenta un valor de voltaje de toque superior al voltaje de paso, que excede al valor tolerable admisible de voltaje de toque. Se debería hacer cambios y volver a simular para mejorar los diseños.

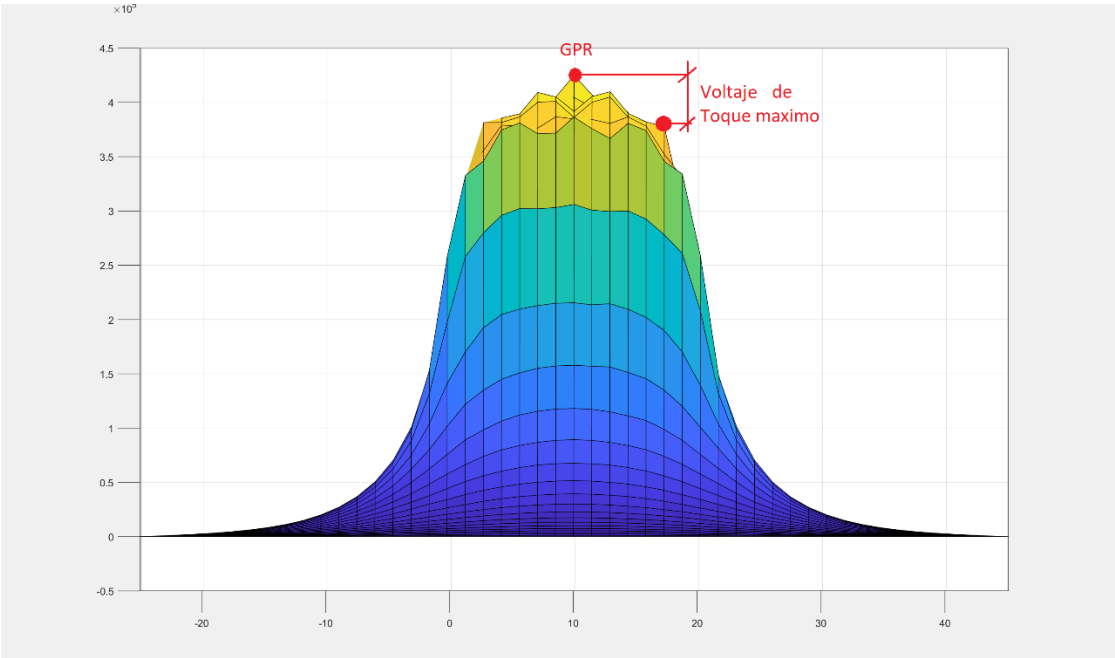


Figura 3.47. Ubicación gráfica del voltaje de toque máximo y GPR en una malla de puesta a tierra de configuración geométrica triangular caso de estudio J

El voltaje de toque según la norma ANSI / IEEE Std 80-2013 está definido para dos casos en específico una persona con un peso de 50 kilogramos y 70 kilogramos. La norma brinda un criterio de voltaje de toque tolerable. Al analizar los resultados obtenidos Tabla 3.7 y compararlos con los tolerables del caso experimental de estudio Tabla 3.8, se observa que estos valores obtenidos en el caso experimental son mayores a los tolerables. Lo que quiere decir que la malla de puesta a tierra simulada no es segura. Por lo tanto, si la malla fuera producto de un diseño real se obtendría como evaluación que es insegura y se debería entonces elaborar un diseño adecuado del SPAT que permita cumplir con este valor tolerable, ampliar el área de cobertura de la malla de puesta a tierra o acortar la distancia entre las separaciones de los cables interiores de la malla, puede ser una opción de solución. Se debería hacer cambios y volver a simular para mejorar los diseños.

En la Figura 3.47 es posible visualizar de mejor manera las características del voltaje de toque máximo, definido como la diferencia entre el GPR y los voltajes en la superficie.

3.6. PERFILES DE VOLTAJE EN TRES DIMENSIONES

Como se observa en las Figura 3.48, Figura 3.49 y Figura 3.50 los perfiles de voltaje toman la forma de su configuración geometría. Es decir, la Figura 3.48 posee una forma

geométrica cuadrangular, la Figura 3.49 posee la forma geométrica de una figura triangular, y finalmente la Figura 3.50 posee una forma geométrica circular.

Las caras donde fue definida la condición de frontera presentan un valor muy cercano a cero, mientras se va acercando el valor a la malla este va aumentando hasta llegar a unos valores picos en el interior de la puesta de malla a tierra.

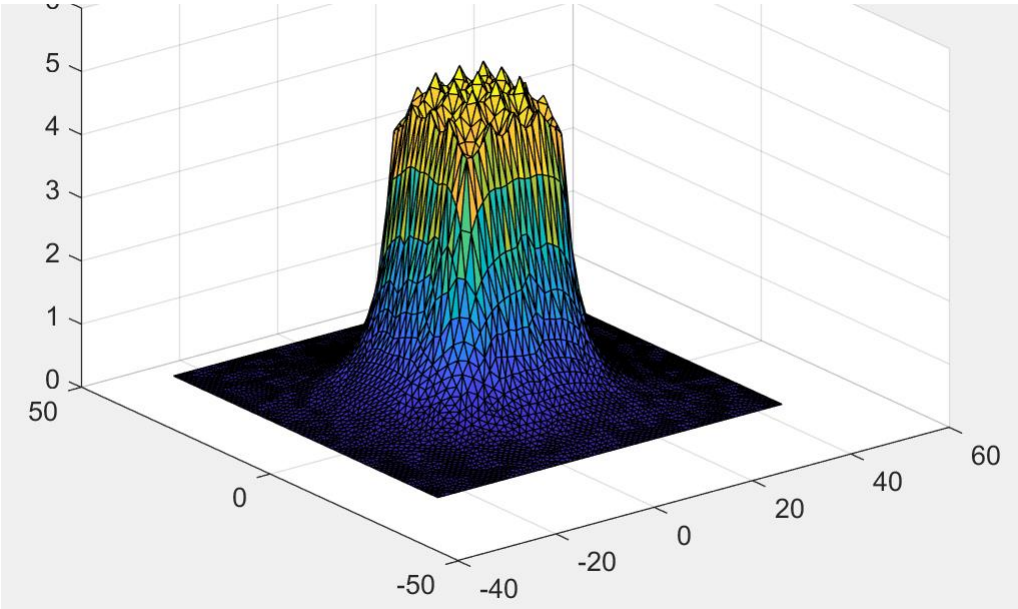


Figura 3.48. Gráfica en tres dimensiones de la malla de puesta a tierra cuadrada caso A

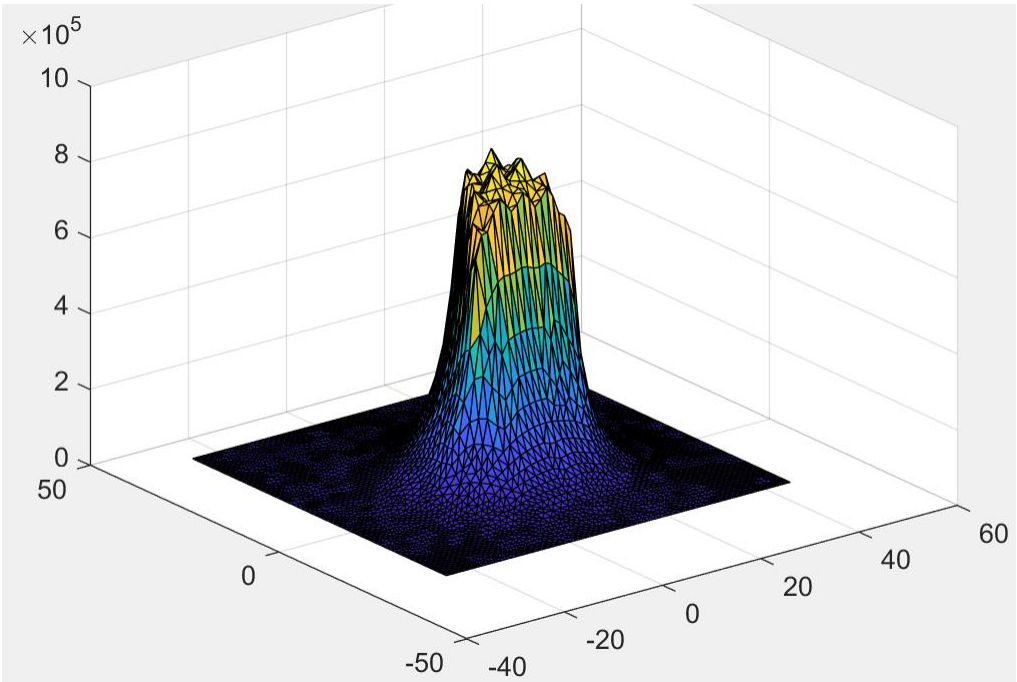


Figura 3.49. Gráfica en tres dimensiones de la malla de puesta a tierra triangular caso K

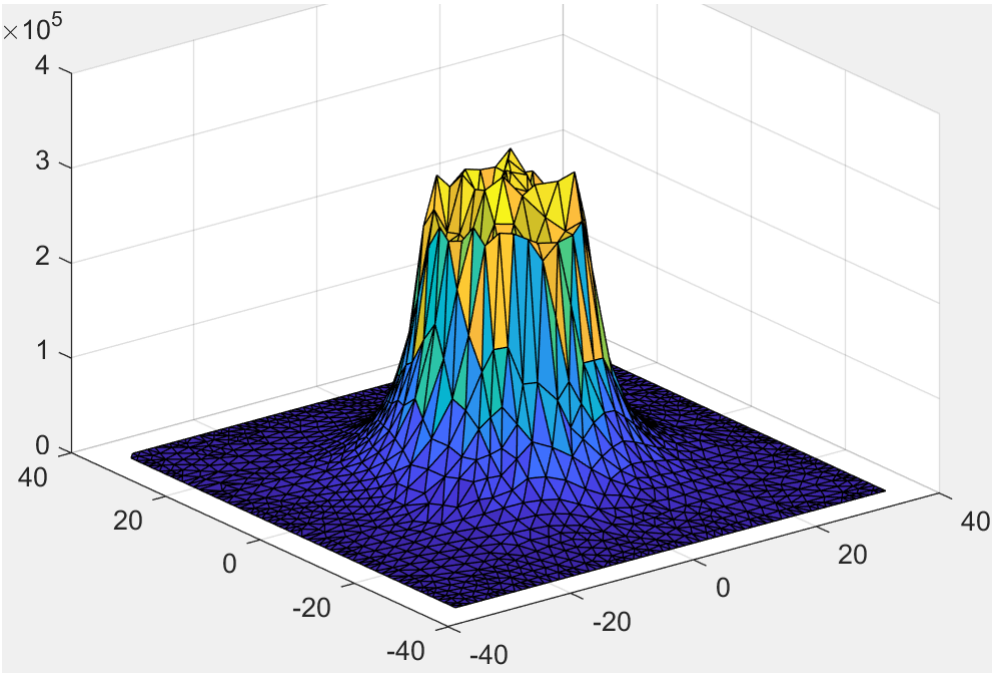


Figura 3.50. Gráfica en tres dimensiones de la malla de puesta a tierra redonda caso P

Al analizar las gráficas de la sección 3.6 se puede observar cómo funciona un SPAT. El perfil de voltaje muestra como la malla de puesta a tierra se eleva de voltaje cuando despeja una falla; cuando existe una descarga que cae por la malla, todos los valores que comprenden el área de la malla suben de voltaje mientras que los lugares lejanos a esta se quedan con un potencial de cero.

Esta elevación del potencial dentro de la malla de puesta a tierra puede ser peligroso para una persona. Si el individuo se encuentra sobre la malla, al caminar sus pasos generan una diferencia de potencial. Si valores obtenidos están sobre los valores de voltaje de paso tolerables generan un alto riesgo para la vida de la persona.

Haciendo uso de los perfiles de voltaje es sencillo visualizar el GPR en la Figura 3.44, el voltaje máximo de toque en la Figura 3.47 y también el voltaje de paso en la Figura 3.46. Estos términos fueron definidos en el marco teórico en la sección 1.3.11.

En la Figura 3.51 se observa una malla de puesta a tierra de configuración geométrica cuadrada en dos ejes de coordenadas: en el eje de las abscisas se encuentra el valor adquirido en las mediciones a lo largo de la coordenada X, mientras que en el eje de las ordenadas el valor de voltaje que brindó la simulación.

La Figura 3.52 detalla una curva de perfil de voltajes de la misma malla, caso J. Se puede observar de la gráfica que los valores de voltaje obtenidos toman la curva característica de la configuración geométrica, en este caso una malla de puesta a tierra cuadrada.

Al comparar el perfil de voltaje de la misma configuración geométrica, tras ser sometido a diferente valor de corriente. Se puede inferir gráficamente que el valor máximo de voltaje se reduce a la mitad al cambiar el valor de la corriente. En la Figura 3.51 y Figura 3.52 el valor de corriente inyectado es de 5 kA, por otro lado en la Figura 3.53 el valor de corriente inyectado en la malla es de 10 kA.

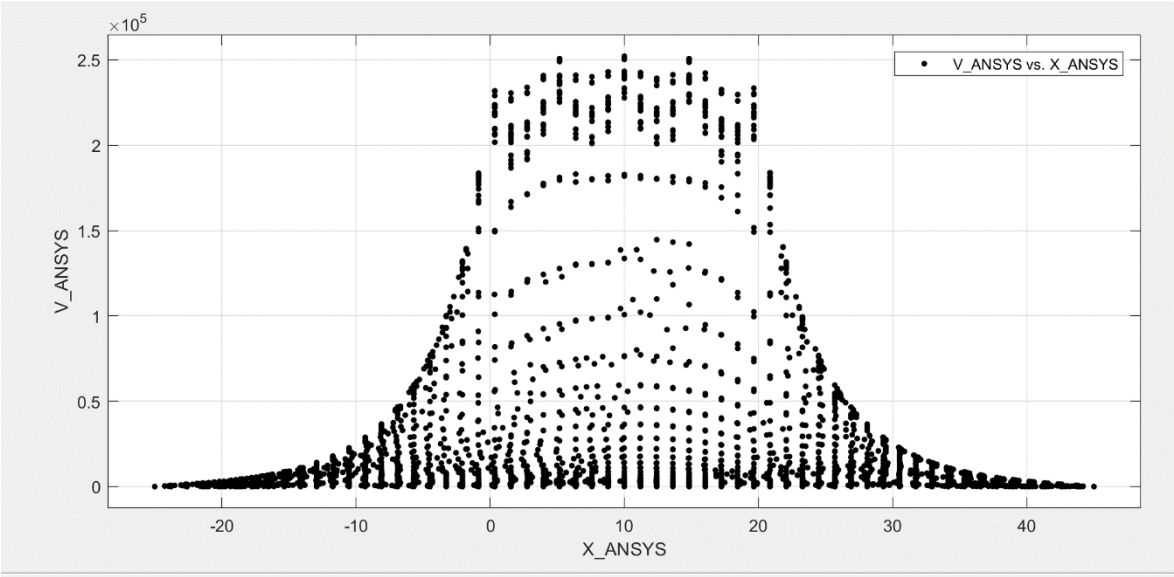


Figura 3.51. Visualización de los datos medidos en la coordenada X versus los voltajes obtenidos. El caso de estudio es el B de una malla de configuración cuadrada.

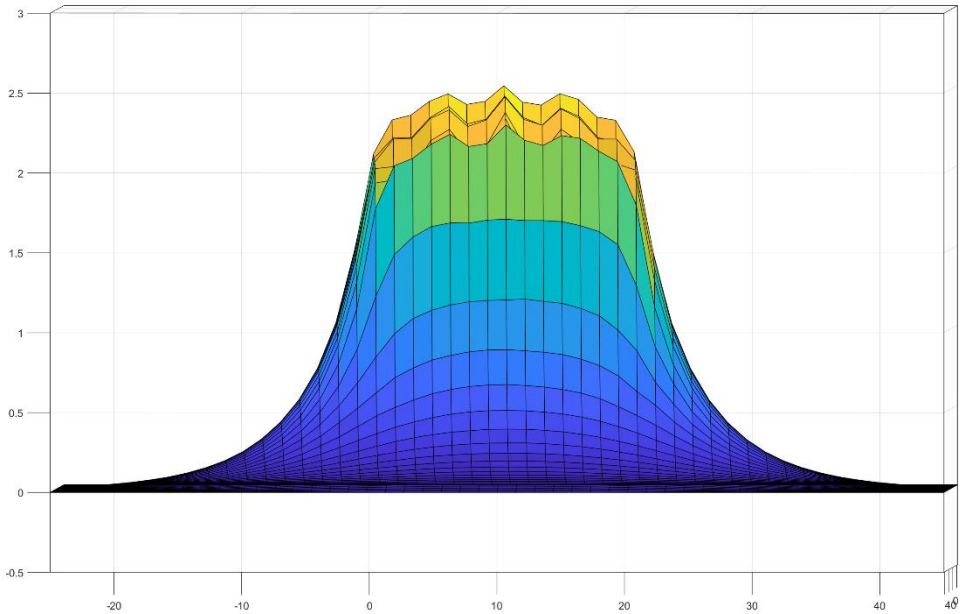


Figura 3.52. Perfil de voltajes visto de una malla de configuración cuadrada al ser inyectado con 5 kA de corriente caso B

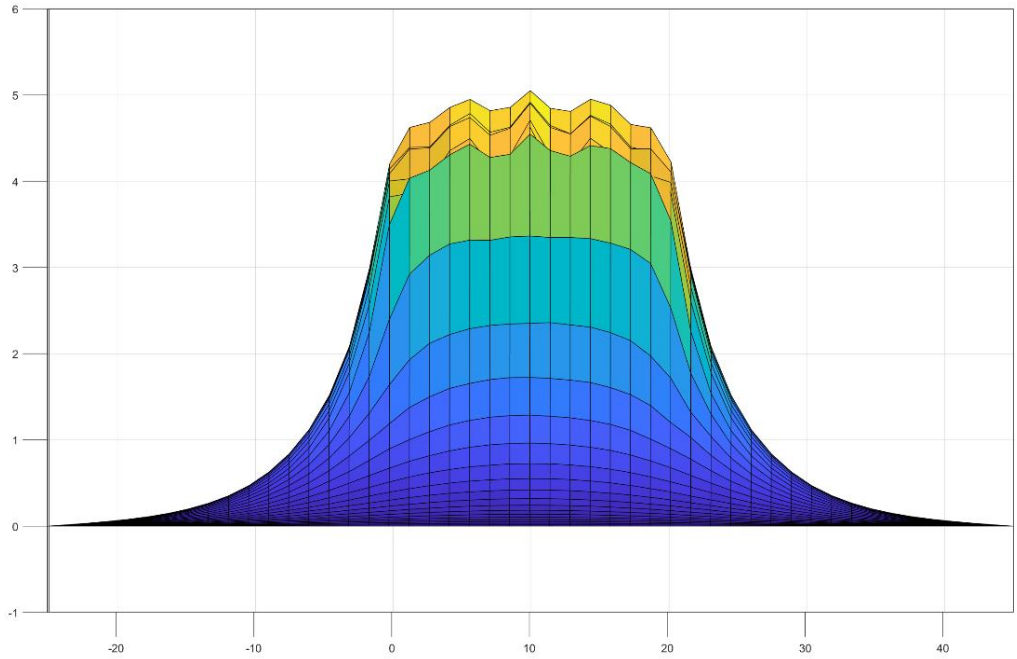


Figura 3.53. Perfil de voltajes visto de una malla de configuración cuadrada al ser inyectado con 10 kA de corriente caso G

En la Figura 3.54 se observa una malla de puesta a tierra de configuración geométrica triangular en dos ejes de coordenadas: en el eje de las abscisas se encuentra el valor adquirido en las mediciones a lo largo de la coordenada X, mientras que en el eje de las ordenadas el valor de voltaje que brindó la simulación. La Figura 3.55 detalla una curva de perfil de voltajes de la misma malla, caso G; se puede observar de la gráfica que los valores de voltaje obtenidos toman la curva característica de la configuración geométrica, en este caso una malla de puesta a tierra triangular.

Al comparar el perfil de voltaje de la misma configuración geométrica, después de ser sometido a diferente valor de corriente a la mitad. Se puede inferir gráficamente que el valor se reduce a la mitad al cambiar el valor de la corriente. En la Figura 3.54 y Figura 3.55 el valor de corriente inyectado es de 5 kA, por otro lado, en la Figura 3.56 y Figura 3.57 el valor de corriente inyectado en la malla es de 10 kA.

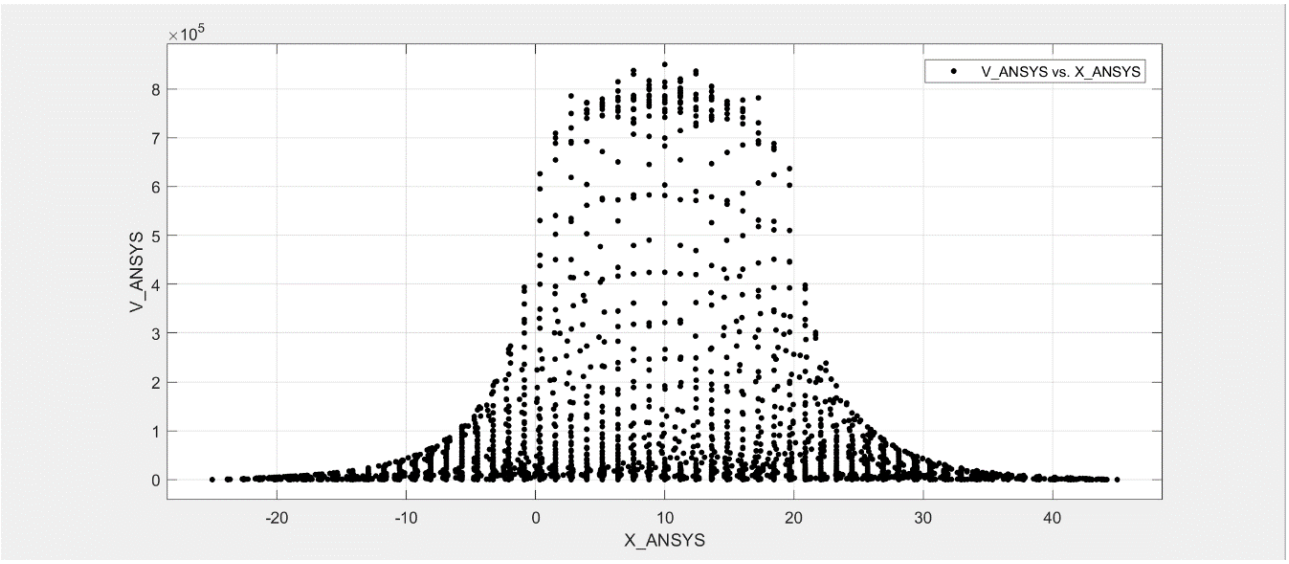


Figura 3.54. Visualización de los datos medidos en la coordenada X versus los voltajes obtenidos. El caso de estudio es el I de una malla de configuración geométrica triangular.

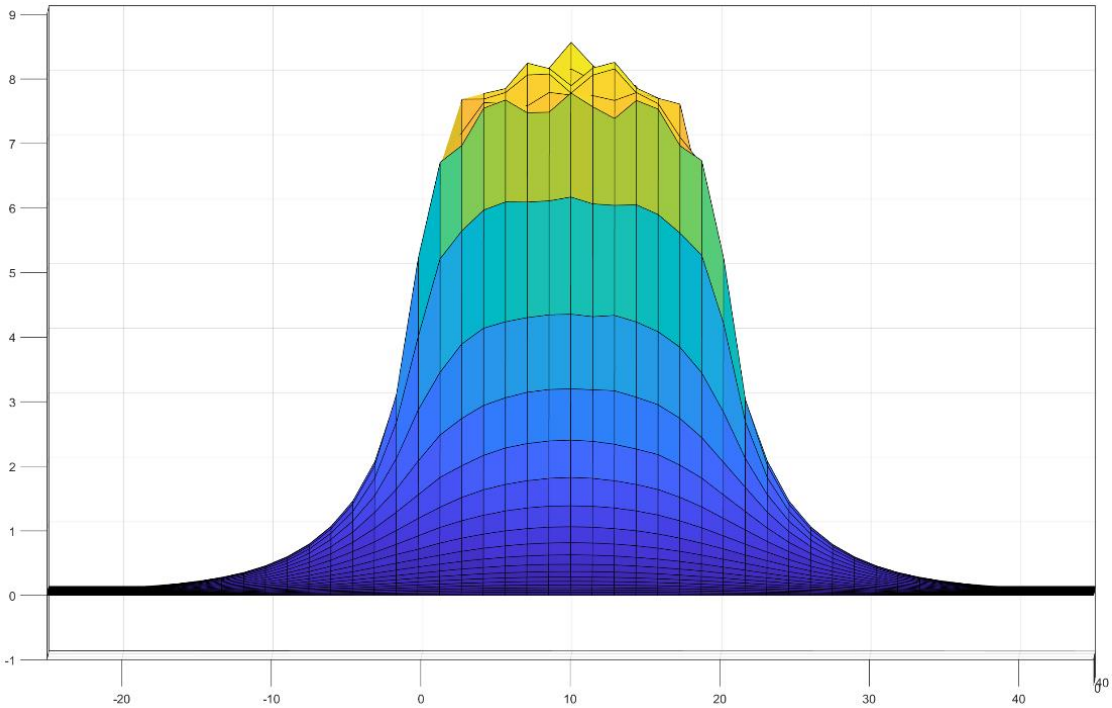


Figura 3.55. Perfil de voltajes visto de una malla de configuración triangular al ser inyectado con 10 kA de corriente caso I

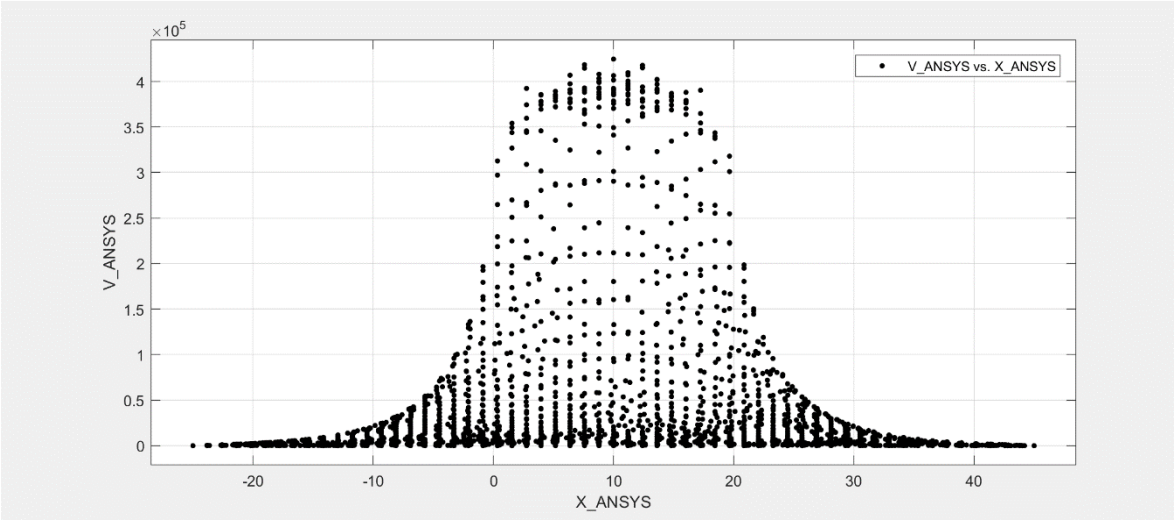


Figura 3.56. Visualización de los datos medidos en la coordenada X versus los voltajes obtenidos. El caso de estudio es el J de una malla de configuración geométrica triangular.

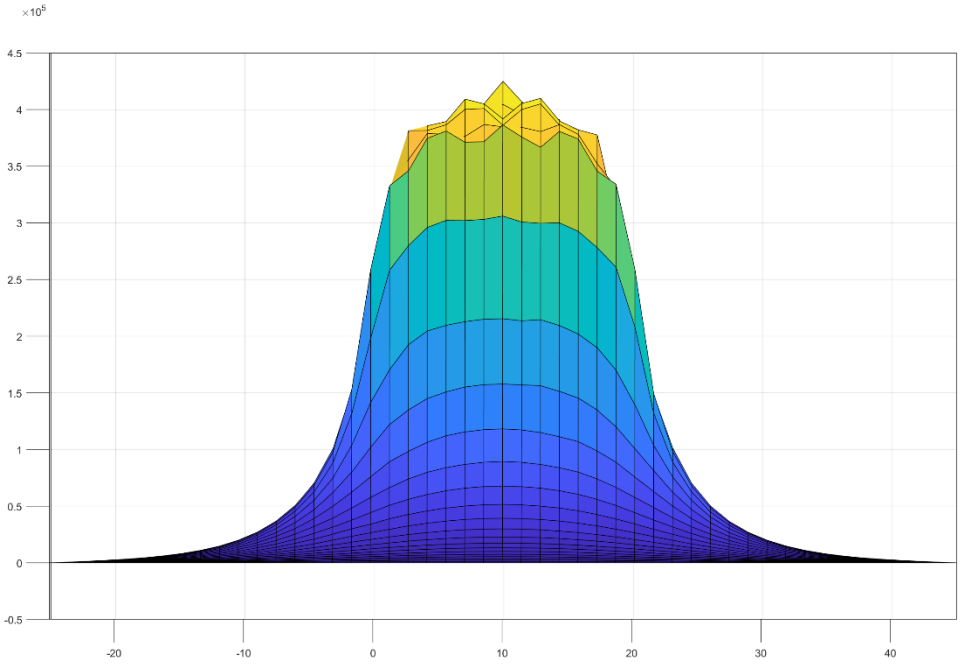


Figura 3.57. Perfil de voltajes visto de una malla de configuración triangular al ser inyectado con 5 kA de corriente caso J

En la Figura 3.58 se observa una malla de puesta a tierra de configuración geométrica circular en dos ejes de coordenadas: en el eje de las abscisas se encuentra el valor adquirido en las mediciones a lo largo de la coordenada X, mientras que en el eje de las ordenadas el valor de voltaje que brindó la simulación.

La Figura 3.59 detalla una curva de perfil de voltajes de la misma malla. Se puede observar de la gráfica que los valores de voltaje obtenidos toman la curva característica de la configuración geométrica, en este caso una malla de puesta a tierra circular.

Al comparar el perfil de voltaje de la misma configuración geométrica al ser sometido a diferente valor de corriente se puede inferir gráficamente que el valor se reduce a la mitad al cambiar el valor de la corriente a la mitad. En la Figura 3.60 y Figura 3.61 el valor de corriente inyectado es de 5 kA, por otro lado, en la Figura 3.58 y Figura 3.59 el valor de corriente inyectado en la malla es de 10 kA.

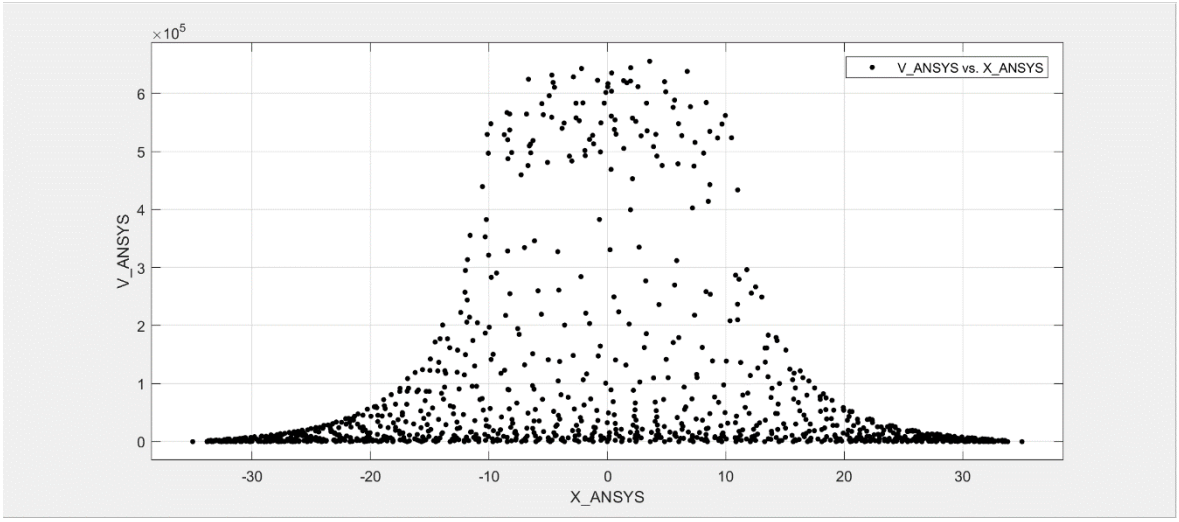


Figura 3.58. Visualización de los datos medidos en la coordenada X versus los voltajes obtenidos. El caso de estudio es el M de una malla de configuración geométrica circular.

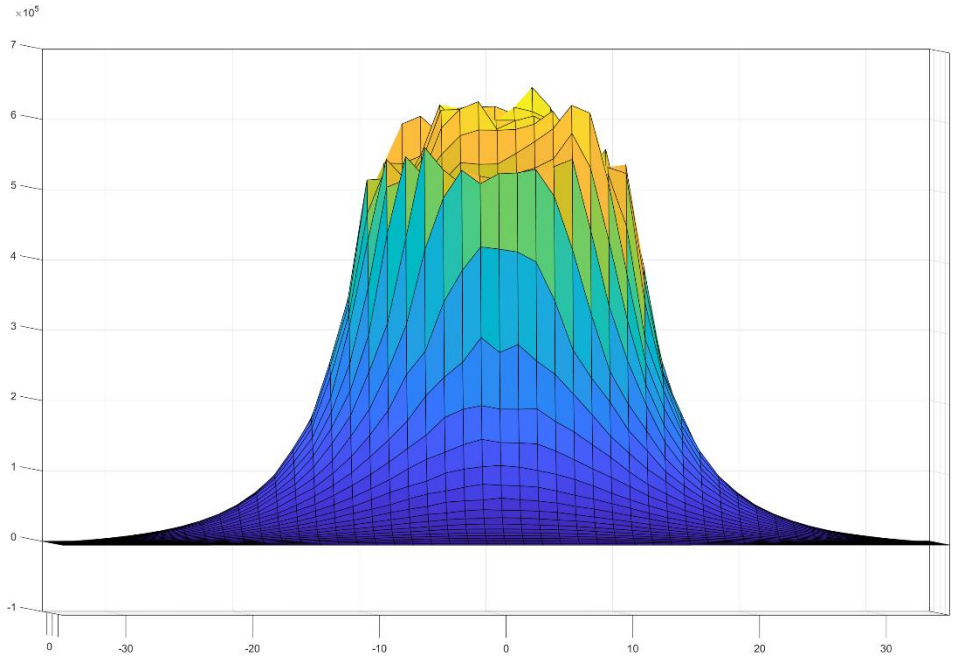


Figura 3.59. Perfil de voltajes visto de una malla de configuración circular al ser inyectado con 10 kA de corriente

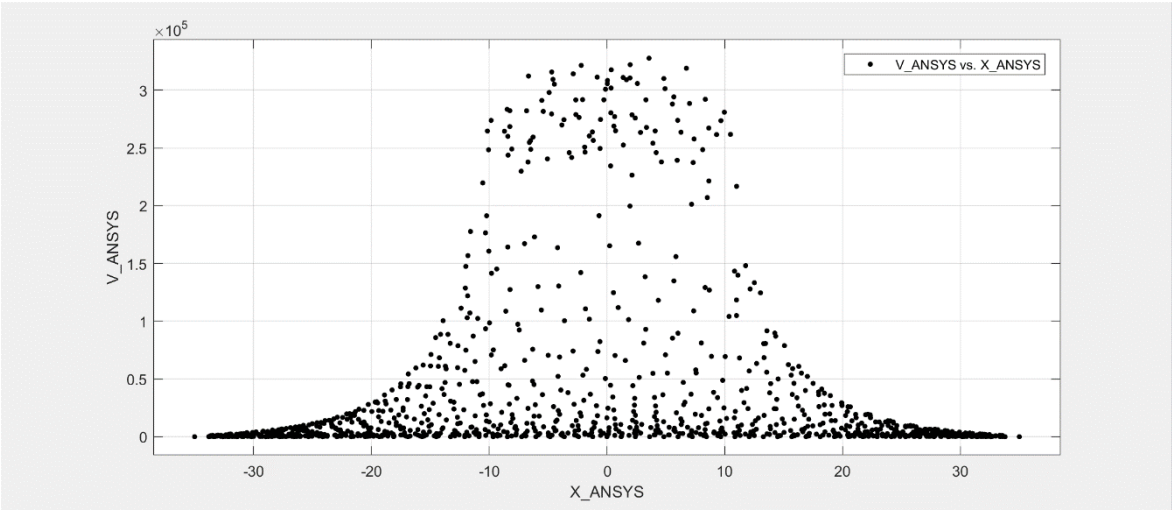


Figura 3.60. Visualización de los datos medidos en la coordenada X versus los voltajes obtenidos. El caso de estudio es el N de una malla de configuración geométrica circular

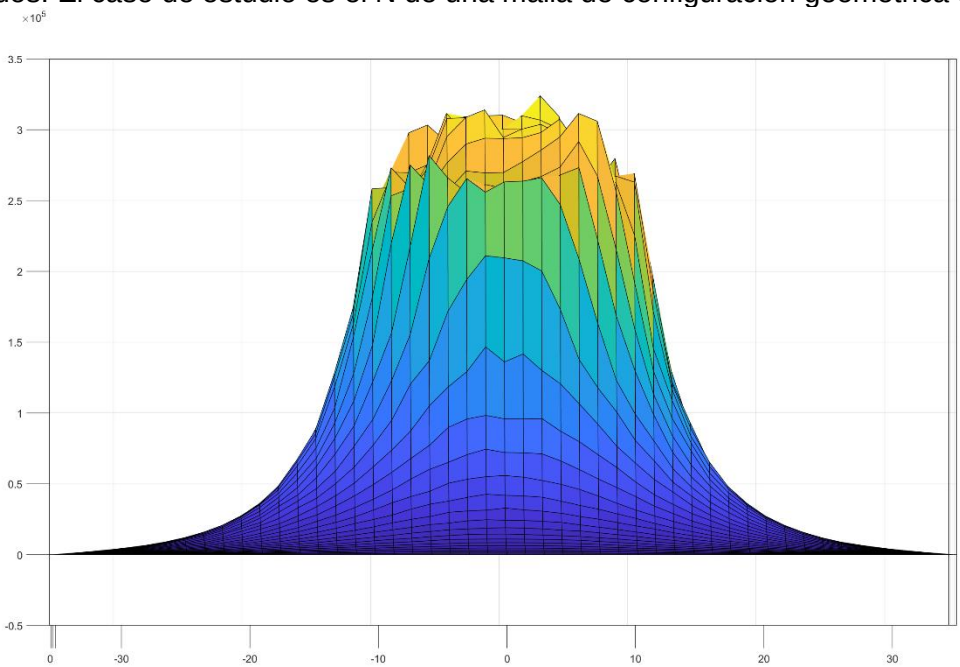


Figura 3.61. Perfil de voltajes visto de una malla de configuración circular al ser inyectado con 5 kA de corriente caso N

Finalmente, de acuerdo con las simulaciones obtenidas mediante el análisis de las curvas de perfil de voltaje, se observa que el voltaje de toque y paso se encuentran relacionados. Un perfil de voltaje llano es un perfil seguro, al poseer características escarpadas con pendientes elevadas genera voltajes de paso y voltajes de toque más peligrosos, como se visualiza en la Tabla 2.9 de los resultados de los casos de estudio.

En los casos de estudio, la malla de puesta a tierra de menor área es la configuración geométrica circular. Al querer despejar el mismo valor de corriente, deberá despejar la falla con un área menor y por lo tanto producirá voltajes elevados al tener menos espacio. En consecuencia, el voltaje de toque y paso dependerán de la cantidad de corriente inyectada, resistividad del material y la geometría (forma de la malla de puesta a tierra y el área que posee).

3.7. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL MEDIO

Details of "Steady-State Electric Conduction (B4)"

Definition	
Physics Type	Electric
Analysis Type	Steady-State Electric Conduction
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	18. °C
Generate Input Only	No

Figura 3.62. Valor de temperatura inicial del caso de simulación de temperatura

Details of "Steady-State Electric Conduction (B4)"

Definition	
Physics Type	Electric
Analysis Type	Steady-State Electric Conduction
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	5. °C
Generate Input Only	No

Figura 3.63. Valor de temperatura al variarlo en el caso de simulación de temperatura

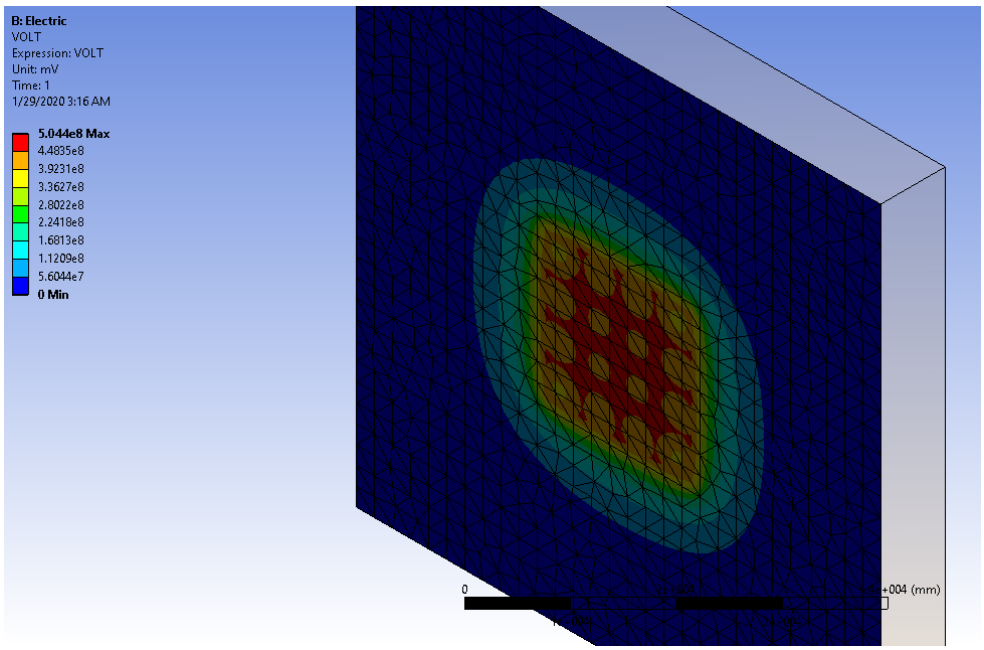


Figura 3.64. Valores de voltaje de temperatura en el caso de simulación inicial

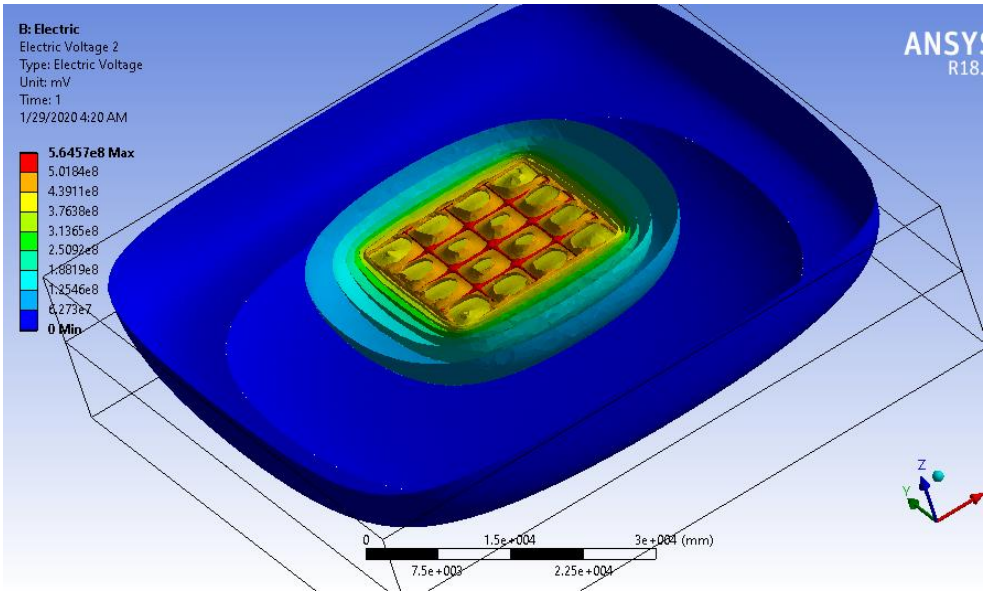


Figura 3.65. Valores de voltaje de temperatura en al variar la temperatura en el caso de simulación

Análisis

$$\%_{GPR} = \frac{5.044\ e8\ mV}{5.0438e8\ mV} * 100\% = 100.003\%$$

Se puede notar en las figuras Figura 3.63 y Figura 3.64 una reducción en el GPR de 0.003% al variar la temperatura desde 18 °C a 5 °C descritos en la Figura 3.62 y Figura 3.63. Esto se debe a que la variación de temperatura tiene efectos únicamente en la resistividad del material cobre dentro de la malla; ninguna variación de resistividad se muestra en la grava o la arcilla ya que no existen datos disponibles en función de la temperatura. La variación de GPR es despreciable debido a que la resistividad del cobre, y por ende su variación en función de la temperatura, es significativamente inferior a la del medio. No se puede apreciar visualmente una variación entre la forma de perfiles de voltajes entre 18 °C y 5 °C; por tanto, no existe variación significativa en voltaje de paso máximo o voltaje de toque máximo.

Se concluye que la variación de temperatura no causa cambios significativos en sistemas de puesta a tierra cuando no existen datos de resistividad del medio en función de la temperatura. Se concluye también que la temperatura no incide directamente en el comportamiento de las mallas; lo hace a través de la variación de resistividad causada por la variación de temperatura. Futuros estudios deberían enfocarse en analizar y tabular el comportamiento de la resistividad de suelos comunes en función de variaciones atmosféricas.

3.8. EFECTOS DE LA VARIACION DE LA RESISTIVIDAD DE LAS CAPAS DEL SUELO

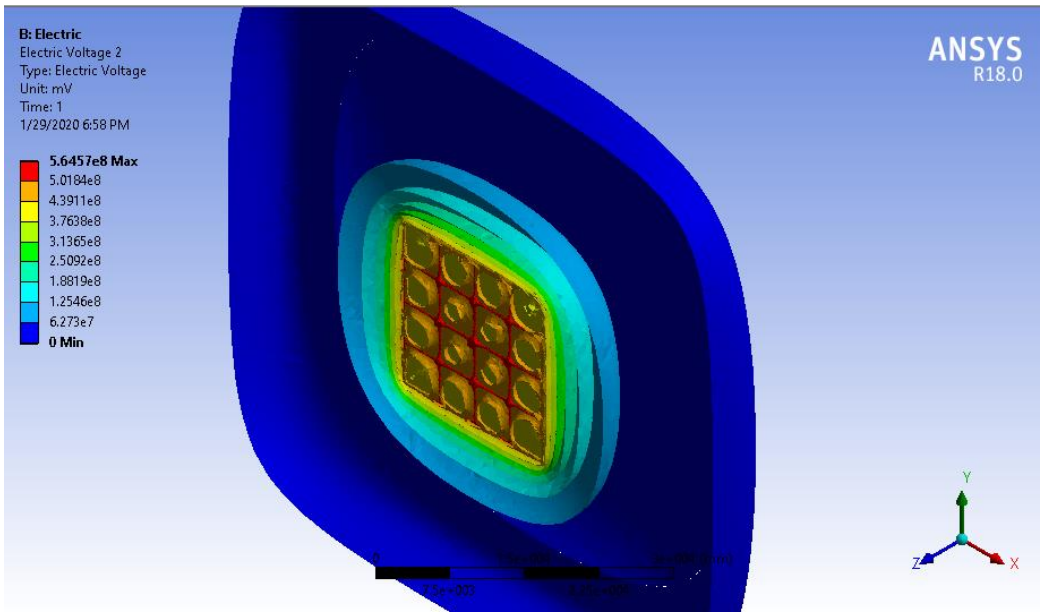


Figura 3.66. Valores de voltaje, cuando la capa superior de la simulación es grava 4500 Ω-m y la inferior es arcilla de 400 Ω-m.

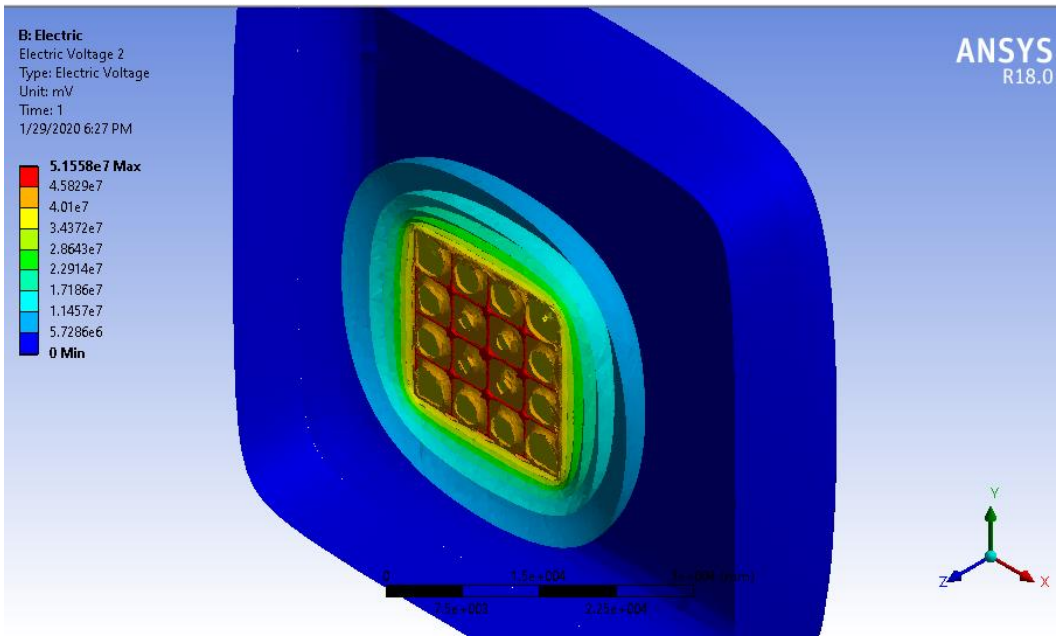


Figura 3.67. Valores de voltaje, cuando la capa inferior de la simulación es grava 4500 Ω-m y la superior es arcilla de 400 Ω-m.

Se puede notar en la Figura 3.66 y Figura 3.67 que cuando la malla se ubica en un medio más conductivo, el GPR se reduce. Esto se debe a que, con menor resistencia, la misma corriente produce un voltaje menor. Se observa también que existe un patrón de variación

de voltaje más brusco cuando el medio más conductivo está abajo; esto implica mayores voltajes de paso.

Se concluye que la posición de las capas de suelo tiene gran influencia en los sistemas de puesta a tierra. Se debe procurar que la malla se ubique en el medio más conductivo. Futuros estudios deberían enfocarse en combinar los principales suelos del país para facilitar el diseño de sistemas de puesta a tierra.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Según los pasos seguidos en la sección 2.1, se ha obtenido una simulación que converge y que muestra perfiles de voltaje esperados para Sistemas de Puesta a Tierra. El mesheado que se utilizó en este estudio pudo discretizar un modelo creado mediante un software de Diseño Asistido por Computador AutoCAD. Se logró integrar distintas herramientas de simulación en un método que utiliza Elementos finitos y las librerías eléctricas de ANSYS 2017 para realizar simulaciones de Sistemas de puesta a tierra, cumpliendo con el objetivo 1 de este estudio.

Se observa en los resultados obtenidos en la Figura 3.27 y Figura 3.28 que existe la presencia de equipotenciales de voltaje, exhiben sus valores máximos en la presencia de la malla de puesta a tierra. Muestra una particularidad, estos valores conforme se va alejando de la malla van disminuyendo hasta alcanzar un valor de cero en las condiciones de frontera; manteniendo siempre una forma equipotencial.

Según lo descrito en la sección 3.3, los valores que contrastan las mediciones reales del modelo físico de la cuba electrolítica presentan un error bajo; al compararlas con las de la simulación en ANSYS que se construyó siguiendo el método descrito en la sección 2.2 de este documento. Esto valida que el método es adecuado para simular sistemas de puesta a tierra mediante Elementos Finitos en ANSYS 2017 cumpliendo con el objetivo 2 de este estudio.

Según lo descrito en la sección 3.4, al variar ordenadamente parámetros clave de la simulación se obtuvieron perfiles de voltaje que caracterizan distintos medios y configuraciones de mallas. Estas simulaciones obtenidas sistemáticamente tienen el respaldo de haber sido construidas siguiendo un método validado en la sección 3.3 cumpliendo con el objetivo 3 de este estudio.

Según los resultados de la sección 3.4 la posición y resistividad de las capas de suelo tienen gran influencia en los Sistemas de Puesta a Tierra. En relación con lo expuesto, diferentes suelos causan diferentes GPR y diferentes voltajes de paso; son más altos cuando la capa de suelo en la cual se encuentra la malla tiene mayor resistividad. En conclusión, la posición y la resistividad de los suelos sí afectan a los Sistemas de Puesta a Tierra y se puede utilizar el método FEM de este proyecto para predecir los efectos de este fenómeno.

De acuerdo a los resultados tabulados en la Tabla 3.7 y Tabla 3.5 para los casos A y C se observa que el punto de inyección de corriente no causa cambios significativos en los voltajes de los sistemas de puesta a tierra. Para fines prácticos, los voltajes de paso, de toque y GPR se distribuyen de maneras iguales. Por otro lado, se puede observar que el calor generado es diferente; esto se debe a que la corriente sigue diferentes caminos. En conclusión, los voltajes distribuidos no dependen del punto de inyección dentro de la malla mientras que el calibre del cable del sistema de puesta a tierra tenga la capacidad conducir la corriente de la falla.

Se observa en la Tabla 3.7 para los casos A y B que la intensidad de la corriente inyectada causa cambios significativos en los voltajes de los sistemas de puesta a tierra. Numéricamente, los voltajes de paso, de toque y GPR incrementan junto con la corriente inyectada. Por otro lado, la variación de la intensidad de corriente inyectada no causa cambios significativos en el patrón de distribución de voltajes según las figuras 3.29 y 3.31; esto implica que una misma geometría puede distribuir adecuadamente una falla mientras la corriente inyectada no supere un valor crítico que cause un voltaje peligroso. En conclusión, la corriente que disipa un sistema de puesta a tierra afecta directamente a los voltajes que se deben controlar y por lo tanto es un parámetro que se debe definir durante el diseño del sistema.

Al comparar los casos A, I y M en la Tabla 3.7 se nota que el voltaje de toque, paso y GPR en un sistema de puesta a tierra aumenta con la existencia de ángulos agudos. Adicionalmente, la malla redonda tiene menos conexiones internas que las mallas cuadrada y triangular; aun así, logra dar mejores valores que la triangular. Se concluye que una malla no necesita tener mucho cable para ser eficiente; en su lugar debe tratar de cubrir la mayor cantidad de área posible y evitar en lo posible ángulos agudos.

De acuerdo con el análisis realizado en las secciones 3.5.1 a la 3.8 y a las conclusiones antes mencionadas, se ha expandido el conocimiento general de sistemas de puesta a tierra al presentar información práctica que permite a investigadores y diseñadores optimizar un SPAT. Esto junto con el aporte que el método desarrollado crea un conocimiento practico utilizable en el medio cumpliendo con el objetivo 4 de este estudio.

4.2. RECOMENDACIONES

No se ha podido analizar los efectos de la variación de la temperatura en el presente proyecto ya que no existen datos que permitan contrastar la resistividad de estos según las condiciones atmosféricas. Se recomienda que futuros estudios se enfoquen en analizar y

tabular el comportamiento de la resistividad de suelos comunes en el Ecuador en función de variaciones atmosféricas.

Se ha determinado que ángulos agudos en la geometría de las mallas de los sistemas de puesta a tierra son determinantes. Se recomienda que los diseñadores de SPAT eviten estas configuraciones.

Durante el trabajo de análisis por FEM en ANSYS, se presentaron dificultades durante el paso de discretización de los cuerpos y durante el paso de simulación. Esto se debe a que se requiere de poder de procesamiento elevado para los sistemas de puesta a tierra. Se recomienda que futuros estudios que utilicen este método empleen computadoras de alto rendimiento y cierren todos los programas que no se estén utilizando.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Santiago Roberto Quishpe Sacancela, “Diseño de una malla de puesta a tierra para una subestación de distribución en condiciones de suelo extremas”, Estudios Técnicos, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2016.

[2] “IEEE Std 80-2000, Guide for safety in AC Substation Grounding”. Fourth, 2000.

[3] Carlos Ruben Jimenez Torres, “Sistemas de puesta a tierra”. 2005.

[4] Genaro Mora Salvador, “Aplicación de las telecomunicaciones Características de los sistemasde tierra y su importancia en losenlaces de Telecomunicaciones”.

[5] J. S. R. Castaño y E. A. C. Plata, “Sistemas de puesta a tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF”, p. 122.

[6] Carlos Eugenio Cango Andrango Y Carlos Adrian Pichogagon Pulamarin, “Elaboración de un manual para el diseño y mantenimiento de mallas de puesta a tierra”, ES, Quito, 2009.

[7] Juan Carlos Orozco, “Resistencia de puesta a tierra”, p. 234.

[8] N. S. S. E. Crucerira Reina Edison Daniel, “Construcción de un teluromtero digital de 3 puntos para medir la resistencia de instalacion a tierra”, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2013.

[9] Juan David Cárdenas Valencia, “Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del método de wenner”, Universidad Tecnológica De Pereira, Pereira, 2011.

[10] A. I. Dennis. EPM, “Norma tecnica medida de resistividad electrica del suelo”. may-2008.

[11] Carla Marisol Reyes Gonzáles, Esteban Mauricio Cruz Granda, “*Análisis de técnicas para medición de la resisistividad de terreno mediante el modelado*”, Instituto Politécnico Nacional, México, 2016.

[12] O. C. Zienkiewicz y E. Oñate Ibáñez de Navarra, *El método de los elementos finitos*. Barcelona: Reverte, 1980.

[13] G. R. Liu y S. S. Quek, *The finite element method: a practical course*. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann, 2003.

[14] J. Fish y T. Belytschko, *A First Course in Finite Elements: Belytschko/A First Course in Finite Elements*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

[15] Morales Alvarez David Patricio, “Estudio de potencial eléctrico alrededor de un electrodo de puesta tierra ubicado en un suelo de varias capas mediante el método de eleentos finitos.”, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2018.

[16] R. Bargallo, *Finite Elements for Electrical Engineering*, 1a ed. Catalunya: Electrica Engineering Department, Universitat politecnica de catalunya, 2006.

[17] J. Dean, *Introduction to the Finite Element Method (FEM)*, 1a vols. University of Cambridge Department of Materials Science & Metallurgy, 2019.

[18] D. A. Fleisch, *A student's guide to Maxwell's equations*. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, 2008.

[19] C. Li y F. Zeng, *Numerical methods for fractional calculus*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.

[20] M. Hermann y M. Saravi, *A First Course in Ordinary Differential Equations*. New Delhi: Springer India, 2014.

[21] R. M. Corless y N. Fillion, *A Graduate Introduction to Numerical Methods*. New York, NY: Springer New York, 2013.

[22] ANSYS Inc, "About Ansys", *About Ansys*, 08-mar-2020. [En línea]. Disponible en: https://www.ansys.com/about-ansys. [Consultado: 08-mar-2020].

[23] J. R. Camarillo-Peñaranda, A. J. Saavedra-Montes, y C. A. Ramos-Paja, "Recomendaciones para Seleccionar Índices para la Validación de Modelos", TecnoL., p. 109, nov. 2013, doi: 10.22430/22565337.372.

[24] R. Caldecott y D. Kaste, Scale model studies of station grounding grids. Columbus: Ohio, 1983.

[25] Zienkiewicz, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals,* Swansea: Reino Unido. 2005.

[26] C.L. Wadhwa, *High Voltage Engineering. University of* New Delhi, IN; India: 2007.

ANEXOS

ANEXO A. Tabla de las mediciones reales del experimento

ANEXO B. Tabla de las mediciones obtenidas en la simulación del experimento

ANEXO C. Programa obtener voltajes de paso, voltajes de toque y GPR malla cuadrada

ANEXO D. Programa obtener voltajes de paso, voltajes de toque y GPR malla triangular

ANEXO E. Programa obtener voltajes de paso, voltajes de toque y GPR malla circular

ANEXO F. Manual de usuario

ANEXO A. Tabla de las mediciones reales del experimento (Archivo digital)

ANEXO B. Tabla de las mediciones obtenidas en la simulación del experimento (Archivo digital)

ANEXO C. Programa obtener voltajes de paso, voltajes de toque y GPR malla cuadrada

```
clc


clear i
clear j
clear vdireccionx
clear vdirecciony
clear v_paso
clear v_toque
%lazo para cacluar v paso
for i=0:20 %x
    for j=0:20 %y
     vdireccionx(i+1,j+1)=VC1(j,i)-VC1(j+1,i);
     vdirecciony(i+1,j+1)=VC1(i,j)-VC1(i,j+1);
    end
end

 v_paso(1,1)=max(vdireccionx(:));
 v_paso(2,1)=max(vdirecciony(:));
 voltaje_de_paso=max(v_paso);
 GPR=max(V_ANSYS);


%lazo para cacluar v toque
for i=0:20
    for j=0:20
     v_toque(i+1,j+1)=GPR-VC1(i,j);

    end
end
voltaje_de_toque=max(v_toque(:));
voltaje_de_paso
voltaje_de_toque
GPR

plot(VC1)
```

ANEXO D. Programa obtener voltajes de paso, voltajes de toque y GPR malla triangular

```
clc
clear i
clear j
clear vdireccionx
clear vdirecciony
clear v_paso
clear v_toque
%lazo para cacluar v paso
a=1;
for i=0:17 %y
    for j=0:20-i*a %x
    vdireccionx(i+1,1)=VC11(i*a+j,i)-VC11(i*a+j+1,i);
    if i>=1
    vdirecciony(i+1,1)=VC11(j,i)-VC11(j,i-i*a);
    end
    end
end

 v_paso(1,1)=max(vdireccionx(:));
v_paso(2,1)=max(vdirecciony(:));
 voltaje_de_paso=max(v_paso);
 GPR=max(V_ANSYS);


%lazo para cacluar v toque
for i=0:17 %y
    for j=0:20-i*a %x
     v_toque(i+1,1)=GPR-VC11(i,j);
    end


end

voltaje_de_toque=max(v_toque(:));

voltaje_de_paso
voltaje_de_toque
GPR

plot(VC11)
```

ANEXO E. Programa obtener voltajes de paso, voltajes de toque y GPR malla circular

```
clc
clear i
clear j
clear vdireccionx
clear vdirecciony
clear v_paso
clear v_toque

GPR=max(V_ANSYS);
%lazo para calcular v paso
a=1;
for i=0:10 %y
    for j=0:20-i*a %x
    vdireccionx_arriba(i+1,1)=VC16(i*a+j-10,i)-VC16(i*a+j+1-10,i);
    vdireccionx_abajo(i+1,1)=VC16(i*a+j-10,-i)-VC16(i*a+j+1-10,-
i);
     v_toque(i+1,1)=GPR-VC16(i-10,j-10);
     %lazo para cacluar v toque
    if i>=1
    vdirecciony_arriba(i+1,1)=VC16(j,i)-VC16(j,i-i*a);
    vdirecciony_abajo(i+1,1)=VC16(j,-i)-VC16(j,i*a+i);
    end
    end
end

v_paso(1,1)=max(vdireccionx_arriba(:));
v_paso(2,1)=max(vdireccionx_abajo(:));
v_paso(3,1)=max(vdirecciony_arriba(:));
v_paso(4,1)=max(vdirecciony_abajo(:));
voltaje_de_paso=max(v_paso);



voltaje_de_toque=max(v_toque(:));

voltaje_de_paso
voltaje_de_toque
GPR

plot(VC16)
```

ANEXO F. Manual de usuario

ORDEN DE EMPASTADO