



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**CARRERA INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**

**PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

**INGENIERO ELÉCTRICO CON MENCIÓN EN:  
SISTEMAS DE POTENCIA Y DISEÑO DE MAQUINARIAS**

**TEMA:**

**DISEÑO DE MALLA PUESTA A TIERRA  
(ZONA DE CANCHA COLEGIO DOMINGO COMIN)**

**AUTOR:**

**SANTIAGO HURTADO VILLA**

**LUIS INGA**

**DIRECTOR:**

**ING. CARLOS CHÁVEZ CÓRDOVA**

**GUAYAQUIL, MARZO 2010**

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Los conceptos desarrollados, investigaciones realizadas, prácticas elaboradas, análisis y conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, Marzo del 2010

(f) \_\_\_\_\_

**Santiago Hurtado Villa**

(f) \_\_\_\_\_

**Luis Inga**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme la Vida y todo lo primordial para llegar hasta este instante de tiempo y recordar el cómo llegue hasta aquí.

Con la mayor gratitud por los esfuerzos realizados para que yo lograra terminar mi carrera profesional:

A mi madre que es el ser más maravilloso de todo el mundo, gracias por el apoyo moral, tu cariño y comprensión que desde niño me has brindado, por guiar mi camino y estar junto a mí en los momentos más difíciles.

A mi padre porque desde pequeño ha sido para mí un hombre maravilloso, el ejemplo para mí a seguir, al que siempre he admirado mucho.

Porque gracias a su cariño, apoyo y confianza he llegado a realizar dos de mis más grandes metas en la vida. La culminación de mi carrera profesional y el hacerlos sentirse orgullosos de esta persona que tanto los ama.

Gracias por guiar mi vida con energía, esto ha hecho que sea lo que soy!!.

Con amor, admiración y respeto para mis Padres.

*Santiago Hurtado V.*

## **DEDICATORIA**

Dios ha sido mi primordial inspiración en todas las cosas, y ahora no será la excepción, así que principalmente se lo dedico a él, porque gracias a él me encuentro en donde estoy.

Como una muestra de mi cariño y agradecimiento, por todo el amor y el apoyo brindado, también porque hoy veo llegar a su fin una de las metas de mi vida, le agradezco la orientación que siempre me han otorgado. Gracias.

Por todo esto se los dedico A mis padres.

Este trabajo también se lo dedico a todas las personas que pasaron por mi vida brindándome todo su apoyo hasta ir construyendo e ir formando con migo una persona con valores y principios morales.

A mis maestros y maestras que pusieron todo su empeño en poner su granito de arena para darme una excelente formación académica y como no nombrar a uno de los dos maestros que tuve en mi formación como Alumno Salesiano, DON BOSCO y MARIA AUXILADORA..

*Santiago Hurtado V.*

## ÍNDICE GENERAL

### CAPÍTULO 1

1. Fundamentos de la puesta a tierra	10
1.1. Introducción	10
1.2. Definiciones	11
1.3. Motivos para poner a tierra materiales conductores que albergan conductores Eléctricos o Equipos	15
1.4. Tierra Física	16
1.4.1. Tipos de Sistema de Tierra	16
Tierra de protección contra rayos	17
Tierra del Equipo o Tierra de seguridad	18
Conductor conectado a Tierra	18
Tierra Aislada	19
Tierra de referencia de señal	20
1.4.2. ¿Qué es una conexión efectiva a Tierra?	21
1.5. Funciones de una malla de Puesta a Tierra	22
1.5.1. Requisitos de una malla a Tierra	23

### CAPITULO 2

2. Sistema Electrodo de Tierra	25
2.1. Funciones del electrodo de Tierra	26
2.2. La varilla de Tierra	28
2.3. La unión de los electrodos de Tierra	29
2.4. Estructura metálica del Edificio como electrodo de Tierra	30
2.5. Electrodo incrustado en concreto	30
2.6. Anillo de Tierra como electrodo de Tierra	31
2.7. Electrodos artificiales o fabricados especialmente para la puesta a Tierra.	32
2.8. La Barra Electrolítica o Química	33

### CAPITULO 3

3. Resistividad del suelo	36
3.1. Definición de Resistividad	36
3.2. Conducción Eléctrica en Suelos	37
3.3. Anisotropía de Resistividad	38

## CAPITULO 4

4. Diseño y Calculo de la Malla de Puesta a Tierra	39
4.1. Modelo del Suelo	39
4.2. Modelo del Suelo a dos Capas	40
Tablas de Pruebas de resistencia del Suelo	41
Tabla de Grafica Envolvente	42
4.3. Fotografías del trabajo de Estudio del Suelo	42
Esquema Unifilar de la Subestación	60
4.4. Calculo de corriente de Cortocircuito	63
Datos de placa del transformador	63
4.5. Diseño de la malla de Tierra de la Subestación con los Datos	64
Selección del Conductor	64
Elección de la Malla	65
Calculo de las tensiones Permisibles de Paso y Toque	67
Utilizando el Método de Laurent y Nieman	69
Método de Dwinght	69
Resistencia de un solo conductor de unión	71
Resistencia Total de la Malla	72
4.6. Criterio para la construcción de Mallas Conectadas a Tierras	73
4.7. Análisis de resultados obtenidos con el equipo medidor de resistencia de tierra.	75
4.7.1. Problemas, Causa y Efecto	75
4.8. Soluciones y Recomendaciones	76
4.9. Conclusiones	77
BIBLIOGRAFIA	79
ANEXO 1	
Patrones de construcción, Sistema de Mallas Conectadas a Tierra (SMT)	80
ANEXO 2	
Descripción del equipo medidor de resistencia de Tierra (FLUKE 1625KIT)	88

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 4.1: Mediciones de Resistencia del Suelo a distintas Profundidades	35
Tabla 4.2: Mediciones de Resistencia del Suelo a distintas Profundidades	35
Tabla 4.3: Mediciones de Resistencia del Suelo a distintas Profundidades	35
Tabla 4.4: Gráfica Envolvente de todas las Mediciones Realizadas	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

Foto 4.1: Mediciones de Resistencia del Suelo	36
Foto 4.2: Mediciones de Resistencia del Suelo	37
Foto 4.3: Mediciones de Resistencia del Suelo	37
Foto 4.4: Medición de Resistencia según el Método de Wenner	38
Foto 4.5: Instrumentos y Equipo de Medición	38
Gráfica 4.1: Primera Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia	39
Gráfica 4.1: Segunda Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia	40
Gráfica 4.1: Tercera prueba, Medición – Resistividad vs Distancia	41
Gráfica 4.2: Cuarta prueba, Medición – Resistividad vs Distancia	42
Gráfica 4.2: Quinta prueba, Medición – Resistividad vs Distancia	43
Gráfica 4.2: Sexta prueba, Medición – Resistividad vs Distancia	44
Gráfica 4.3: Séptima prueba, Medición – Resistividad vs Distancia	45
Gráfica 4.3: Octava prueba, Medición – Resistividad vs Distancia	46
Gráfica 4.3: Novena prueba, Medición – Resistividad vs Distancia	47
Gráfica 4.4: Comparativa de Todas las Mediciones Realizadas	48
Gráfica 4.4: Envolvente o Grafica que encierra todas las mediciones anteriores en una	49
Grafica 4.5: Método de Sunde	51
Figura 4.1: Modelo del Suelo de Dos Capas	52
Figura 4.2: Elaborada en Google SketchUp, Subestación DC	54
Figura 4.3: Elaborada en Google SketchUp, Subestación DC	55
Figura 4.4: Malla Reticulada de 60 x 40	67
Figura SMT-1: Sección de Malla Conectada a Tierra	81
Figura SMT-1A: Diseño de una Malla en una Subestación Típica	82
Figura SMT-3: Conexión a Malla de Disyuntores	83
Figura SMT-5: Conexión a Malla de Equipo en Casetas de Control	84

Figura SMT-5A: Conexión a Malla de Bandeja de Cables	85
Figura SMT-6: Conexión a Malla de Subestación Movable	86
Figura A-2: Equipo de medición FLUKE 1625	89
Figura A-2: Características del Equipo de Medición	89
Figura A-2: Accesorios FLUKE 1625 KIT	90

## **RESUMEN**

Para explicar este proyecto de forma rápida y objetiva, dividimos nuestro trabajo final de seminario de graduación en 4 Capítulos.

En el capítulo 1 se hace una introducción a los fundamentos de la puesta a tierra, la que explica acerca de los diferentes tipos de sistema de tierra existentes, además de una amplia gama de definiciones a utilizarse en la monografía.

En el capítulo 2 se describe los sistemas de electrodo de tierra, las funciones del electrodo de tierra, se hace referencia también a barra electrolítica o química.

En el capítulo 3 presentaremos lo que es la resistividad de un terreno, entre este capítulo veremos también la anisotropía de Resistividad.

En el capítulo 4 Se darán lugar a los cálculos realizados para el diseño de la malla puesta a tierra, como se modelo el suelo de la que se va a instalar la malla, cálculos de voltaje de Toque y Paso, en fin todos aquellos cálculos necesarios para el diseño.

En el veremos también el análisis, de resultados obtenidos con el medidor de resistencia de tierra, el tipo de suelo que nos encontramos en sitio.

A demás daremos las soluciones a los problemas que encontramos al momento de diseñar y así mismo los criterios que se tomaron en cuenta para cumplir con todas las normas y niveles de seguridad que se requieren para nuestra la malla.

Y por último las conclusiones que siempre son necesarias para el correcto análisis de un buen proyecto.

# CAPÍTULO 1

## FUNDAMENTOS DE LA PUESTA A TIERRA

### 1.1. Introducción

En el presente artículo se desarrollará la metodología para el diseño de una malla de puesta a tierra teniendo en cuenta los aspectos normativos, los criterios de seguridad e información necesaria para el diseño y construcción de sistemas de mallas conectadas a tierra para la protección de personas, estructuras y equipos, de los riesgos que puedan surgir por fallas en el sistema eléctrico.

Los procedimientos para diseñar sistemas de tierras se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja. Los conceptos son ciencia, pero la aplicación correcta es un arte, ya que cada instalación es única en su localización, tipo de suelo, y equipos a proteger.

El propósito que se persigue con la existencia de los sistemas de tierra es:

- Protección para el personal operativo, autorizado o no autorizado.
- Protección a los equipos e instalaciones contra tensiones peligrosas.
- Evitar que durante la circulación de falla a tierra, se produzcan diferencias de potencial entre distintos puntos de la instalación, proporcionando para esto, un circuito de muy baja impedancia para la circulación de estas corrientes.
- Apego a normas y reglamentos públicos en vigor.

Existen varios parámetros que afectan los voltajes que se producen dentro y fuera de una subestación. Algunos de estos parámetros son: la corriente de falla, duración de la falla, resistividad del terreno, material de la gravilla y la configuración de la malla.

## **1.2. Definiciones**

**Sistema de Puesta a Tierra (SPT) (Grounding System).-** Conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico específico, sin interrupciones ni fusibles, que unen los equipos eléctricos con el suelo o terreno. Comprende la puesta a tierra y todos los elementos puestos a tierra.

**Suelo.-** Sistema natural, resultado de procesos físicos, químicos y biológicos, con componentes principalmente minerales y sólidos inertes que le dan estabilidad, en conjunto con líquidos y gases que definen su comportamiento eléctrico.

**Electrodo de Puesta a Tierra (Grounding Electrode):** Conductor en íntimo contacto con el suelo, para proporcionar una conexión eléctrica con el terreno. Puede ser una varilla, tubo, placa, cinta, o cable.

**Puesta a tierra (Grounding):** Grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuyen las corrientes eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende: Electrodos, conexiones y cables enterrados. También se le conoce como toma de tierra o conexión a tierra.

**Puesto a Tierra (Grounded):** Toda conexión intencional o accidental del sistema eléctrico con un elemento considerado como una puesta a tierra. Se aplica a todo equipo o parte de una instalación eléctrica (neutro, centro de estrella de transformadores o generadores, carcasas, incluso una fase para sistemas en delta, entre otros), que posee una conexión intencional o accidental con un elemento considerado como puesta a tierra.

**Tierra (Ground o Earth):** Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua. El término “masa” solo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, los barcos, los carros y otros.

**Conductor del Electrodo de Puesta Tierra (Grounding Electrode Conductor):**

Conductor que es intencionalmente conectado a una puesta a tierra, sólidamente para distribuir la tierra a diferentes sitios de una instalación.

**Resistividad del Suelo:** Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo; se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo; su magnitud se expresa en (Ohm-m) o (Ohm-cm), es inversa a la conductividad. La resistividad eléctrica ( $\rho$ ): Es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas.

**Resistividad Aparente:** Es la resistividad obtenida con una medida directa en el suelo natural, bajo el esquema geométrico especificado por el método de cuatro (4) electrodos, aplicado con circuitos independientes de corriente y potencial, sólo es representativo para un punto de la característica del suelo estratificado.

**Resistencia Mutua de Electrodo:** Fenómeno resistivo que aparece entre electrodos de puesta a tierra o puntos próximos en el suelo, mediante el cual, la corriente que se dispersa a través de uno de ellos, modifica el potencial del otro. Su unidad es el (Ohm).

**Potencial Eléctrico:** Es la diferencia de voltaje entre un punto y alguna superficie equipotencial que generalmente es la superficie del suelo, la cual es seleccionada arbitrariamente como de potencial cero o tierra remota. Un punto el cual tiene un potencial más alto que el cero se llama potencial positivo y en caso contrario potencial negativo.

**Tierra Remota:** También denominada Tierra de Referencia, es el lugar o la zona de mínima resistencia, más próxima del suelo subyacente a una instalación eléctrica o a una puesta a tierra, respecto de las cuales se le atribuye por convención el Potencial cero.

**Bajante a Tierra.-** Conductor de cobre que sirve de conexión entre la malla a tierra y las diferentes partes y equipos de la subestación, los cuales incluyen, pero no están limitados a, la estructura, la verja, el transformador, los disyuntores, los pararrayos y el equipo de medición y control.

**Conexión a Tierra.-** Camino de conducción eléctrica a la tierra o a algún cuerpo conductor que haga las veces de ésta (por ejemplo: chasis o armazón metálico de un equipo, etc.), que pueda servir de conductor común de retorno de varios circuitos. Puede hallarse a potencial cero con respecto a la tierra o puede estar conectado a ésta.

**Ampacidad.-** Capacidad de corriente. Valor máximo de la corriente que puede tolerar continuamente un dispositivo o un conductor sin que sufra daños permanentes por alteración de sus propiedades eléctricas, químicas o mecánicas.

**Conservación.-** Mantenimiento preventivo programado que se le da a los equipos y al sistema eléctrico en general.

**Ground Potential Rise (GPR).-** Voltaje súbito máximo que se produce entre la malla y un punto remoto con potencial igual a cero.

**Halo.-** Barra de cobre conectada a tierra que se instala en casetas para atenuar las líneas de flujo magnético causadas por una descarga atmosférica y proteger los equipos de telecomunicaciones.

**Inspección de las Instalaciones Eléctricas.-** Fiscalización periódica de la construcción de obras eléctricas que realice un ingeniero o técnico especializado que para tales fines haya designado la AEE o el inspector que haya designado el dueño del proyecto, para garantizar que las mismas fueron realizadas conforme a las leyes, reglamentos y normas para la construcción eléctrica.

**Malla Conectada a Tierra.-** Conjunto de conductores de cobre sin cubierta y electrodos conectados efectivamente entre sí, que se instalan de forma horizontal bajo tierra, de manera que se disipe cualquier condición de voltaje o corriente no

deseado en el sistema. Este sistema provee un punto de tierra común para todos los equipos y estructuras metálicas dentro de la subestación. Toda malla tiene que cumplir con los requisitos de este manual.

**Master Ground Bar (MGB).**- Barra principal de conexión a tierra en una subestación.

**Personal Calificado.**- Persona que está preparada y tiene conocimiento de la construcción, conservación y operación del sistema eléctrico, además de las reglas de seguridad correspondientes.

**Resistencia Base (Footing Resistance).**- Resistencia existente entre una configuración de varillas y los primeros estratos de terreno.

**Soldadura Exotérmica.**- Fusión de dos metales por medio de una reacción interna de desprendimiento de energía en forma de calor.

**Varilla a Tierra.**- Electrodo metálico que se entierra para la toma de conexión a tierra.

**Voltaje de Toque.**- Voltaje que experimenta entre los pies y sus manos o su cuerpo una persona que toque alguna estructura metálica dentro de los predios de una subestación.

**Voltaje de Paso.**- Voltaje que experimenta entre sus pies una persona que camina dentro de los predios de una subestación, cuando la distancia entre sus pies sea de aproximadamente un metro y sus manos o su cuerpo no estén en contacto con ninguna estructura metálica.

### **1.3. Motivos para poner a Tierra materiales conductores que albergan conductores Eléctricos o Equipos.**

Existen tres razones principales para aterrizar cubiertas metálicas, o los materiales conductores que contienen a los conductores eléctricos o al equipo. Las principales dos razones se encuentran en la sección 250-2(b) del NEC.

1. Para limitar el voltaje debido a:
  - Rayos.
  - Sobre corrientes transitorios.
  - Contacto accidental con líneas de alto voltaje.
2. Para facilitar la operación de los dispositivos de protección contra sobrecargas y los interruptores del circuito.
3. Estabilizar el voltaje durante operaciones normales.
4. Facilitar la operación de los interruptores de circuito.

Otra razón aunque no se especifica en las notas del código, es drenar a tierra corrientes de fuga o corrientes de descargas electrostáticas.

Por ejemplo es pertinente la conexión a tierra del blindaje de los cables para atenuar los acoplamientos electromagnéticos y también para drenar las corrientes de fuga y descargas electrostáticas. El ruido eléctrico es producido por los generadores de ruido y aun los mismos equipos electrónicos pueden provocar daños, problemas y errores de datos, en el equipo electrónico avanzado. Es importante drenar inmediatamente a tierra estas corrientes estáticas y de fuga para asegurar la operación óptima del equipo electrónico.

Las notas del código enfatizan la importancia de la unión entre la tierra del equipo, o tierra de seguridad, y el conductor conectado a tierra o neutro. Esta unión se efectúa solo en el tablero principal de distribución y puede realizarla el puente principal de unión, que está ubicado en el equipo de servicio, pues es el eslabón clave para que complete la trayectoria de la corriente de falla y se activen los dispositivos de protección (fusibles) e interruptores termomagnéticos.

## **1.4. Tierra Física**

La materia de puesta a tierra se presta a una gran confusión debido a la enorme cantidad de artículos técnicos, especificaciones y manuales existentes, los cuales no están siempre de acuerdo entre sí, y a la excesiva terminología sin ningún significado técnico determinado. Muchos de estos términos no están oficialmente definidos en ninguna norma; se prestan a significado ambiguo y la mayoría han sido inventados, a través de los años, por fabricantes de equipos electrónicos. Para empeorar la situación, muchas de las especificaciones aplicables a los equipos electrónicos han sido escritas por ingenieros, quienes nunca han leído el NEC. Por esta razón es importante definir los sistemas de Tierra con terminología técnica a fin de poder hablar el mismo lenguaje así como determinar y definir el verdadero significado del código.

### **1.4.1. Tipos de Sistema de Tierra**

Los principales sistemas de tierra son los siguientes:

**1. Tierra Física** o sistema del electrodo de tierra, el cual cubre el sistema del electrodo de tierra y todas las conexiones hechas para realizar un sistema de puesta a Tierra efectiva.

La tierra física, también llamado sistema de electrodo de tierra, es la conexión física de un sistema a un electrodo bajo tierra. Esta es solo una parte del sistema pues el resto, es decir, la tierra del circuito y la tierra de seguridad o del equipo están arriba de la tierra. Se cree muy a menudo que con tener una baja resistencia en el electrodo de tierra se tiene un buen sistema de tierra. Sin embargo, es imperativo considerar el sistema completo de tierra de una instalación eléctrica, con sus tres componentes principales: **tierra física, tierra del circuito y tierra del equipo.**

El sistema electrodo de tierra o tierra física puede consistir en una varilla, tubería u otro electrodo aprobado por el Código y debe tener un contacto directo con la Tierra. En resumen es un sistema bajo tierra pero relacionado con las partes existentes por encima de la tierra: la tierra de seguridad o del equipo y la tierra del circuito.

La tierra del circuito es el conductor conectado a tierra o conductor neutro, el cual tiene la función, en caso de un cortocircuito o falla a tierra, de transportar la corriente de falla cedida por el conductor de tierra del equipo. En el punto neutro-tierra del tablero principal de distribución, el neutro proporciona la trayectoria de baja impedancia, para la corriente de falla, de tal forma que se cierre el circuito, lo que facilita el disparo de los interruptores de circuito.

El sistema de tierra de seguridad, o tierra del equipo, interconecta las partes metálicas de los equipos, que usualmente no acarrean corriente, para mantenerlos a una referencia cero o plano equipotencial. En España se le llama “masa” para diferenciarlo de la tierra física. Este sistema previene peligros para las personas, pues en caso de un contacto entre un conductor de fase y la carcasa metálica del equipo, lo mantiene a la misma referencia a tierra. Al no existir diferencia de potencial, no se generan corrientes peligrosas que podrían ser mortales para una persona.

**2. Tierra de protección contra rayos** es un sistema separado que según el código debe conectarse al sistema de tierra del edificio. Este tipo de tierra lo rige el código de protección contra rayos, NFPA 780 publicado por la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA), la autora del NEC.

La función específica de este sistema es drenar la energía del rayo a tierra, en forma controlada, por medio de la varilla pararrayos, un conductor bajante y un electrodo de tierra separado. En el código no se trata a fondo este sistema de protección, pero exige que el sistema electrodo de tierra del sistema de protección contra rayos esté conectado con el electrodo de tierra del edificio.

A primera vista, parece ilógico que el código exija la interconexión de los dos sistemas. Por un lado, queremos drenar la corriente del rayo a tierra y el código nos exige que lo conectemos a nuestro sistema del edificio, donde se encuentra ubicado nuestro valioso equipo electrónico. Es decir, estamos trayendo parte de la energía del rayo a nuestra instalación eléctrica. Sin embargo, la razón de esta regla es lógica. No olvidemos que la razón primordial del código es la seguridad del personal y que el buen funcionamiento del equipo es secundario para el Código.

La energía del rayo puede consistir en altas intensidades de corriente y altos voltajes. La corriente generada por un rayo puede alcanzar niveles de 200 000 amperios y mayores. Si nuestro sistema de tierra de protección tiene una resistencia de 10 ohms, el voltaje sería de 2 000 000 de volts. A estos niveles, si los dos sistemas de tierra, el del edificio y el de protección contra rayos, no estuvieran interconectados, existiría una diferencia de potencial entre estos, y se produciría el salto del arco o chispa, que podría causar graves daños y aun la muerte de las personas. También podría ocurrir que si una persona tocara en el momento del rayo un objeto metálico y el conductor bajante del sistema, estaría expuesta a dos millones de voltios por unos cuantos microsegundos. En resumen, esta interconexión de sistemas es por razones de seguridad.

**3. Tierra del equipo o tierra de seguridad** está destinado a la protección del personal y el equipo contra fallas o cortocircuitos.

Este sistema conecta todas las partes metálicas de los equipos, es decir, los gabinetes metálicos, los conductos metálicos, las cubiertas metálicas de enseres domésticos eléctricos, y todo el equipo que puede ser energizado y entrar en contacto con personas, para mantener una misma referencia a tierra.

Este método no utiliza el sistema bajo tierra o electrodo de tierra. El código exige que estas conexiones sean efectivas, es decir, que de acuerdo con el código tenga continuidad, pueda transportar la corriente de falla con seguridad (o sea, que tenga adecuada ampacidad o capacidad para transportar la corriente de falla) y ofrezca una baja impedancia de tal forma que facilite la operación de los dispositivos de protección contra sobrecargas.

El conductor de tierra del equipo debe ser tratado de acuerdo con el código, para cumplir con el requisito de impedancia.

**4. Conductor conectado a tierra** o conductor con la definición del Código Eléctrico. Este sistema tiene la función de transportar la corriente de retorno del conductor de fase para un sistema monofásico y el retorno de las corrientes de fase

que no se cancelaron, para un sistema trifásico de fase dividida o sistema monofásico de tres hilos.

El conductor conectado a tierra, generalmente llamado el conductor neutro, de acuerdo con el código, es la referencia a tierra del sistema debido a que, en un sistema conectado a tierra, se conecta a tierra en el transformador de la empresa suministradora de energía y este conductor conectado a tierra se trae a nuestro equipo de servicio a la entrada del edificio porque el código así lo pide. En este punto se establece la unión neutro-tierra, en la barra de tierra, y se conecta el conductor del electrodo de tierra al conductor neutro. Es decir, el neutro es un conductor conectado a tierra. Y en cualquier sistema, cuando se habla de voltajes, se trata del voltaje de un conductor con referencia al conductor neutro, el cual esta conectado a tierra.

**5. Tierra Aislada.** Este sistema ofrece una tierra libre de ruido eléctrico para equipo electrónico sensible y se usa especialmente en salas de computadoras. También se conoce como tierra dedicada, aunque este término ha causado una gran confusión.

A principios de los 70, grandes e importantes empresas en Estados Unidos experimentaban problemas de ruido eléctrico e interferencias de alta frecuencia en los conductos metálicos que protegían los cables de señales o servían de conductores de tierra. Por ese motivo se invento otro conductor de tierra, como conductor separado, aislado del conducto, diferente del conductor de seguridad, con la exclusiva función de proporcionar una tierra libre de ruido, separada de la tierra contaminada o tierra “sucia” del edificio.

Los comités del código la aceptaron y se llamo tierra aislada. Se le hubiera podido llamar “tierra dedicada” u otro nombre más apropiado, pero el término “aislada” ha permanecido en la industria, lo cual ha causado innumerables problemas, confusión y caos en el sistema de tierra de sistema eléctrico de distribución.

Este sistema se sigue interpretando como una tierra separada de la tierra del edificio. Más adelante en este libro se tratará con profundidad este sistema.

**6. Tierra de referencia de señal** es el sistema de referencia cero para todos los equipos de señales digitales.

Este es un sistema inventado por fabricantes de equipos electrónicos con objetivo de proporcionar una tierra sin contaminación, separada de la tierra del equipo, pero si no están interconectadas es una violación del NEC.

En este caso, para cumplir con el código, el electrodo de la tierra de señal debería interconectarse con el sistema de tierra del edificio. A esta tierra se han designado gran cantidad de nombres:

Tierra de señal, tierra de ruido, tierra electrónica, pero, aunque sean buenas las intenciones para producir una violación del código.

Muy a menudo cuando los equipos se encuentran ubicados a 30 metros o mayor distancia del tablero principal, se conectan a la estructura metálica del edificio. Efectuar esta conexión no es una violación del código, pero puede existir una diferencia de potencial debido a la longitud misma del conductor de tierra.

Un cable AWG número 12 tiene aproximadamente 10 Ohms de resistencia, por lo tanto solo se requiere 0.10 volts para generar 1 amperio. Cualquier intensidad de corriente en el conductor de tierra afecta los equipos electrónicos ya que esta tierra es la referencia cero para el equipo electrónico digital.

Los primeros cuatro sistemas mencionados anteriormente son normas del código eléctrico para la seguridad del personal y el equipo; el quinto y sexto trata sobre la integridad del sistema y la protección de los componentes de equipos. Si los dos últimos sistemas se instalan correctamente, aseguran un buen funcionamiento y un largo ciclo de vida para los sistemas digitales.

### **1.4.2 ¿Qué es una conexión efectiva a tierra?**

La trayectoria a tierra requiere la instalación de tres elementos. Estos son:

1. Los circuitos.
2. El equipo.
3. Las cubiertas conductoras de equipos.

Es importante mantener una tierra efectiva para las tres diferentes instalaciones: circuitos, equipo y cubiertas metálicas.

La trayectoria a tierra se integra en el circuito eléctrico cuando este se instala. Todas las conexiones deben ser permanentes y continuas, y es de gran importancia que el conductor tenga el calibre adecuado para soportar la corriente de falla.

El código define al conductor de tierra como el conductor que se usa para conectar el equipo al electrodo de tierra. Este conductor debe ser de baja impedancia. La impedancia es la oposición al flujo de corriente y siempre hay que tratar de mantener bajo este valor.

Cuando se instala un circuito eléctrico debe mantenerse la continuidad del conductor. Es preciso utilizar el calibre apropiado para dar a este la capacidad necesaria para soportar la carga que está suministrando. También es necesario mantener una impedancia baja o una oposición al flujo de corriente. Por lo tanto, la definición de puesta efectiva a tierra nos indica que la tierra es otro circuito eléctrico. También debe instalarse con las mismas consideraciones y cuidados que se aplican a cualquier otro circuito de distribución eléctrica o circuito derivado.

El código habla de tres conductores de tierra y los identifica por su ubicación y función en el sistema de tierra.

Estos conductores son:

- El puente principal de unión.
- El conductor del electrodo de tierra.
- El conductor de tierra del equipo o tierra de seguridad.

El conductor de tierra no está destinado para transportar corriente de carga, bajo condiciones normales, solo bajo condiciones de falla.

Podríamos resumir, una conexión efectiva a tierra de la siguiente manera:

Que la trayectoria debe ser:

1. Conectada a tierra intencionalmente.
2. Permanente.
3. Continua.
4. Segura; el calibre de los conductores debe ser adecuado para que conduzcan sin riesgos cualquier corriente de falla.
5. Una trayectoria de baja impedancia.

Que la impedancia debe mantenerse a un valor bajo por tres razones:

1. Limitar el voltaje a tierra.
2. Facilitar la operación de los dispositivos de protección.
3. Drenar a tierra las corrientes indeseables que generan ruidos, lo mismo que corrientes estáticas y de fuga.

### **1.5. Funciones de una Malla de Puesta a Tierra**

Entre las más importantes se tienen:

1. Proporcionar seguridad al personal de la subestación.

2. Proporcionar una vía rápida de descarga de baja impedancia con el fin de mejorar y asegurar el funcionamiento de protecciones.
3. Evitar sobre voltajes producidos por descargas Atmosféricas, operación o maniobras de disyuntores.
4. Permitir la conducción a tierra de cargas estáticas o descargas atmosféricas.
5. Garantizar a niveles seguros los valores de la tensión a tierra de equipos o estructuras accidentalmente energizados y mantener en valores determinados la tensión fase–tierra de sistemas eléctricos, fijando los niveles de aislamiento.
6. Permitir a los equipos de protección aislar rápidamente las fallas.

Ahora bien, de una forma general se espera que una puesta a tierra tenga suficiente capacidad de dispersión de determinados valores de corriente hacia el suelo sin permitir que los potenciales en la superficie de éste suelo tenga niveles comprometedores para la seguridad de las personas por causa de una falla (control de gradiente de potencial).

#### **1.5.1. Requisitos de una Malla a Tierra**

Los requisitos que debe cumplir una malla de puesta a tierra son los siguientes:

- a. Debe tener una resistencia tal, que el sistema se considere sólidamente puesto a tierra.
- b. La variación de la resistencia, debido a cambios ambientales, debe ser despreciable de manera que la corriente de falla a tierra, en cualquier momento, sea capaz de producir el disparo de las protecciones.

- c. Impedancia de onda de valor bajo para fácil paso de las descargas atmosféricas.
- d. Debe conducir las corrientes de falla sin provocar gradientes de potencial peligrosos entre sus puntos vecinos.
- e. Al pasar la corriente de falla durante el tiempo máximo establecido de falla, (es decir disparo de respaldo), no debe haber calentamientos excesivos.
- f. Debe ser resistente a la corrosión.

Ahora bien, para realizar adecuadamente estas funciones, una puesta a tierra debe presentar las siguientes características:

- Baja resistencia
- Capacidad de conducción.

## CAPÍTULO 2

### **2. SISTEMA ELECTRODO DE TIERRA**

El término electrodo se utiliza para identificar a las terminales de una batería, las cuales indican la trayectoria para la circulación de los electrones dentro y fuera de la batería. El electrodo de tierra de una instalación eléctrica es el medio por el cual los electrones entran a la tierra. Por lo tanto, es la instalación de una terminal para facilitar la entrada de los electrones a la tierra.

La conexión a tierra, es una materia que frecuentemente se malinterpreta. La confusión se debe al hecho que no se definen adecuadamente los términos, a un mal entendimiento de los conceptos básicos y a la falta de conceptos nuevos para los modernos sistemas digitales electrónicos. El resultado es que muchas de las prácticas de conexión a tierra se basan en opiniones sin fundamento y supersticiones.

Las practicas de conexión a tierra que ofrecen excelente desempeño en bajas frecuencias de alimentación de 50, 60 y 400 hertz, etc., no son adecuadas para controlar correctamente las altas frecuencias presente en los modernos sistemas de datos. Debido al advenimiento de las fibras ópticas, la frecuencias de datos fluctúan prácticamente entre la corriente continua y la radiación electromagnética de la luz visible.

El objetivo principal del sistema de conexión a tierra es el control de corrientes indeseables, corrientes de falla, corrientes que generan las descargas electrostáticas, corrientes de ruido de alta frecuencia y corrientes de fuga.

Un conductor que usualmente posee una trayectoria de resistencia muy baja a las frecuencias de alimentación de ac, se convierte en uno de alta impedancia ante frecuencias más altas, cuando la mayor parte de la corriente se desplaza a través de la superficie del conductor. Si se trabaja con radiofrecuencias (RF) este conductor se convierte en antena que transmite y recibe las radiofrecuencias presentes en los equipos digitales (computarizados), que operan con frecuencias de reloj de 10 a 30

megahertz bandas de radio de onda corta. En estos equipos los datos se transfieren de sistema a sistema por medio de frecuencias, a niveles de megahertz.

El sistema a tierra debe controlar las corrientes para brindar la seguridad al personal y salvaguardar la integridad del sistema. El artículo 250 del código NEC consigna los requisitos generales tanto para la conexión a tierra de las instalaciones eléctricas como de los sistemas de protección contra fuego, así como los relacionados con la protección de vidas humanas.

Las normas de este documento deben aplicarse a cualquier edificio. El código destaca la necesidad de adherirse a las normas de seguridad y también señala la responsabilidad de los ingenieros.

Por parte, las corrientes de ruido sin control pueden causar el mal funcionamiento de los equipos, una degradación gradual y la destrucción de los componentes electrónicos, los mismos que la pérdida de memoria en los equipos computarizados.

## **2.1 Funciones del electrodo de Tierra**

El término electrodo de Tierra hace pensar en una varilla de tierra, pero existen otros electrodos de tierra.

El sistema electrodo de tierra puede consistir en uno o más electrodos que tienen funciones específicas como partes del sistema. Las funciones del electrodo de tierra son:

1. Mantener un buen contacto con la tierra de tal forma que las partes metálicas de la instalación eléctrica, que no conducen corriente, y que se conectan al sistema de tierra, se mantengan al potencial de tierra o potencial cero.
2. Proporcionar muchas trayectorias a tierra para la gran cantidad de electrones generados por una descarga atmosférica o un sobre voltaje transitorio, de tal forma que sean disipadas en forma instantánea.

3. Drenar las corrientes de fuga a tierra, lo mismo que las descargas electrostáticas, las cuales pueden generarse o acumularse en las cubiertas metálicas de los equipos.

Una función que muy a menudo se le asigna erróneamente al electrodo de tierra, es la de transportar corriente de falla para facilitar la operación de los dispositivos de protección. Esta no es una función del electrodo de tierra. La razón por la cual no se usa el electrodo de tierra como trayectoria de la corriente de falla, es alta impedancia del terreno, la cual no permitirá corriente suficiente para activar el dispositivo de protección, o interruptor de circuito.

La función primaria del electrodo de tierra es mantener la tierra y todas las cubiertas o partes metálicas del equipo eléctrico que no transportan corriente, a una referencia cero. Esto puede realizarse por medio de un sistema efectivo a tierra, lo cual significa una atención especial para mantener la continuidad del conductor de tierra del equipo. La unión de todos los electrodos de tierra es importante al fin de mantener el potencial cero. El electrodo de tierra ofrece multitud de trayectorias para los electrones, pero las trayectorias de baja impedancia dependen de la composición del suelo.

Es importante como parte del diseño de una instalación, analizar el tipo de suelo, desde el punto de vista de puesta a tierra. La conductividad de la tierra varía con la composición de esta, por lo tanto un suelo arenoso no tiene tanta conductividad como un suelo fértil. Adicionalmente, entre más alto sea el contenido de humedad, mejor será la conductividad.

El sistema electrodo de tierra, o tierra física, puede ser considerado como un sistema de conductores que proporciona una trayectoria controlada, para dirigir electrones hacia la tierra. Estos electrones pueden provenir de electricidad estática, corrientes de fuga o descargas atmosféricas.

## **2.2. La varilla de Tierra**

La sección 250-52(c) exige que si se utiliza una varilla de tierra, esta debe tener una longitud de 2.44 m (8pies), un diámetro de 13 mm (1/2 pulgada) como medidas mínimas. Esto proporciona aproximadamente 312 cm<sup>2</sup> (150 pulgadas cuadradas) de superficie en contacto directo con la tierra. Se ha probado que un incremento en la longitud de la varilla tiene un impacto más favorable en la resistencia de la tierra que en un aumento de su diámetro. Entre más larga sea la varilla menor será la resistencia a tierra y la resistencia que la rodea. Existen tres resistencias que considerar:

1. La de la varilla misma.
2. La del contacto entre la varilla y la tierra.
3. La de la tierra que rodea a la varilla.

La resistencia del material conductor que forma la varilla usualmente tiene un valor muy pequeño y es despreciable. Cuando la varilla de tierra se mantiene libre de grasa, pintura u otro material y la tierra se compacta firmemente contra la varilla, la resistencia de contacto también es muy baja y se considera despreciable.

La resistencia de la tierra se puede visualizar como una varilla de tierra con capas concéntricas de tierra a su alrededor, la capa más cercana a la varilla tiene menor superficie y por lo tanto presenta una mayor resistencia.

Al crecer el área de cada capa se incrementa el área alrededor de la varilla y existirá un gran número de trayectorias para el flujo de electrones. Este ejemplo puede compararse a un conductor. Entre más grande sea la sección transversal del conductor, más baja será su resistencia.

La teoría de las capas concéntricas alrededor de electrodo también explica porque un electrodo de mayor longitud puede dispersar mejor los electrones en la tierra que uno de menor longitud.

Es factible comparar el electrodo de tierra con un sistema de irrigación. El electrodo tiene una gran cantidad de trayectorias potenciales o puntos de irrigación donde los

electrodos entran a tierra. El efecto de irrigación proporciona diversos caminos que siguen los electrones para entrar a tierra.

Cuando el electrodo de tierra no hace un buen contacto con la tierra, esta unión se calentará, como cualquier otra unión de gran resistencia. En áreas donde el suelo tiene una composición arenosa, el calor generado por los electrodos tratando de entrar a la tierra es tal que se ha registrado que la temperatura ha cristalizado la arena. Aunque existan numerosas trayectorias par los electrones, la mayoría de estos entraran por la parte inferior del electrodo. Los altos voltajes especialmente la energía de un rayo viaja en línea recta.

### **2.3. Unión de los electrodos de tierra**

Los métodos para la unión de todos los electrodos de tierra, pueden ser por los siguientes métodos:

1. Estructura metálica del edificio.
2. Electrodo incrustado en concreto.
3. Anillo de tierra.
4. Cualquier otro electrodo artificial.

La principal razón de la unión de los electrodos es para evitar la diferencia de potencial entre cualquiera de ellos. Cuando se interconectan todos los electrodos, el resultado es una diferencia de potencial igual a cero en el sistema.

Los códigos del NEC prohíben la utilización del electrodo de tierra del sistema de rayos como electrodo de tierra del sistema eléctrico del edificio. En la edición de 1996 del Código, este permitía las uniones entre los sistemas de tierra del edificio y de tierra de protección contra rayos; sin embargo, en el código de protección contra rayos NFPA 780 (el mismo redactor del Código) exigía dicha conexión. En la última edición del código, es decir de 1999, se exige que se haga esta interconexión entre los dos sistemas.

La unión o interconexión de todos los electrodos de tierra como lo recomienda la sección de 250-92(b) limita la diferencia de potencial que pueda haber entre ellos. Esto se aplica no solamente para el sistema de tierra del edificio y el de protección contra rayos, sino también para los sistemas de teléfonos y de televisión por cable.

El problema consiste en que usualmente estos sistemas de televisión por cable (CATV) y teléfono, requieren su electrodo de tierra. Sin embargo, las tres empresas, la de energía eléctrica, la de televisión por cable y la telefónica son tres imperios separados que nunca se comunican entre si y por lo tanto no existe ninguna coordinación para interconectar estas tierras.

No obstante, para eliminar cualquier diferencia de potencial entre cualquiera de estos electrodos y unidades de equipos de cada sistema, se requiere que estos sistemas diferentes se deban unir conjuntamente.

#### **2.4 Estructura metálica del edificio como electrodo de tierra**

El código no explica cómo se conectan a tierra las vigas de acero del edificio de una manera efectiva excepto los requisitos de la sección 250-50. Cuando la estructura metálica del edificio se encuentra conectada a los cimientos de concreto reforzado, se considera como conectado a tierra efectivamente. Sin embargo, las especificaciones de algunos edificios requieren un conductor de cobre desnudo en las bases de concreto y que este unido a la estructura metálica.

#### **2.5 Electrodo incrustado en concreto**

Este electrodo o Ufer, se utiliza muy a menudo en sitios remotos de telecomunicaciones, cuando es rocoso y es difícil la utilización de otros esquemas de conexión a tierra. A menudo también se utiliza el sistema de radiales, el cual también es muy efectivo. Esto dos últimos sistemas proporcionan un amplio contacto con la tierra o su superficie para disipar el trafico de electrones que, de otra forma, se regresaría por las líneas de transmisión de datos y señales.

La sección 250-50 (c), el electrodo incrustado en concreto o tierra Ufer, permite el uso de varillas de refuerzo de acero o un conductor de cobre, recubierto de un mínimo de 5cm (2pulgadas) de concreto. Además, el concreto debe estar en contacto directo con la tierra. Este sistema de electrodo de tierra cada vez es más popular. Las varillas de refuerzo ofrecen muchas trayectorias paralelas a los electrones y así se disminuye la impedancia a tierra.

El electrodo incrustado en concreto ofrece las siguientes ventajas:

1. El concreto en contacto directo con la tierra tiende a retener la humedad.
2. Las varillas de refuerzo ofrecen más de una trayectoria para el flujo de electrones.
3. El peso del edificio mantiene una presión constante en el punto de conexión entre el concreto y la tierra.
4. El concreto proporciona una superficie amplia de contacto con la tierra.
5. Muchas pruebas realizadas con la tierra Ufer han demostrado que es un electrodo de tierra efectivo y confiable.

Una precaución en obras civiles que utilizan los cimientos del edificio como tierra Ufer es no emplear una película de plástico como barrera de vapor ya que se pierde el contacto directo entre el concreto y la tierra. En este caso los cimientos del edificio no se pueden utilizar como tierra Ufer.

## **2.6. Anillo de tierra como electrodo de tierra**

La sección 250-50(d), tratada anteriormente, exige que el anillo tenga al menos 6.1 m (20pies) de alambre de cobre, calibre AWG, numero 2 y que sea enterrado a una profundidad mínima de 76.2 cm (2 1/2pies).

Una instalación de alimentación para computadoras puede especificar un anillo de tierra independiente, además del electrodo de tierra existente.

## **2.7. Electrodos artificiales o fabricados especialmente para la puesta a tierra**

La sección 250-52 lista los electrodos artificiales y menciona algunos puntos importantes:

1. Cuando no hay disponibles electrodos tales como estructuras metálicas del edificio, electrodo incrustado en concreto o un anillo de tierra, pueden usarse los electrodos artificiales.
2. Para obtener mejores resultados, los electrodos artificiales deben instalarse por debajo del nivel permanente de humedad.
3. Los electrodos artificiales no deben recubrirse de pintura, esmalte o otros revestimientos no conductores. Esta disposición del código tiene como fin que haya un buen contacto entre el electrodo y la tierra. Por lo tanto, la grasa, pintura y esmalte se consideran aislantes.
4. Los electrodos de tierra deben estar separados al menos 1.8m. Esta regla también se aplica para los electrodos de tierra del sistema de protección contra rayos.

La sección 250-52(a) consigna tanto lo que se permite como lo que se prohíbe en los electrodos de tierra. Específicamente está prohibido:

1. El uso de tubería de gas como electrodos de tierra.
2. Electrodos de tierra hechos de aluminio.
3. Y hace unos pocos años también se ha prohibió la utilización de tuberías metálicas de agua que se permitía en años anteriores.

Entre unos de los también permitidos, como electrodos de tierra se muestran:

1. Otros sistemas metálicos bajo tierra, entre ellos una estructura metálica puesta tierra de una forma efectiva, una tubería metálica de petróleo o aceite o un tanque metálico bajo tierra.
2. Varillas y electrodos. Estos son los electrodos de tierra más comunes. Varios tipos de barras o varillas lo mismo que tuberías metálicas son reconocidas como electrodos de tierra.

3. Electrodo de placa cuyas medidas mínimas son de 30.5 cm por 30.5 cm y 6.5 mm de espesor y están hechos de hierro y acero. Sin embargo, no existe una especificación en cuanto a la profundidad de enterramiento de la placa excepto en la sección 250-52, donde se indica que cuando sea práctico se instale por debajo del nivel de humedad del suelo.

Los requisitos de la sección 250-56 exigen que el espaciamiento entre electrodos sea de 1.80 m cuando la resistencia sea mayor de 25 ohms y se limita a dos el número máximo de electrodos requeridos. Las especificaciones de esta sección se aplican solamente a varillas, tubos o electrodos de placa.

Cuando se instala el segundo electrodo se unen ambos y se consideran como un solo electrodo de tierra. De nuevo se menciona la distancia de 1.80 m entre electrodos en las notas de la sección y se indica que la edificación mejora si los electrodos están separados a distancias mayores de 1.80 m. Esto ayuda a que las capas concéntricas alrededor de los electrodos se superpongan entre sí.

En la industria de las computadoras se usa un sistema de tres electrodos, cada uno ubicado en cada esquina de un triángulo de 3 m, que después se interconectan como un solo sistema de electrodo de tierra.

## **2.8. La Barra Electrolítica o Química**

La barra electrolítica es una variación del electrodo de tierra de varilla. Sobre todo, se usa primariamente en instalaciones donde existen equipos que tienen componentes sensibles y se requiere una baja resistencia a tierra, o donde existen malas condiciones de suelo y es difícil obtener una baja resistencia del terreno. Cuando se instala correctamente, este electrodo de tubo produce un electrolito con buena conductividad, la cual penetra el suelo alrededor de la barra y aumenta la conductividad de la tierra a su alrededor.

El código permite que el electrodo de tierra tenga una impedancia a tierra de 25 Ohms o menor. Los fabricantes de equipo electrónicos y de computadoras requieren

una resistencia de tierra de valores menores de 25 Ohms. Algunos requieren una impedancia de 5 Ohms o menos. Esto se puede lograr usando uno o más electrodos electrolíticos.

Para obtener la resistencia que se requiere puede ser necesario una barra electrolítica mayor de 2.40 m y cierto número de barras electrolíticas.

La barra electrolítica consiste en un tubo compuesto por 95% de cobre y 5% níquel, de 2.40 m de longitud o mayor y aproximadamente 5 cm de diámetro, y llena de una mezcla de sales:  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{NaCl}$ , que absorben la humedad.

El tubo tiene tapones de cobre en ambos extremos y cuenta con dos orificios a 5 cm de la parte superior y cuatro orificios de 5 cm de la parte inferior, por los cuales los electrolitos se distribuyen en la tierra. El electrodo se instala en un hueco perforado en la tierra, que debe tener un mínimo de 15 cm de diámetro y rebasar por 15 cm la longitud del electrodo.

El electrodo se ubica en el centro del hueco con 15 cm de la parte superior del electrodo por debajo de la superficie. El hueco alrededor del electrodo se rellena con bentonita (arcilla cuya virtud principal radica en absorber y retener agua), la cual se mezcla con agua. La bentonita es un material volcánico de alta conductividad. En la parte superior se deja un espacio sin obstrucción para la conexión del conductor del electrodo de tierra y permite que los agujeros no se obstruyan.

El método de operación de la barra electrolítica se basa en la capacidad del cloruro de calcio para condensar la humedad del aire a través de los dos agujeros de la parte superior. Debido a la fuerza de gravedad el agua pasa a través de la sal dentro del tubo y se convierte en electrolito, el cual es un buen conductor de electrones. Existe un pequeño compartimiento en la parte inferior del tubo donde se almacena agua y se desborda dentro del hueco lleno de bentonita. El agua se convierte en iones de sal metálicos y en contacto con la tierra aumenta la conductividad de esta. También aumenta la conductividad de la bentonita, la cual tiene la propiedad de adherirse a la superficie exterior del tubo, lo mismo que a la superficie del hueco.

No importa que tan seco sea el ambiente, la bentonita se adhiere al terreno. Esto elimina la resistencia entre el electrodo y la tierra. El resultado total es el descanso de la resistencia de las capas de tierra alrededor del electrodo. No es preciso reemplazar la sal contenida en el tubo, ya que no se disipa con el tiempo y su vida útil se estima en 25 años.

## CAPITULO 3

### RESISTIVIDAD DEL SUELO

El conocimiento de las resistividades o resistencias específicas de un terreno es esencial en el proyecto y análisis de puestas a tierra, pues influye proporcionalmente en los valores de resistencia y en las solicitaciones de voltaje que pueden aparecer en una instalación. Otras características tales como sus propiedades magnéticas o dieléctricas pueden requerirse en situaciones particulares.

La resistividad de los suelos normales varía dentro de un amplio rango que puede alcanzar relaciones de 1 a 100 o incluso 1 a 1.000. Por tanto, es necesario conocer para cada situación particular el valor real de la resistividad del terreno que corresponde, de manera de no sub dimensionar la puesta a tierra, con los consecuentes riesgos para las personas y equipos; o sobredimensionarla, con costos mayores que los necesarios.

Lo normal es que los terrenos estén configurados por diferentes estratos de minerales ubicados aproximadamente paralelos a la superficie del suelo. El objetivo de la medición de resistividad en la zona donde se construirá una puesta a tierra, es determinar esta propiedad para cada uno de los estratos presentes y su espesor medio, hasta una cierta profundidad de interés.

Esta profundidad depende principalmente del tamaño de la puesta a tierra que se desea construir. Se utiliza para determinar estos parámetros, un tipo de medición en profundidad denominado sondeo eléctrico.

#### **1.1. Definición de Resistividad**

La resistividad o resistencia específica de un material se define como la resistencia en corriente continua entre las caras paralelas opuestas de una porción de éste, de longitud unitaria y sección unitaria uniforme, por ejemplo, un cubo de dimensión unitaria. En el sistema de unidades MKS, que es el usado en este manual y el utilizado actualmente en ciencia y tecnología, la resistividad se expresa dimensionalmente en forma simplificada en  $\text{ohm}\times\text{m}^2$ , lo que es equivalente a  $\text{ohm}\times\text{m}$

(ohm por metro u ohm metro). En la práctica, por razones de legibilidad se acostumbra insertar un guión entre las unidades, escribiendo la dimensión como ohm-m, u  $\Omega$ -m.

### **3.2 Conducción Eléctrica en Suelos**

La mayoría de los minerales que conforman los suelos (arenas, arcillas, rocas, etc.) son, de por sí solos, muy malos conductores de la electricidad. Sin embargo, cuando se les adiciona agua, su resistividad disminuye considerablemente y pueden considerarse como conductores aceptables, aunque muy pobres en comparación con los conductores metálicos clásicos. Así por ejemplo, la resistividad del cobre es de aproximadamente  $1,6 \times 10^{-8} \Omega$ -m, mientras que la resistividad media de un terreno normal es del orden de  $100 \Omega$ -m.

Esta fuerte influencia de la humedad en la resistividad de los minerales se debe a que, para la mayoría de ellos, la conducción eléctrica es mixta con enlaces covalentes y iónicos, siendo estos últimos los más importantes.

El proceso de conducción eléctrica es, entonces, en mayor medida de carácter electroquímico, donde los portadores de las cargas eléctricas son los iones disueltos en el agua atrapada. En algunos pocos minerales la conducción se debe a su contenido de metales, siendo los electrones los portadores principales de las cargas eléctricas.

De este modo, la resistividad de un suelo depende en gran medida de la cantidad de agua atrapada, de la resistividad de esta agua y de otras características particulares del suelo. Se consideran importantes en determinar la resistividad, las siguientes propiedades del suelo:

- Tipos de minerales que lo conforman.
- Contenido de humedad.
- Composición química y concentración de las sales disueltas en el agua.
- Temperatura.

- Granulometría del material que lo conforma.
- Compactibilidad.
- Estrato grafía.
- Otros.

### **3.3. Anisotropía de Resistividad**

Algunos terrenos presentan una característica física denominada anisotropía (an=no, iso=igual, tropo=propiedad), en lo concerniente a la resistividad. Esto significa que la resistividad depende de la dirección en que se mide [5]. Esta anomalía se debe a las orientaciones que presentan los cristales de algunos minerales que conforman el terreno, en particular, minerales semiconductores. Así, el grafito es uno de los minerales que en mayor cuantía presenta esta característica. También se observa anisotropía en el caso de rocas que poseen inclusiones metálicas o fisuras con una orientación preferente, y en conformaciones estratificadas de minerales. Para los propósitos que nos interesan, esta anomalía poco frecuente en una magnitud importante, tiene un efecto reducido si se considera que las mediciones en sitio de la resistividad de un suelo, reflejan en gran medida la dirección que tomará la corriente dispersada por una puesta a tierra al ocurrir una falla en la instalación o en el sistema de transmisión asociado.

## CAPÍTULO 4

### **DISEÑO Y CALCULO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA**

Cuando el uso de electrodos simples no es satisfactorio para cumplir los requerimientos de seguridad y de operaciones del sistema es necesario disponer de configuraciones de electrodos de mayor complejidad. En este caso es mejor hacer los mejores refuerzos para disponer de la apropiada información ya sean múltiples los factores que incluyen en el diseño. Entre estos factores Tenemos:

- Modelo del suelo.
- Magnitud de la Corriente de Falla.
- El área disponible para implantar la malla.

Fundamentalmente el diseño de una malla de tierra debe cumplir los parámetros siguientes:

- a) Asegurar que las tensiones de toque y paso producidos ante la circulación de la peor condición de falla sea menor que los valores de tensiones de paso y toque, considerados seguros a las personas.
- b) Asegurar disponer de bajos valores de resistencia de puesta a tierra de manera que se disponga la magnitud suficiente de corriente que permita la operación apropiada de los sistemas de protección.

#### **4.1 Modelo del Suelo**

Es determinado por las características naturales del área de implantación. El suelo puede ser modulado como uniforme, de dos capas o multicapa. Los modelos multicapa proporcionan la mejor información de las condiciones reales, sin embargo su modelación requiere técnicas complejas de cálculo y software especializados.

Para la mayoría de aplicaciones en subestaciones de tipo distribución, industrial y comercial una modelación a dos capas brinda la suficiente precisión por lo cual son aceptables sus resultados.

#### **4.2 Modelo del suelo a dos capas**

Un modelo de dos capas representa al suelo conformado por una capa superior de resistividad  $\rho_1$  y profundidad  $h$  y una capa inferior de resistividad  $\rho_2$  y profundidad infinita.

Los efectos de los cambios del valor de resistividades entre las capas es definido a través del coeficiente de reflexión, identificado “k” y expresado como:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Donde:

$\rho_1$  = Resistividad de la capa superficial en Ohm-m.

$\rho_2$  = Resistividad de la capa inferior en Ohm-m.

La determinación de los valores de  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$  la obtendremos por el método grafico.

Las mediciones de Resistividad tomadas en el terreno fueron las siguientes:

a	Primera Prueba		Segunda Prueba		Tercera Prueba	
	R ( $\Omega$ )	$\rho(\Omega \text{ m})$	R ( $\Omega$ )	$\rho(\Omega \text{ m})$	R ( $\Omega$ )	$\rho(\Omega \text{ m})$
1	1.85	11.62392	1.888	11.862682	1.485	9.330552
2	0.48	6.031872	0.448	5.6297472	0.461	5.7931104
3	0.23	4.335408	0.242	4.5616032	0.186	3.5060256
4	0.124	3.1164672	0.148	3.7196544	0.12	3.015936
5	0.087	2.733192	0.1	3.1416	0.075	2.3562
6	0.07	2.638944	0.079	2.9782368	0.06	2.261952
7	0.048	2.1111552	0.061	2.6829264	0.044	1.9352256
8	0.035	1.759296	0.048	2.4127488	0.035	1.759296
9	0.03	1.696464				

**Tabla 4.1:** Mediciones de Resistencia del Suelo a distintas Profundidades

a	Cuarta Prueba		Quinta Prueba		Sexta Prueba	
	R ( $\Omega$ )	$\rho(\Omega \text{ m})$	R ( $\Omega$ )	$\rho(\Omega \text{ m})$	R ( $\Omega$ )	$\rho(\Omega \text{ m})$
1	1.624	10.203893	1.481	9.3053974	1.63	10.241592
2	0.433	5.4412385	0.54	6.7858401	0.484	6.0821234
3	0.201	3.7887607	0.297	5.5983181	0.223	4.203451
4	0.126	3.1667254	0.189	4.7500881	0.141	3.5437165
5	0.08	2.5132741	0.108	3.3929201	0.09	2.8274334
6			0.058	2.1865485	0.058	2.1865485
7						
8						
9						

**Tabla 4.2:** Mediciones de Resistencia del Suelo a distintas Profundidades

a	Septima Prueba		Octava Prueba		Novena Prueba	
	R ( $\Omega$ )	$\rho(\Omega \text{ m})$	R ( $\Omega$ )	$\rho(\Omega \text{ m})$	R ( $\Omega$ )	$\rho(\Omega \text{ m})$
1	2.26	14.199999	2.7	16.9646	2.39	15.016813
2	0.54	6.7858401	1.01	12.692034	0.69	8.6707957
3	0.23	4.3353979	0.45	8.4823002	0.29	5.4663712
4	0.14	3.5185838	0.2	5.0265482	0.13	3.2672564
5			0.1	3.1415927		
6			0.056	2.1111503		
7						
8						
9						

**Tabla 4.3:** Mediciones de Resistencia del Suelo a distintas Profundidades

<b>Gráfica Envolvente</b>	
$\rho(\Omega m)$	<b>a</b>
12.083272	1
7.1014002	2
4.9197373	3
3.6805529	4
2.872316	5
2.3938967	6
2.2431024	7
1.9771136	8
1.696464	9

**Tabla 4.4** Gráfica Envolvente de todas las Mediciones Realizadas

### 4.3. Fotografías del Trabajo de Estudio de Suelo



**Foto 4.1:** Mediciones de Resistencia del Suelo

Cancha de Tierra Colegio Domingo Comín



**Foto 4.2:** Mediciones de Resistencia del Suelo  
Cancha de Tierra Colegio Domingo Comín



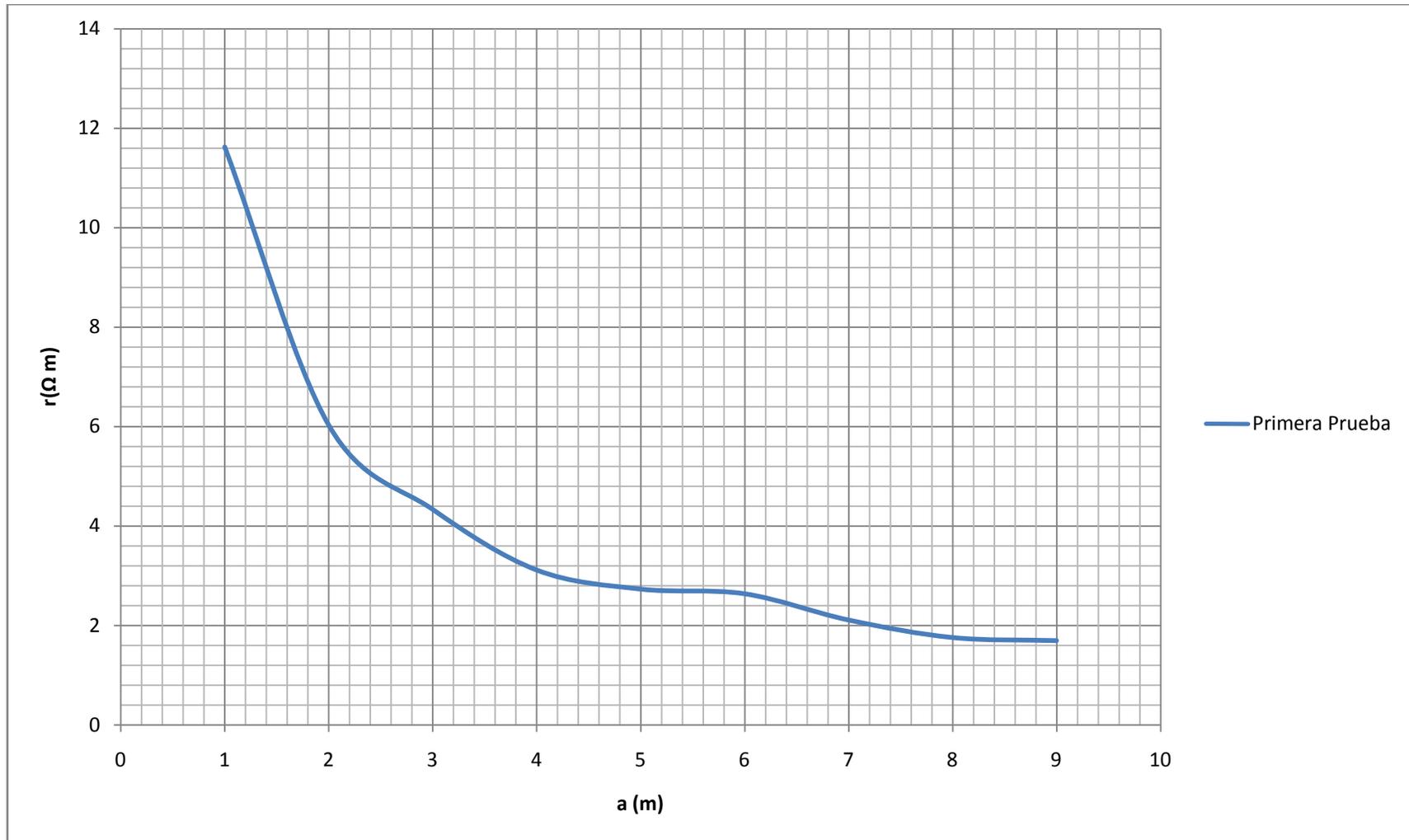
**Foto 4.3:** Mediciones de Resistencia del Suelo  
Cancha de Tierra Colegio Domingo Comín



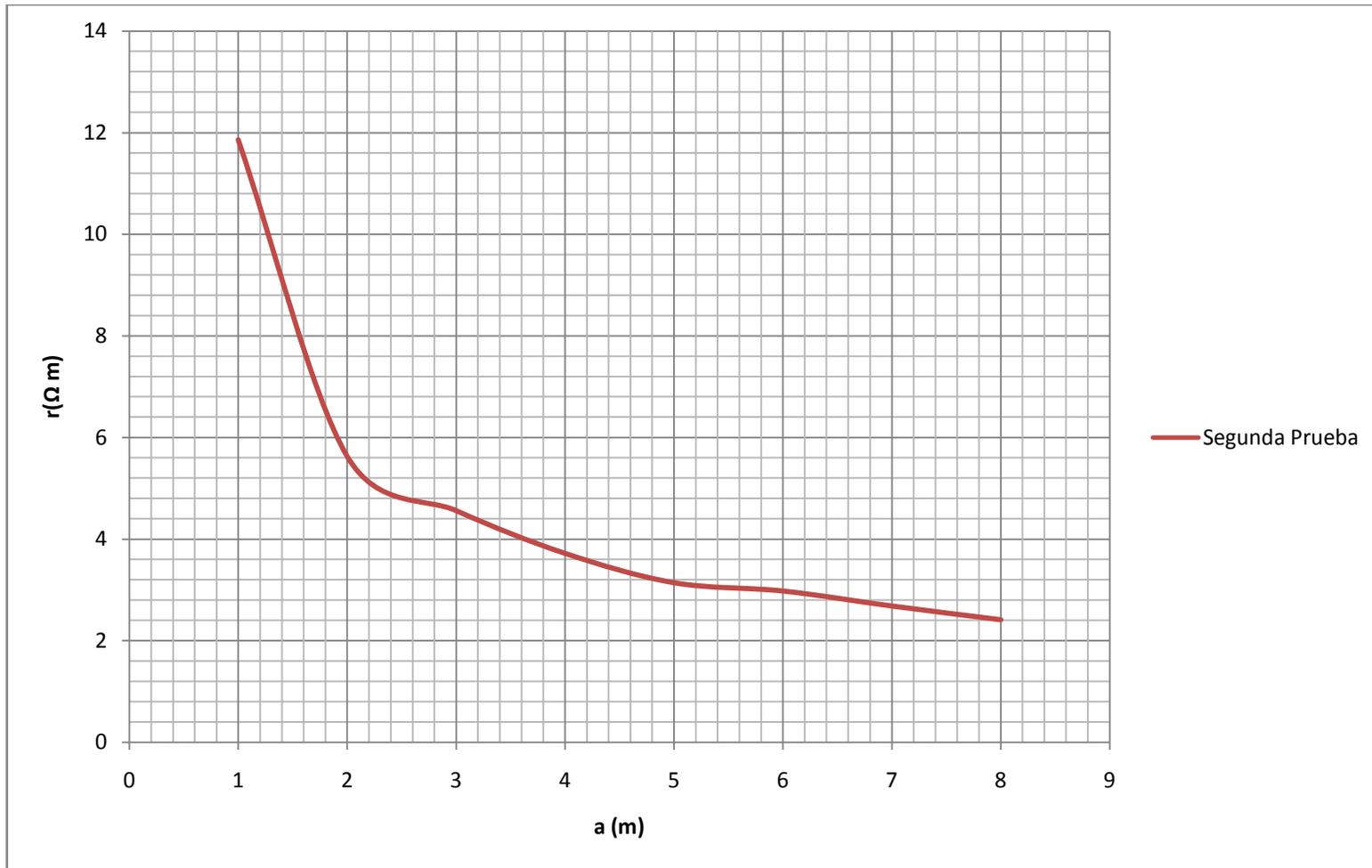
**Foto 4.4:** Medición de Resistencia según el Método de Wenner  
Cancha de Tierra Colegio Domingo Comín



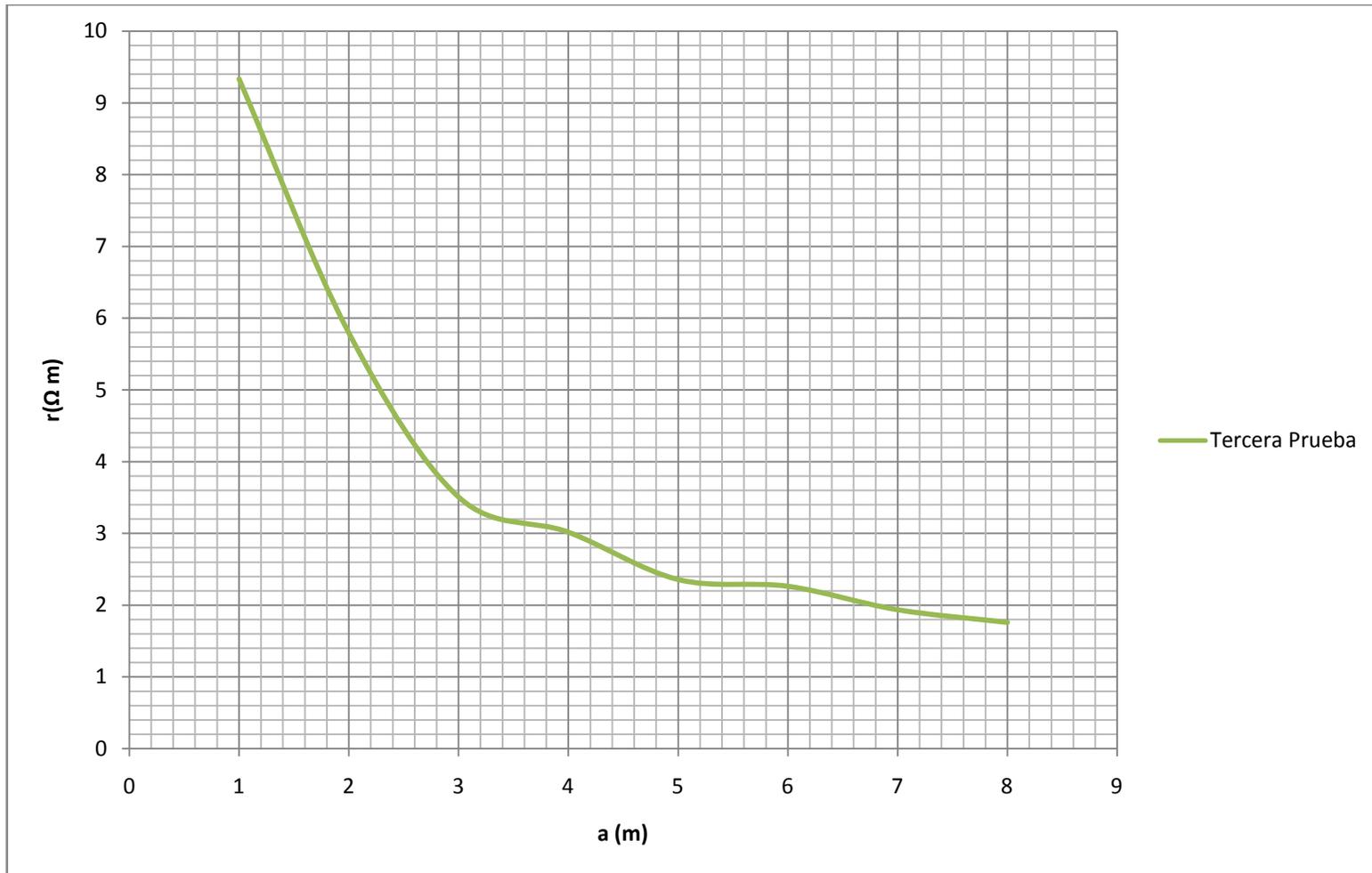
**Foto 4.5:** Instrumentos y Equipo de Medición



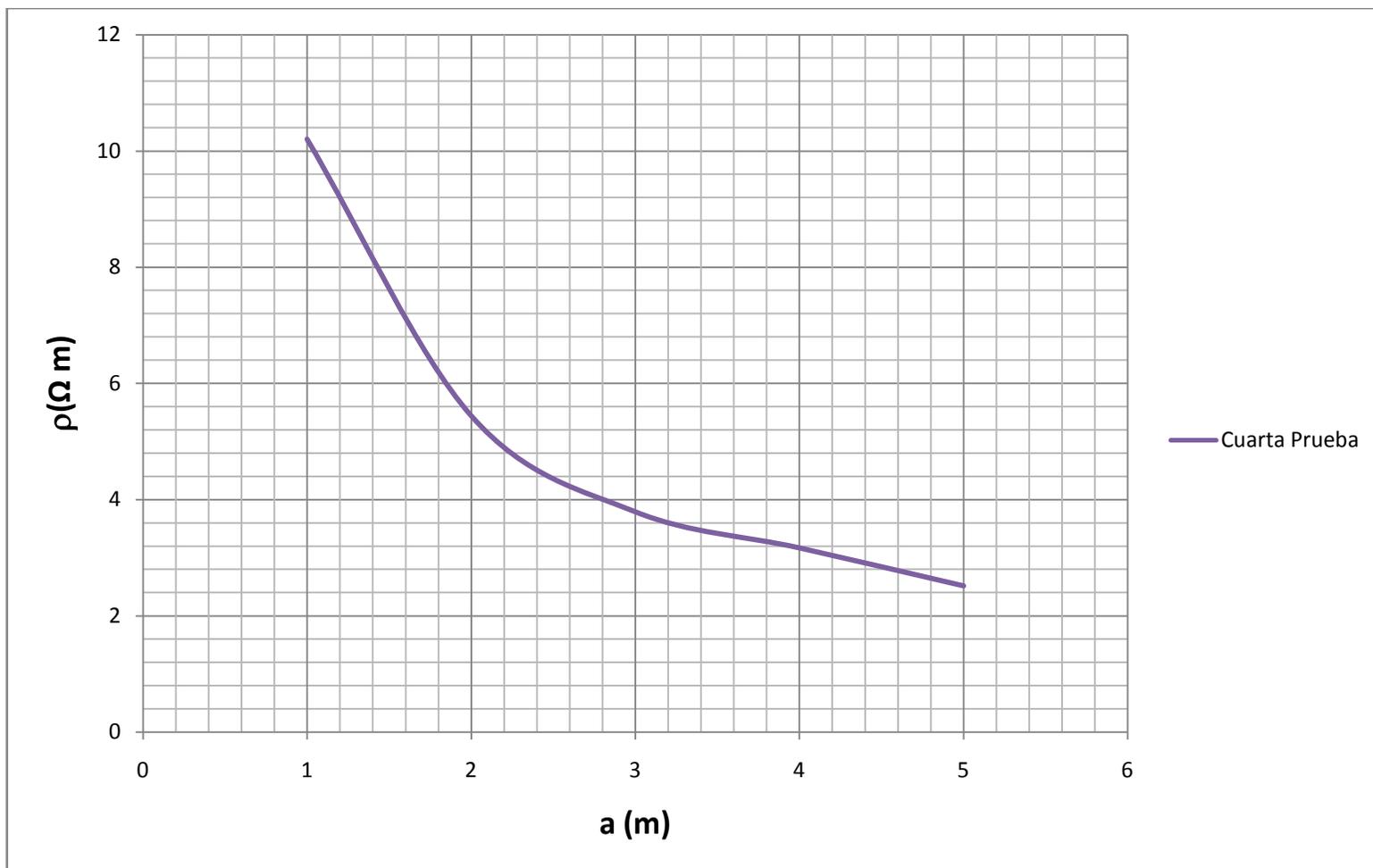
**Gráfica 4.1:** Primera Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia



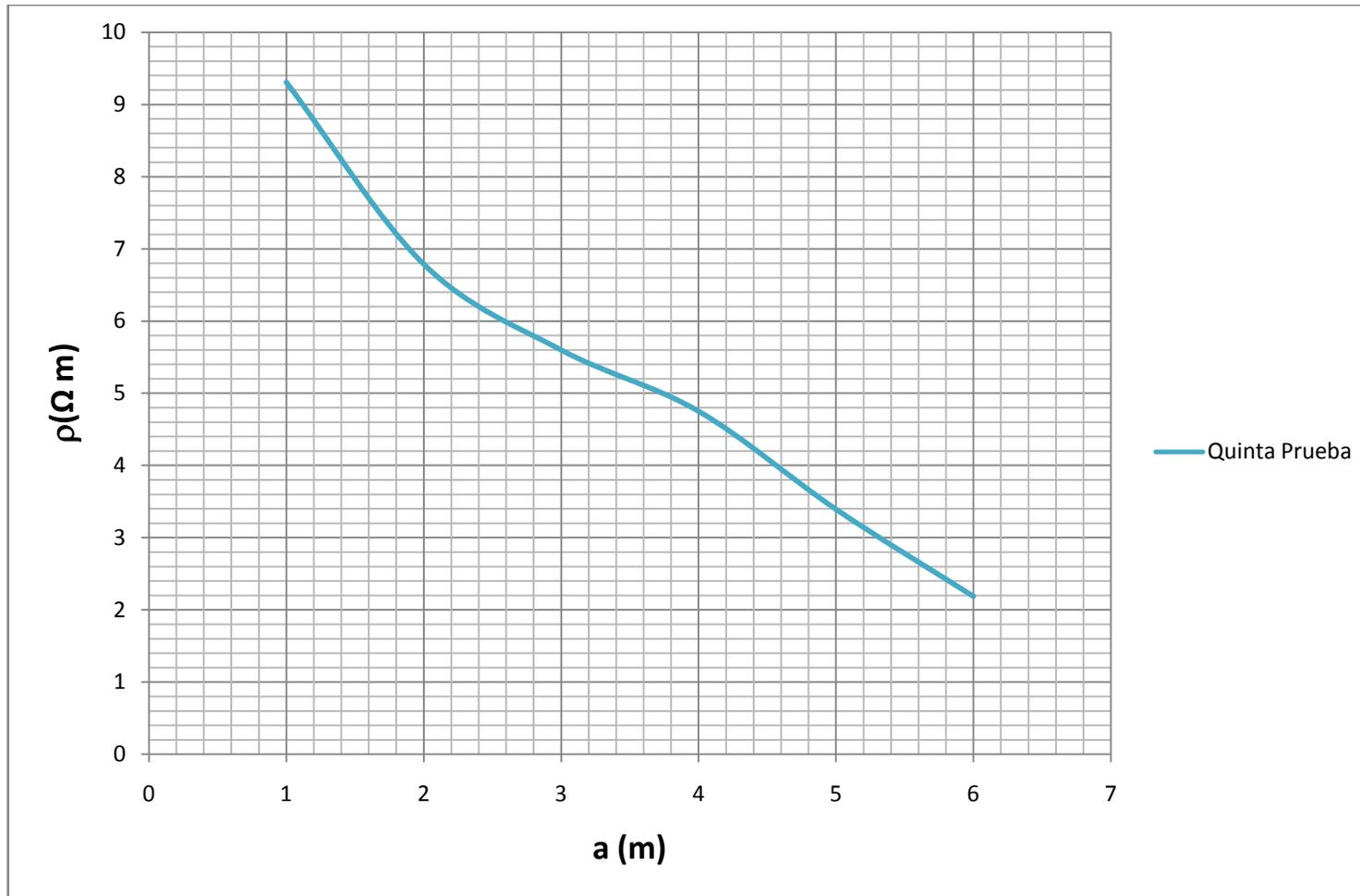
**Gráfico 4.1:** Segunda Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia



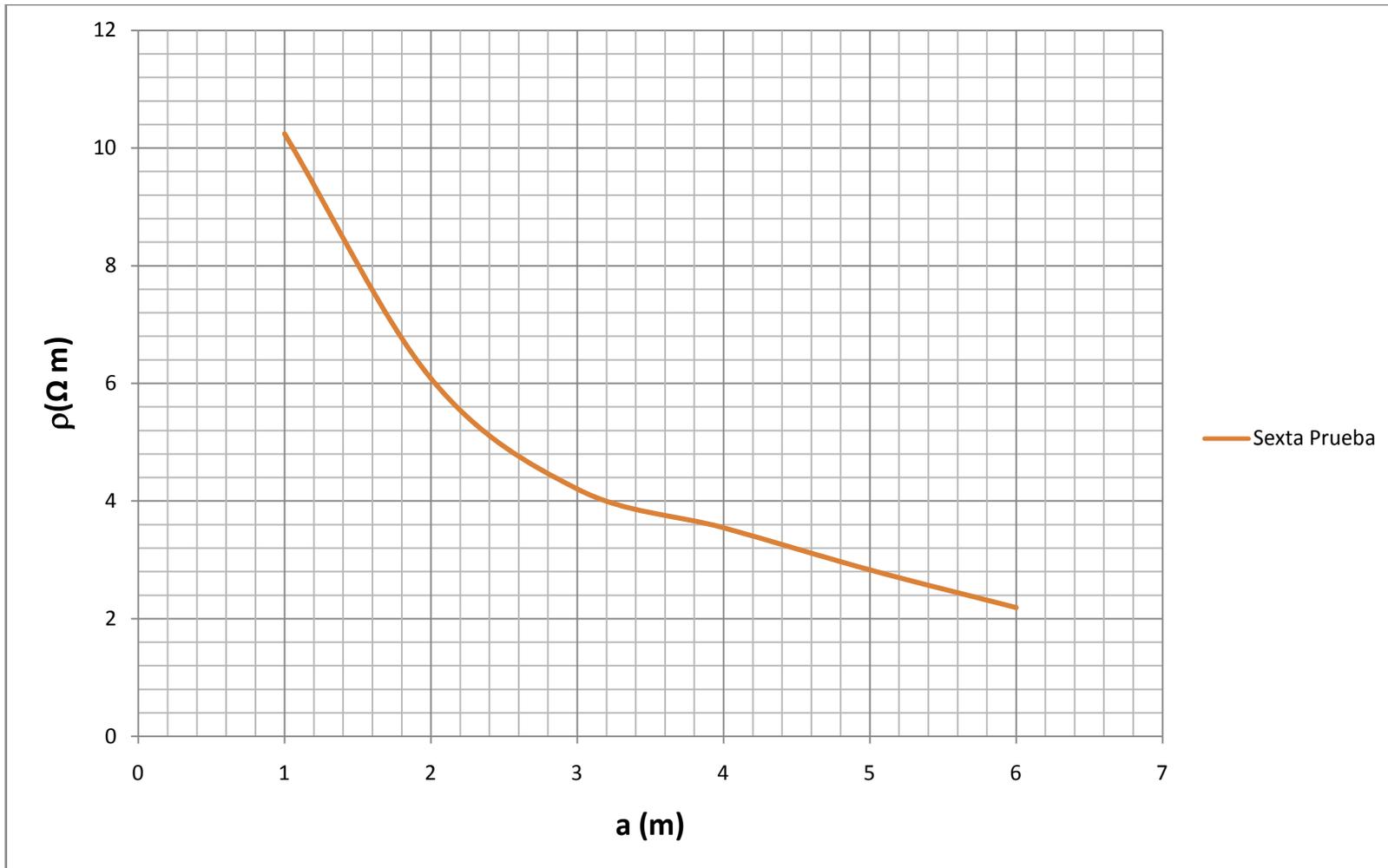
**Gráfica 4.1:** Tercera Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia



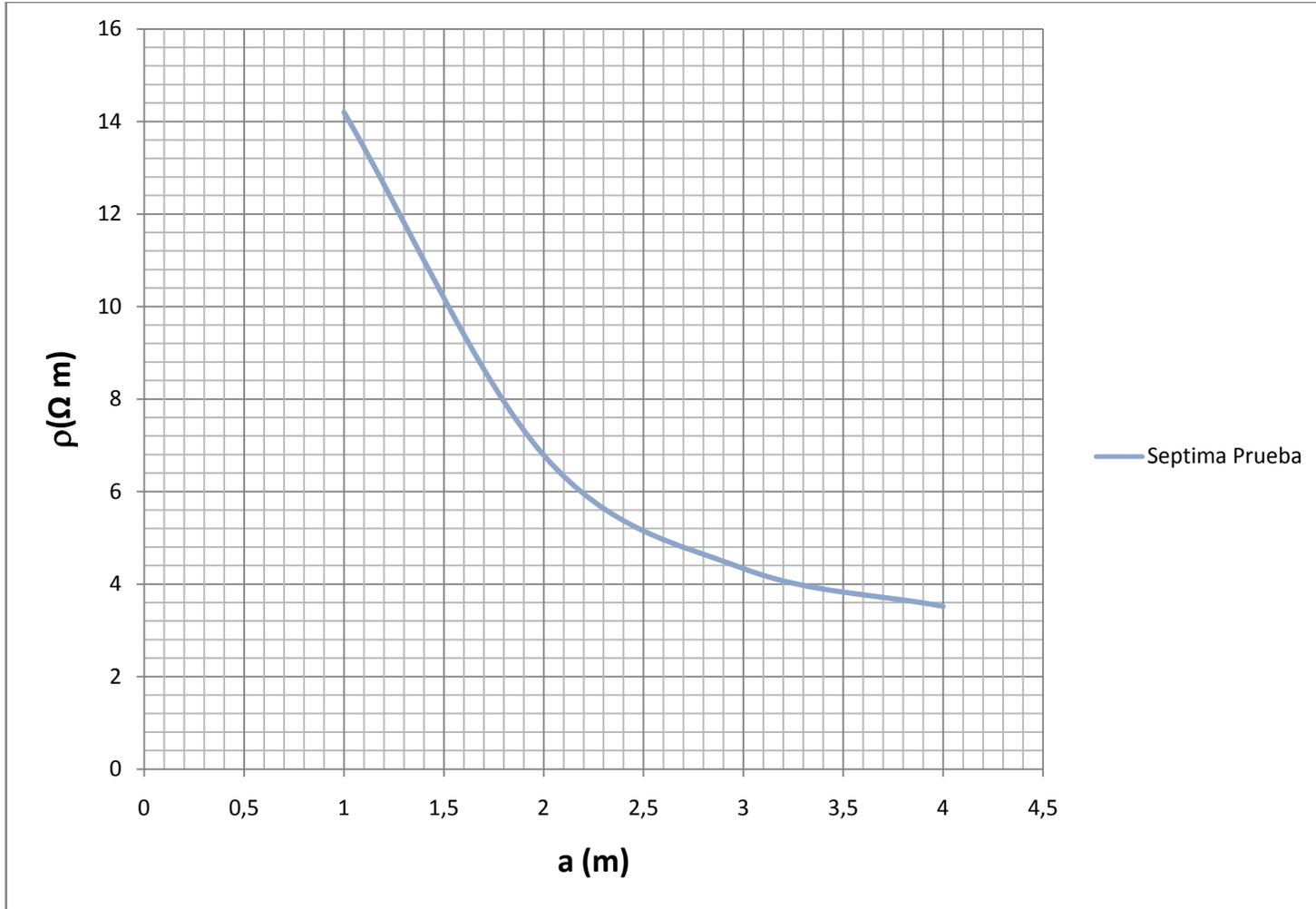
**Gráfica 4.2:** Cuarta Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia



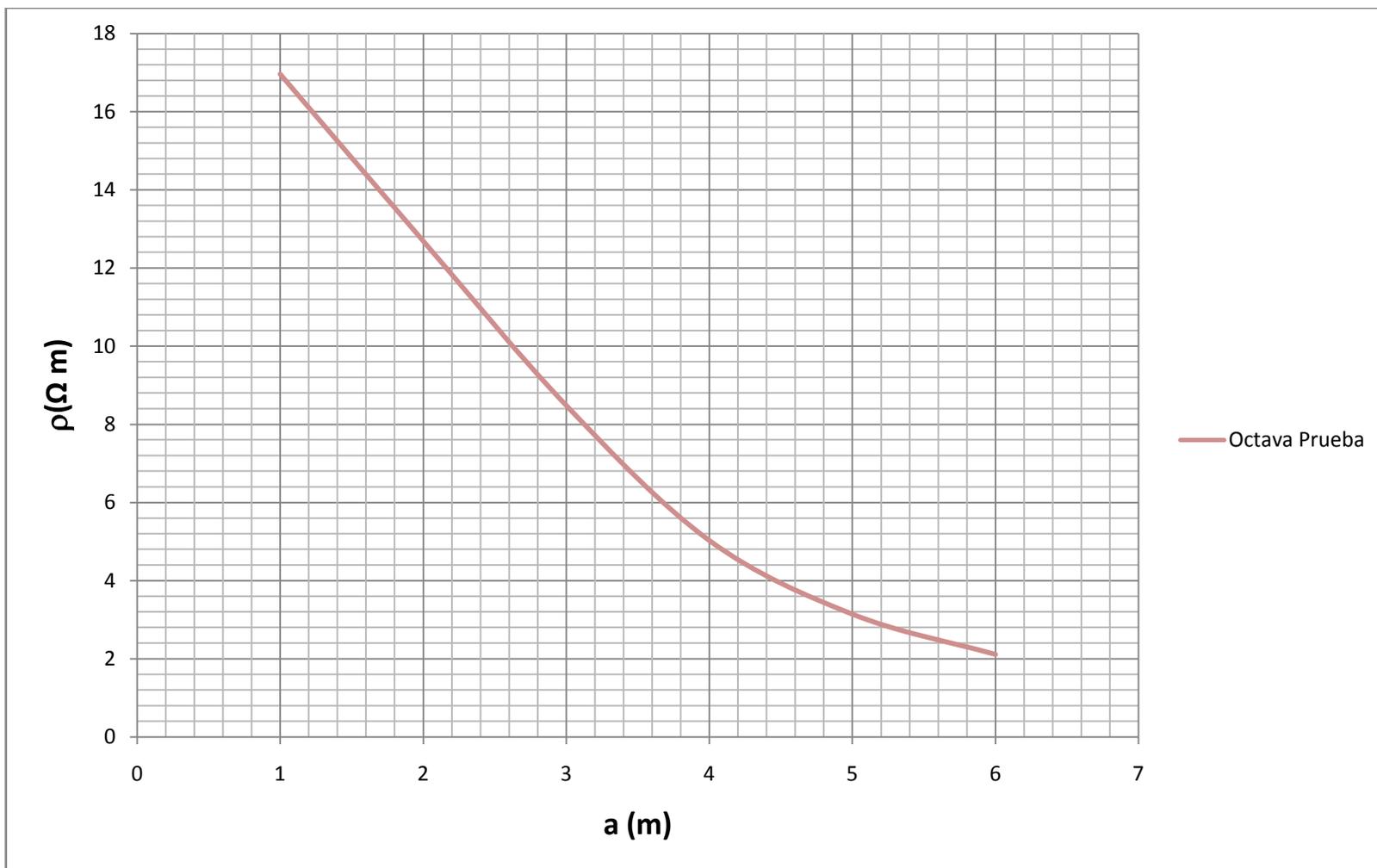
**Gráfica 4.2:** Quinta Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia



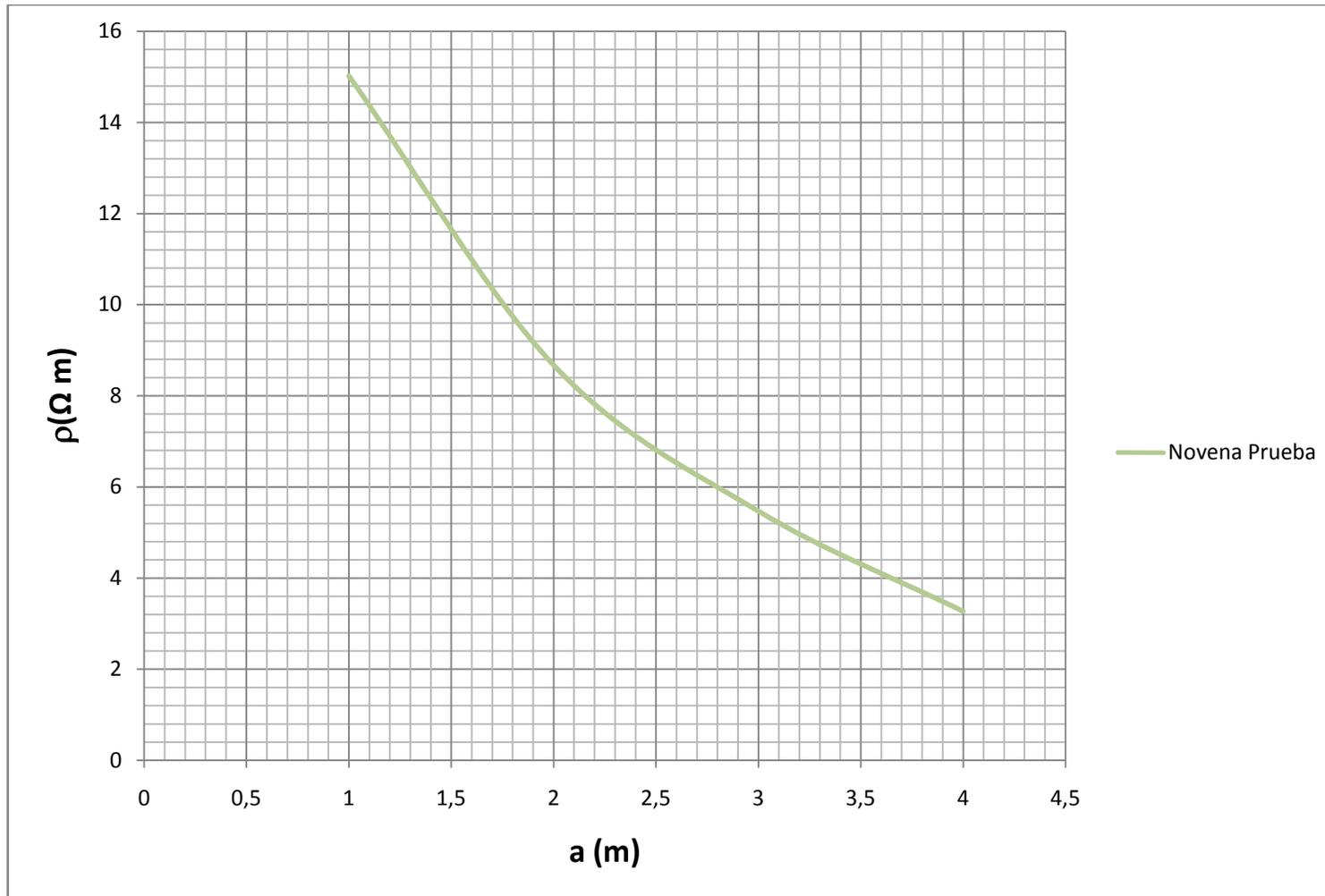
**Gráfica 4.2:** Sexta Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia



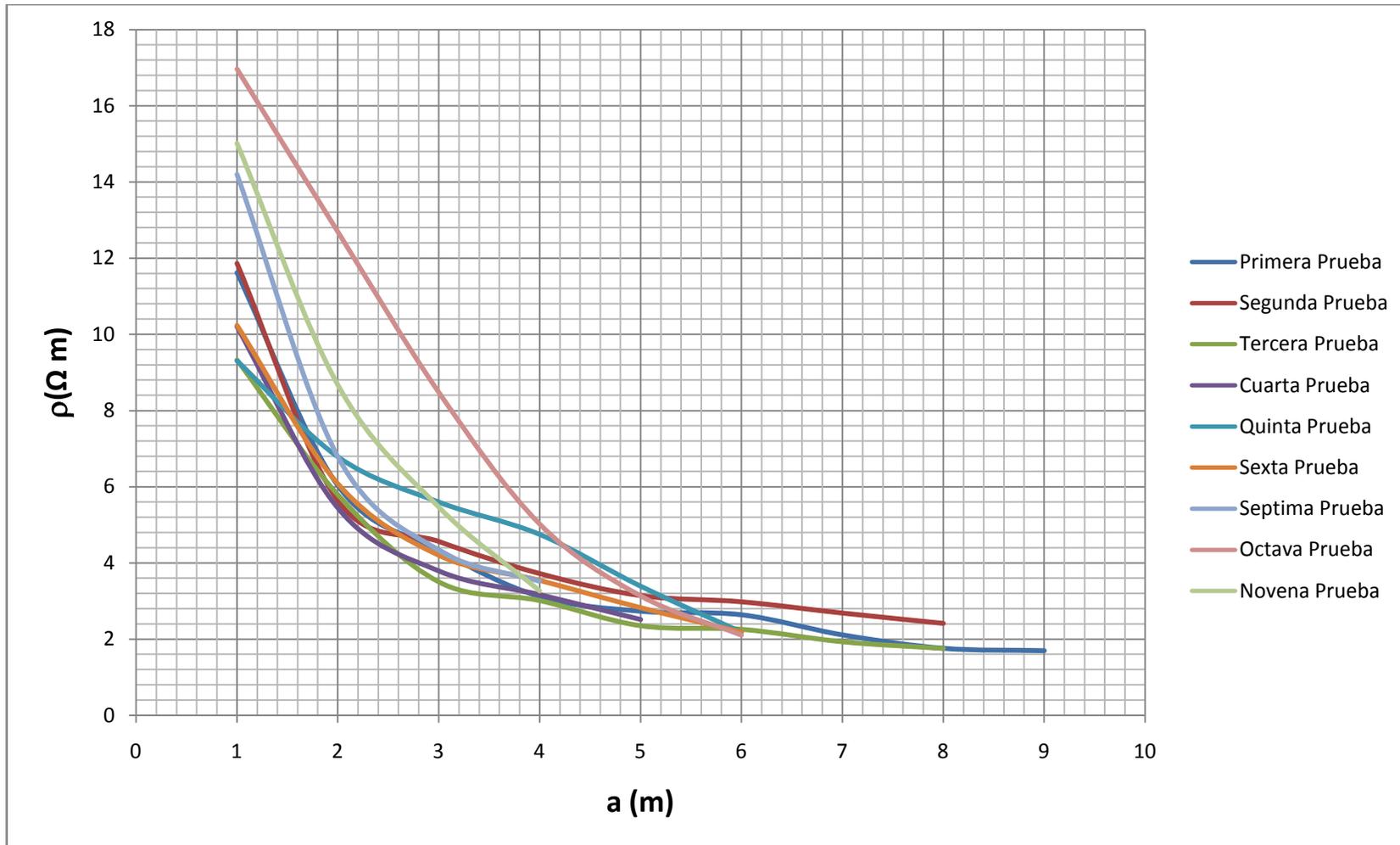
**Gráfica 4.3:** Séptima Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia



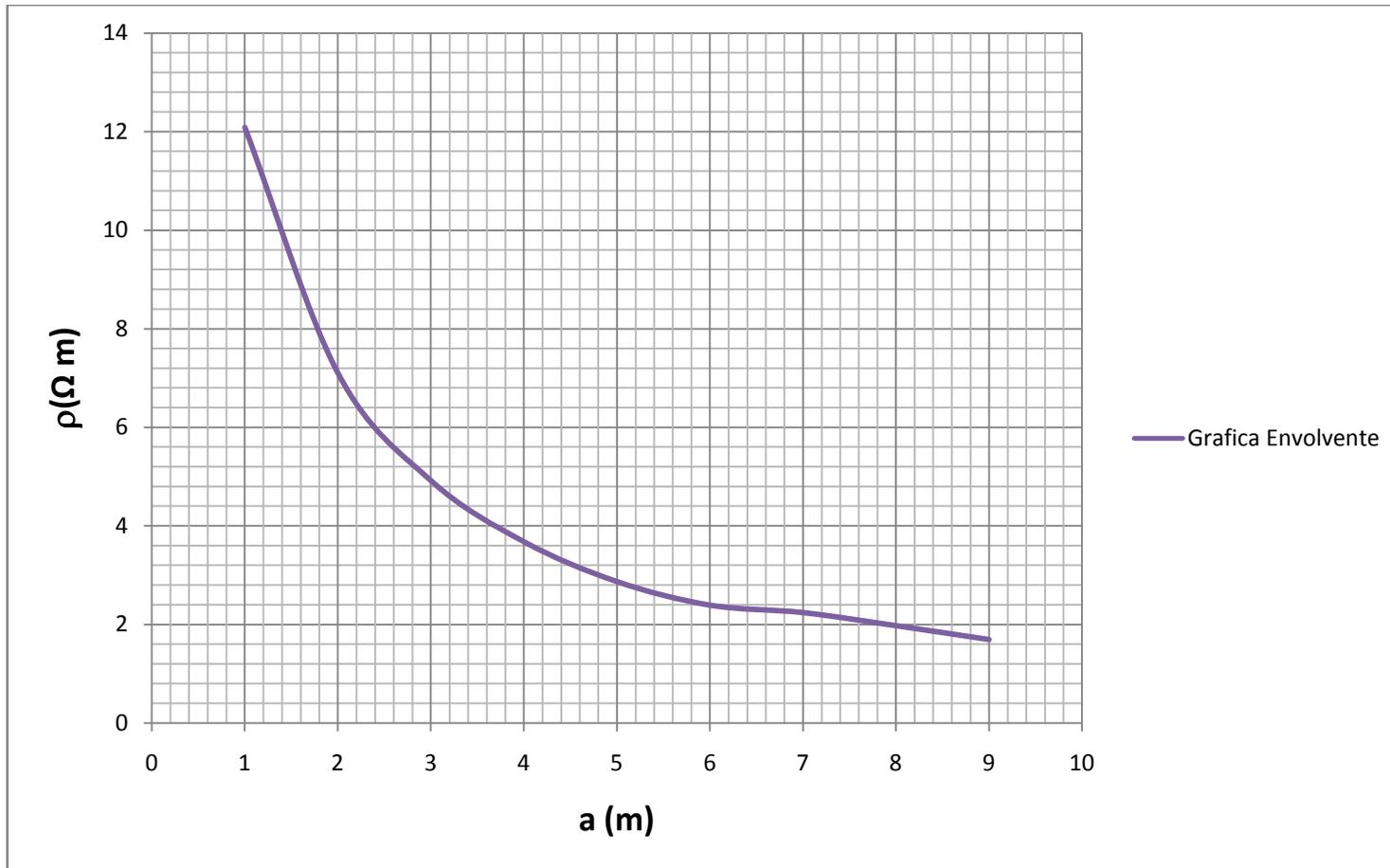
**Gráfica 4.3:** Octava Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia



**Gráfica 4.3:** Novena Prueba, Medición – Resistividad vs Distancia



**Gráfica 4.4:** Comparativa de Todas las Mediciones Realizadas



**Gráfica 4.4:** Envoltora o Gráfica que encierra todas las mediciones anteriores en una

La aplicación del método gráfico permite obtener los valores de  $\rho_1$  y  $\rho_2$  por inspección de los valores de resistividad aparente obtenidos y apoyados por la gráfica generada según el método de Sunde se obtiene la profundidad de la capa superficial.

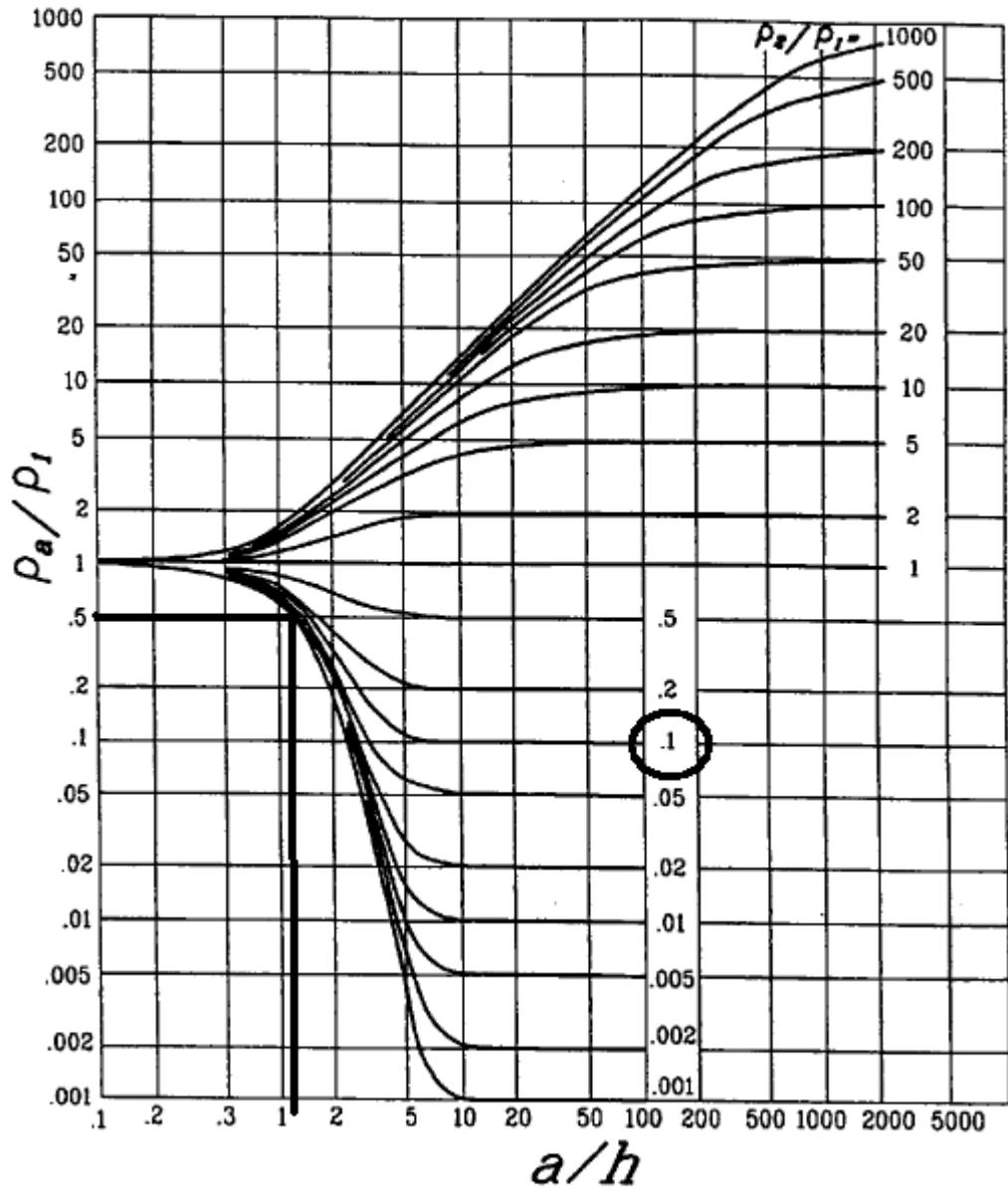
La metodología de modelación es la siguiente:

- a) Graficar la curva de resistividad aparente  $\rho_a$  (en el eje Y) Vs. Espaciamiento. (ver Grafica 5.4 Envolvente).
- b) Estimar  $\rho_1$  y  $\rho_2$  de la curva obtenida en a. El valor de  $\rho_1$  será asignado al valor de  $\rho_a$  para el menor espaciamiento.  $\rho_2$  será el valor de  $\rho_a$  obtenido para el espaciamiento mayor.

$$\underline{\rho_1 = 12.083272 \text{ y } \rho_2 = 1.696464}$$

- c) Obtener la relación  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  y seleccionar una curva de la figura la cual coincida con el resultado o interpole para dibujar una nueva curva sobre la gráfica. (véase la gráfica 4.5: Método de Sunde ).
- d) Seleccione el valor de  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  sobre el eje “y” de la curva asociada a la relación  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ . El valor seleccionado debe obtenerse en la región de pendiente de la curva, (véase la gráfica 4.5: Método de Sunde).
- e) Se obtiene, sobre el eje “X” el valor de la relación  $\frac{a}{h}$  sobre el eje “X”.
- f) Se calcula  $\rho_a$  multiplicando en valor obtenido de  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  por  $\rho_1$ .
- g) Obtenemos el espaciamiento “a” sobre la curva de resistividad aparente (gráfica 4.4: Envolvente).

- h) Apoyado por el valor de la relación  $\frac{a}{h}$  calcule la profundidad “h” de la capa superficial.



Gráfica 4.5: Método de Sunde

(IEEE Std 80-2000)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1.696}{12.08} = 0.1403$$

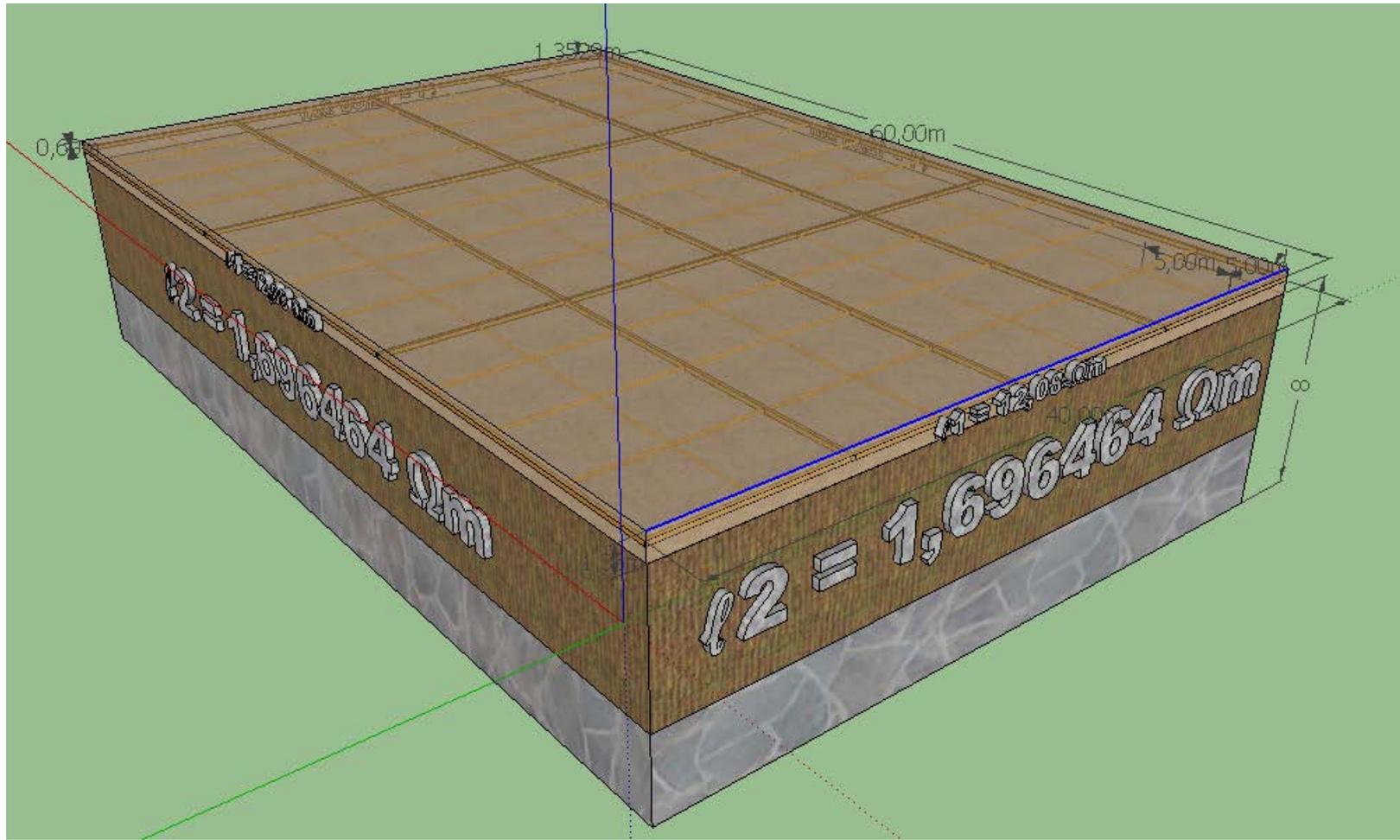
$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0.5$$

$$\rho_a = 0.5 \times 12.08 = 6.0416 \Omega m ; a = 2.3m$$

$$\frac{a}{h} = 1.7$$

$$h = \frac{2.3}{1.7} = 1.3529m$$

$$\underline{h = 1.3529m}$$

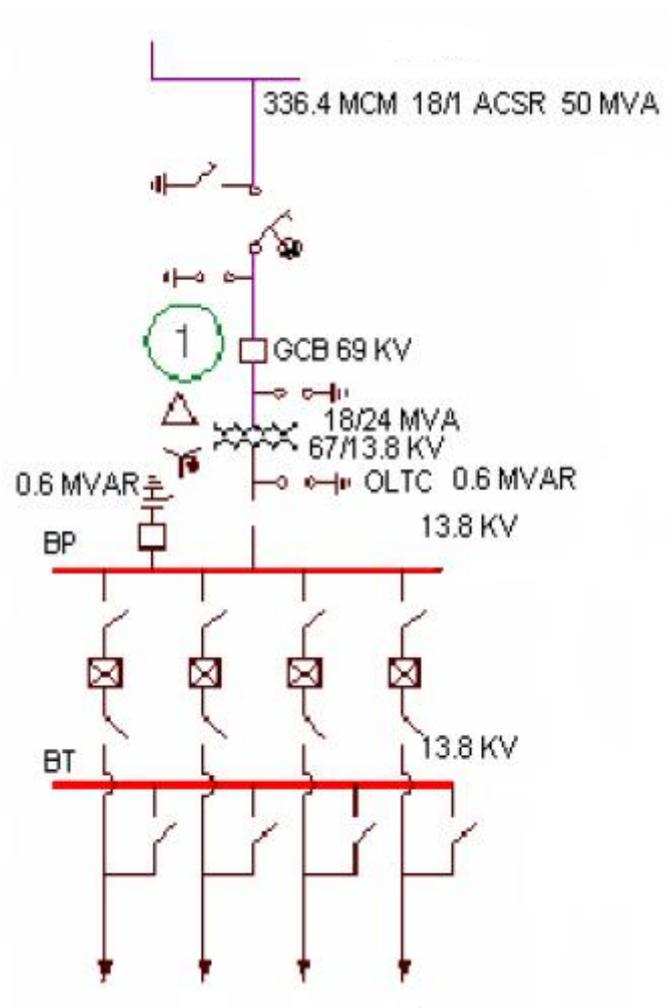


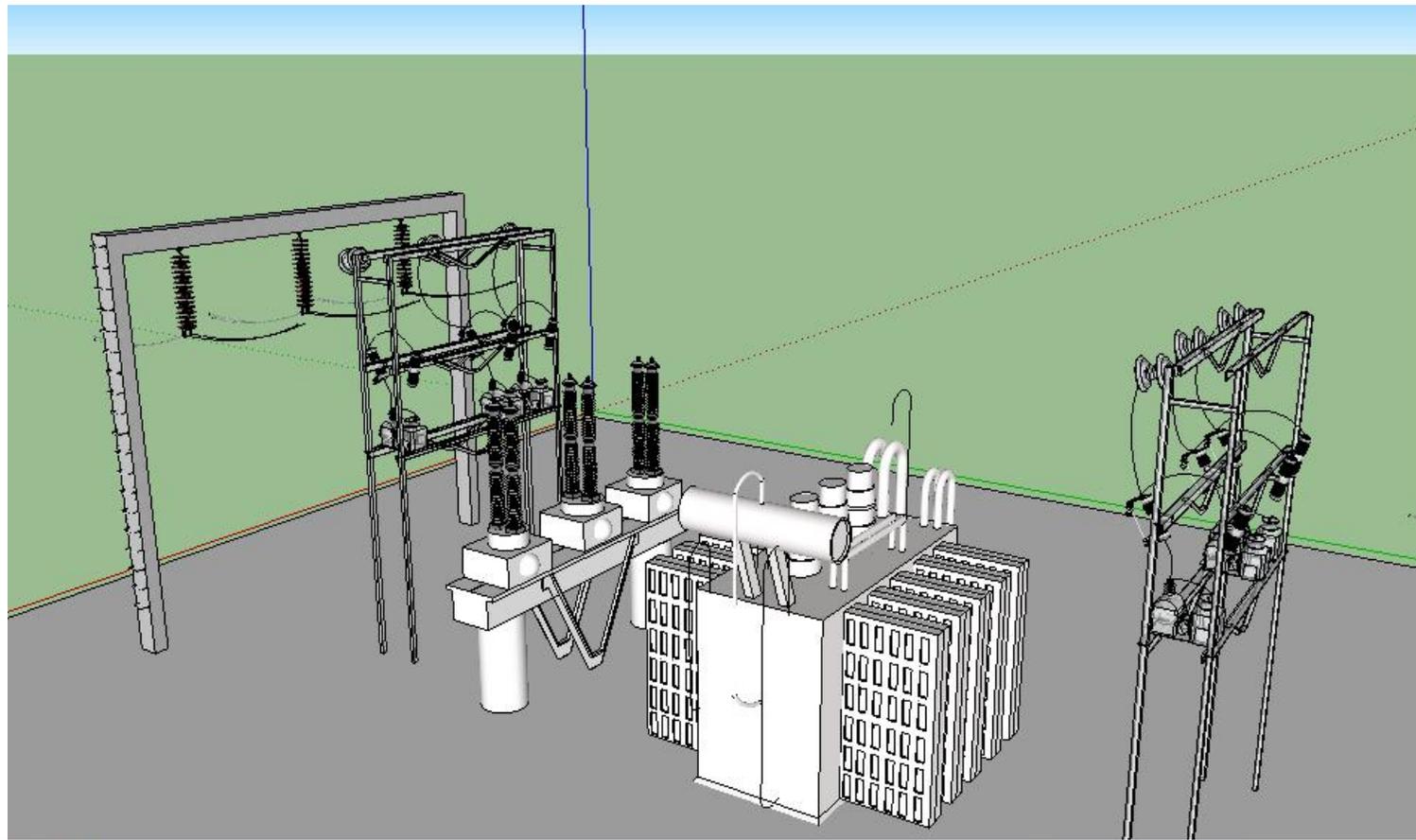
**Figura 4.1: Modelo del Suelo de Dos Capas  
Cancha de Tierra Colegio Domingo Comín**

Siguiendo con los cálculos del diseño de la malla, nos encontramos que debemos calcular la corriente de cortocircuito.

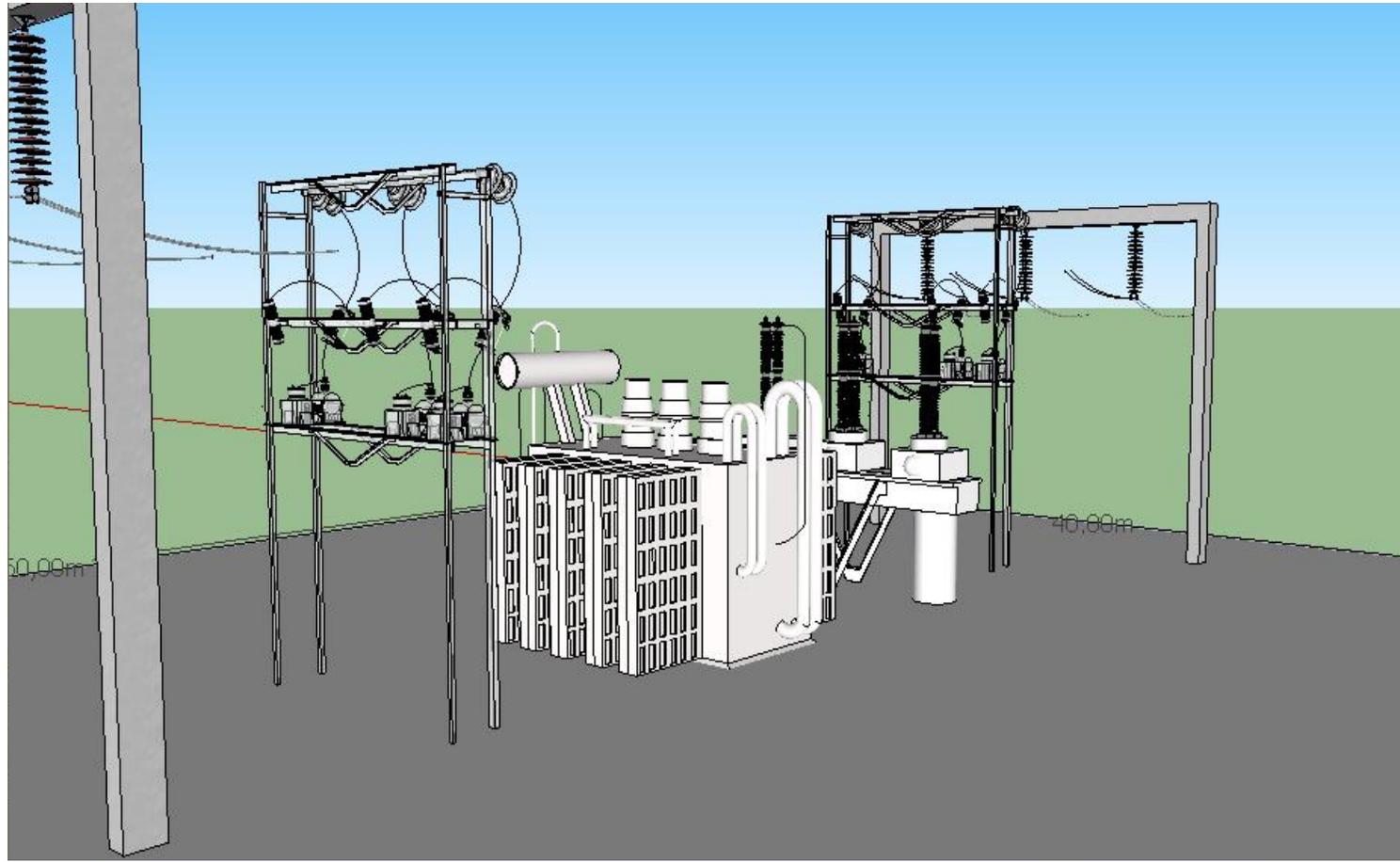
La ubicación de la subestación a ser implantada, será en la cancha de tierra del Colegio Domingo Comín, el terreno donde se acentuaría tendría un área de 2400 m<sup>2</sup>. Esta subestación se reduce el voltaje de 69KV a 13.8KV en la barra, por medio de un transformador marca ABB con capacidad de 18/24MVA que está protegido con un interruptor de Gas SF<sub>6</sub>.

### Esquema Unifilar de la Subestación “Domingo Comín”





**Figura 4.2: Elaborada en Google SketchUp**  
**Subestación Domingo Comín**



**Figura 4.3: Elaborada en Google SketchUp**  
**Subestación Domingo Comín**

#### 4.4 Cálculo de corrientes de Cortocircuito.-

Calculamos la corriente de cortocircuito para un transformador de las siguientes características:

##### **Datos de placa del Transformador:**

18/24MVA

69/13.8KV, 3φ

Impedancia de Z = 8%

La corriente máxima en el secundario (Isec) será:

$$I_{sec} = \frac{kva \times 1000}{\sqrt{3} \times E}$$

Donde:

**KVA** = Potencia del Transformador.

**E** = Voltaje entre fase y fase.

$$I_{sec} = \frac{2400 \times 1000}{\sqrt{3} \times 13800}$$

$$\underline{I_{sec} = 1004.087 \text{ Amp}}$$

La corriente de cortocircuito simétrica máxima (I<sub>cc</sub>máx) será:

$$I_{ccmáx} = \frac{100\%}{Z\%} I_{sec}$$

$$I_{ccmáx} = \frac{100}{8} (1004.087)$$

$$\underline{I_{ccmáx} = 12551.0875 \text{ Amp. Simétricos}}$$

La corriente de cortocircuito asimétrica será:

$$I_{ccasím} = I_{ccmáx} \times Fasím$$

***Fasím*** = Factor de asimetría = 1.25 (factor que depende de la relación X/R en el punto de falla.

$$I_{CCasím} = I_{CCmáx} \times 1.25$$

$$I_{CCasím} = 12551.0875 \times 1.25$$

$$I_{CCasím} = 15688.86 \text{ Amp Asimetricos}$$

#### **4.5. Diseño de la malla de Tierra de la subestación con los siguientes datos:**

<b>Dimensiones del patio:</b>	40 x 60 m <sup>2</sup>
<b>Corriente máxima de Falla:</b>	12552 A
<b>Nivel de Tensión (Primario):</b>	69 Kv
<b>Resistividad del suelo:</b>	12,08 (Ω*m)
<b>Resistividad de la superficie:</b>	2500 (Ω*m)
<b>Tiempo máximo de Falla:</b>	0,5 ms

##### **1) Selección del conductor**

$$Ac = I \left[ \frac{33t}{\log \left[ \frac{Tm - Ta}{234 + Ta} + 1 \right]} \right]^{1/2}$$

***Ac*** = Sección del conductor (CM).

***I*** = Corriente máxima de falla (Amp).

***Tm*** = Temperatura máxima en los nodos de la malla  
(450°C con soldadura y 250°C con amarre pernado).

***Ta*** = Temperatura ambiente (°C).

***t*** = Tiempo máximo de despeje de la falla (seg).

Entonces sea:  $Ta = 40^\circ\text{C}$

$Tm = 450^\circ\text{C}$

$$Ac = I \left[ \frac{33t}{\log \left[ \frac{450 - 40}{234 + 40} + 1 \right]} \right]^{1/2} = 2557,953191 \text{CM}$$

La malla reticulada será elaborada con un conductor **AWG 4/0** con una área de (107.2 mm<sup>2</sup>) de cobre.

## 2) Elección de la malla

Determinación de los coeficientes  $K_m$ ,  $K_i$ ,  $K_s$ .

Para la determinación de los coeficientes es necesario tener en cuenta las siguientes definiciones:

**A** = Longitud de la malla (m).

**B** = Ancho de la malla (m).

**L** = Longitud total del conductor (m).

**n** = Número de conductores en paralelo de longitud A.

**m** = Número de conductores en paralelo de longitud B.

**D** = Espaciamiento entre conductores (m).

**h** = Profundidad de enterramiento (m).

**d** = Diámetro del conductor (m).

La longitud total del conductor está dada por:

$$L = n \cdot A + m \cdot B$$

**$K_m$**  es:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left[ \frac{D^2}{16hd} \right] + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} \dots \frac{2n-3}{2(n-1)} \right]$$

**$K_i$**  es:

$$K_i = 0,656 + 0,172n$$

**$K_s$**  es:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right)$$

Se tienen cuadrados de 5m:

Por lo tanto:

$$\mathbf{A} = 60\text{m}$$

$$\mathbf{B} = 40\text{m}$$

$$\mathbf{n} = 9$$

$$\mathbf{m} = 13$$

$$\mathbf{D} = 5\text{m}$$

El conductor se enterrara a 60cm.

$$\mathbf{h} = 0.60\text{m}$$

$$\mathbf{d} = 0.0117\text{m}$$

$$\mathbf{L} = (60 \times 9) + (40 \times 13) = 1060\text{m}.$$

$$\mathbf{Km} = \frac{1}{2\pi} \ln \left[ \frac{5^2}{16(0.60)(0.0117)} \right] + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} * \frac{9}{10} * \frac{11}{12} * \frac{13}{14} * \frac{15}{16} \right]$$

$$\mathbf{Km} = 0.562799309$$

$$\mathbf{Ki} = 0,656 + 0,172(9)$$

$$\mathbf{Ki} = 2.198$$

$$\mathbf{Ks} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2(0.60)} + \frac{1}{5 + 0.60} + \frac{1}{2(5)} + \frac{1}{3(5)} + \frac{1}{4(5)} + \frac{1}{5(5)} + \frac{1}{6(5)} + \frac{1}{7(5)} + \frac{1}{8(5)} \right)$$

$$\mathbf{Ks} = 0.431461472$$

**3) Cálculo de las tensiones permisibles de paso y toque utilizado las siguientes fórmulas:**

**Tensión de Paso:**

$$E_p = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}}$$

$E_p$  = Tensión de Paso permisible en voltios.

$\rho_s$  = Resistividad de la superficie del terreno en ( $\Omega$  -m).

$t$  = Duración máxima de falla en segundos.

$$E_p = \frac{165 + 2500}{\sqrt{0.5ms}}$$

$$\underline{E_p = 119182.4232V}$$

**Tensión de Contacto:**

$$E_t = \frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}}$$

$E_t$  = Tensión de Toque permisible en voltios.

$$E_t = \frac{165 + 0.25(2500)}{\sqrt{0.5ms}}$$

$$\underline{E_t = 35329.87V}$$

Los valores reales son:

$$E_p = K_s K_i \frac{\rho I}{L}$$

En donde:

**$E_p$**  = Tensión de paso real en voltios.

**$K_s$**  = Coeficiente que tiene en cuenta, la influencia combinada de la profundidad y del espaciamiento de la malla.

**$K_i$**  = Coeficiente de irregularidad del terreno.

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

**$I$**  = Corriente máxima de falla (Amp).

**$L$**  = Longitud total del conductor.

$$E_p = (0.43)(2.19) \frac{(12.08)(12552)}{1060}$$

$$\underline{E_p = 135.657V < 119182.42V}$$

La tensión de Toque real está dado por:

$$E_t = K_m K_i \frac{\rho I}{L}$$

En donde:

**$E_t$**  = Tensión de Toque en voltios.

**$K_m$**  = Coeficiente que tiene en cuenta las características geométricas de la malla.

$$E_t = (0.56)(2.19) \frac{(12.08)(12552)}{1060}$$

$$\underline{E_t = 176.95V < 35329.87V}$$

Debido a que estos valores si cumplen. Se continúa el cálculo:

## Utilizamos el método de Laurent y Nieman

Este método es bastante aproximado y la expresión para el cálculo es:

$$R = 0.443\rho \left( \frac{1}{\sqrt{A_\gamma}} + \frac{1}{L} \right)$$

Donde:

**R** = Resistencia en Ohmios.

**A<sub>γ</sub>** = Área de la malla de puesta a tierra en m<sup>2</sup>.

**ρ** = Resistividad del suelo (Ω -m).

**L** = Longitud total del conductor (m).

$$R = 0.443(12.08) \left( \frac{1}{\sqrt{2400}} + \frac{1}{1060} \right)$$

$$\underline{R = 0.1143 \Omega}$$

## Método de Dwight

Este método es mucho mas largo pero es mucho más exacto que el anterior.

El primer paso consiste en hallar la resistencia de un conductor de la malla.

$$R_s = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{h} + \frac{2h}{L} \frac{h^2}{L^2} - 2 \right)$$

Donde:

**R<sub>s</sub>** = Resistencia de puesta a tierra de un solo conductor en Ω.

**ρ** = Resistividad en (Ω -m).

**L** = Longitud del conductor (m).

**h** = Profundidad de enterramiento del conductor (m).

**r** = Radio del conductor en (m).

$$R_s = \frac{12.08}{2\pi(60)} \left( \ln \frac{2(60)}{0.00585} + \ln \frac{60}{0.6} + \frac{2(0.6)}{60} \frac{0.60^2}{60^2} - 2 \right)$$

$$\underline{R_s = 2.92332 \Omega}$$

$$E = 2.191D = 2.191 (5)$$

$$\underline{E = 10.955}$$

Una vez calculada esta resistencia, se procede al cálculo de las resistencias debidas a las interferencias mutuas entre los conductores, tal resistencia es:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \left( \frac{4L}{E} \right) + \ln \left( \frac{E}{2L} \right) \frac{E^2}{16L^2} - 1 \right)$$

Donde:

**R<sub>a</sub>** = Resistencia mutua en  $\Omega$ .

**E** = Espaciamiento equivalente entre un conductor y los demás en m.

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi(60)} \left( \ln \left( \frac{4(60)}{10.955} \right) + \ln \left( \frac{10.955}{2(60)} \right) \frac{10.955^2}{16(60)^2} - 1 \right)$$

$$\underline{R_a = 0.0667 \Omega}$$

La resistencia total de un conductor es:

$$R_c = R_s + (n - 1)R_a$$

$$R_c = 2.92332 + (9 - 1)(0.0667)$$

$$\underline{R_c = 3.45699 \Omega}$$

La resistencia de n conductores es:

$$R_{cn} = \frac{R_c}{n}$$

$$R_{cn} = \frac{3.45699}{9}$$

$$\underline{R_{cn} = 0.38411 \Omega}$$

Resistencia de un solo conductor de unión.

$$R_{su} = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{h} + \frac{2h}{L} \frac{h^2}{L^2} - 2 \right)$$

$$R_{su} = \frac{\rho}{2\pi(40)} \left( \ln \frac{2(40)}{0.00585} + \ln \frac{40}{0.6} + \frac{2(0.60)}{40} \frac{0.60^2}{40^2} - 2 \right)$$

$$\underline{R_{su} = 2.6574 \Omega}$$

$$E = 2.430D = 2.430 (5)$$

$$\underline{E = 12.15m}$$

$$R_{au} = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \left( \frac{4L}{E} \right) + \ln \left( \frac{E}{2L} \right) \frac{E^2}{16L^2} - 1 \right)$$

$$R_{au} = \frac{\rho}{2\pi(40)} \left( \ln \left( \frac{4(40)}{12.15} \right) + \ln \left( \frac{12.15}{2(40)} \right) \frac{12.15^2}{16(40)^2} - 1 \right)$$

$$\underline{R_{au} = 0.075 \Omega}$$

La resistencia “mutua” de los componentes de unión incluyendo la interferencia debida a los conductores transversales a los cuales se encuentran unidos es:

$$R_{am} = (m - 1)R_{au} + (n - 1)R_a$$

Donde:

**$R_{au}$**  = Resistencia mutua de conductores de unión ( $\Omega$ ).

$$R_{am} = (13 - 1)(0.075) + (9 - 1)(0.0667)$$

$$\underline{R_{am} = 1.4375 \Omega}$$

La resistencia total de un solo conductor de unión es:

$$\begin{aligned}R_{cu} &= R_{su} + R_{am} \\R_{cu} &= 2.6574 + 1.4375 \\R_{cu} &= \underline{4.0949 \Omega}\end{aligned}$$

La resistencia de los m conductores es:

$$\begin{aligned}R_{cm} &= \frac{R_{cu}}{m} \\R_{cm} &= \frac{4.0949}{13} \\R_{cm} &= \underline{0.31499 \Omega}\end{aligned}$$

**La resistencia total de la malla está dada por:**

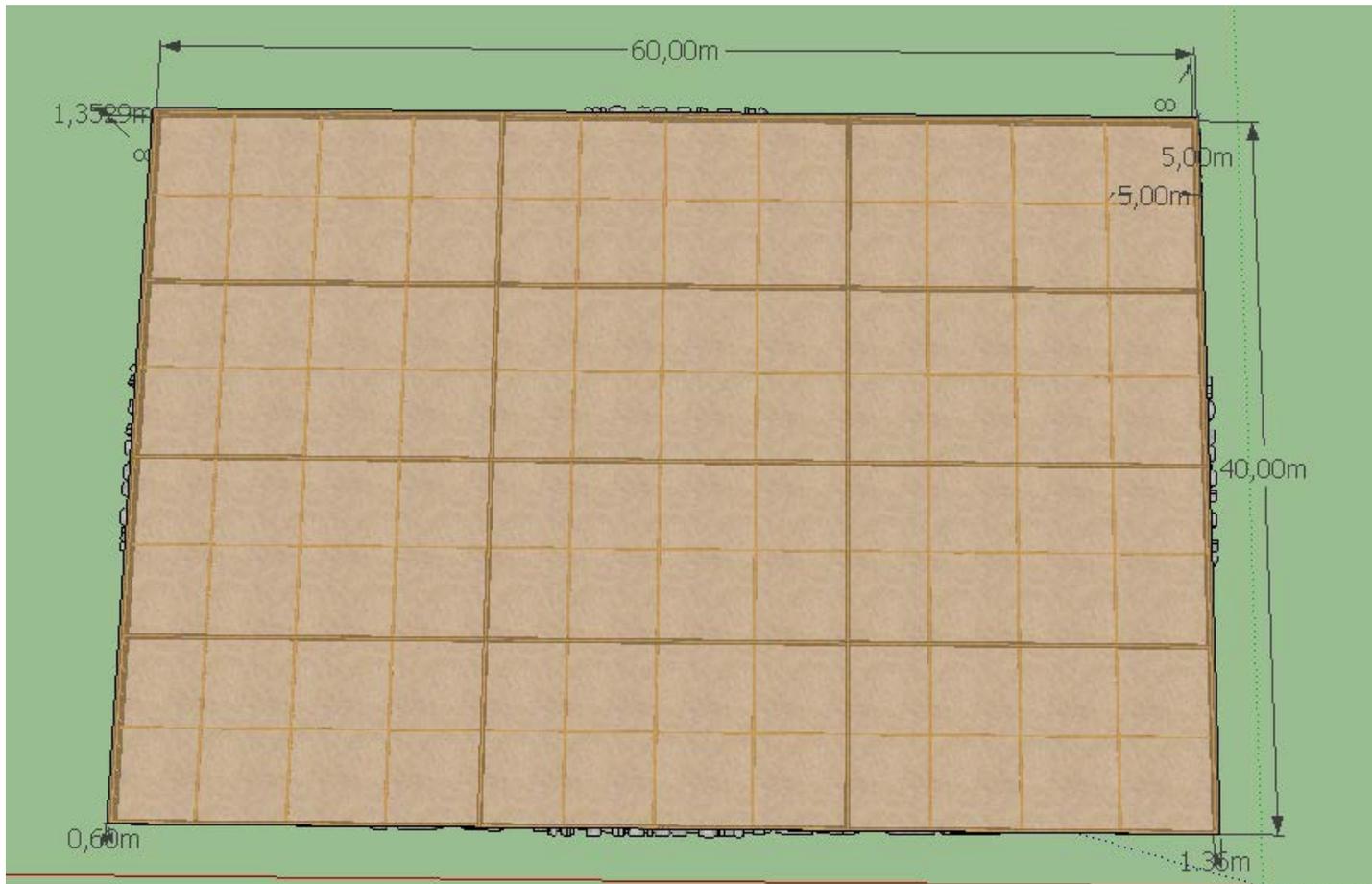
$$\begin{aligned}R &= \frac{R_{cn} * R_{cm}}{R_{cn} * R_{cm}} \\R &= \frac{0.3841 * 0.31499}{0.3841 * 0.31499} \\R &= \underline{0.17306 \Omega}\end{aligned}$$

$$\underline{0.17306 < 5 \Omega.}$$

Por lo tanto la disposición asumida de garantía tanto de tener los voltajes de paso y toque dentro de los permisibles como de que su resistencia es menor que el máximo aceptado.

#### **4.6. Criterios para la Construcción de Mallas Conectadas a Tierra**

- Toda malla nueva se tiene que construir a una profundidad mínima de 1'- 6".
- El conductor a utilizarse para la construcción y reparación de mallas tiene que ser de cobre desnudo, con calibre mínimo de 4/0 AWG.
- La malla tiene que cubrir toda el área de la subestación y extenderse un metro hacia afuera de la verja. (Vea Anexo SMT-1A)
- Para construcción de mallas nuevas se prefiere utilizar conexiones por soldadura Exotérmica como es este el caso, tipo Cadweld o similar. También pueden utilizarse conexiones por compresión, si así fuese diseñado.
- Para reparación de mallas existentes se pueden utilizar conectores de compresión. no se debe utilizar conectores tipo split bolt.
- Si en el diseño, se requiere utilizar varillas de acero revestidas de cobre tipo copper-clad de 3/4" de diámetro por 8 pies de largo.
- El número de varillas a instalarse y la distancia entre éstas se determina del diseño de la malla.



**Figura 4.4: Malla Reticulada de 60 x 40m**

**Elaborada en Google SketchUp**

## **4.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS CON EL EQUIPO MEDIDOR DE RESISTENCIA DE TIERRA.**

### **4.7.1. Problemas, Causas y efectos**

Haciéndose el estudio del suelo en la cancha de Tierra del Colegio Domingo Comín, se pudo apreciar de manera grafica las diferentes capas del suelo que tenemos en dicho lugar.

En el estudio se encontró, en la primera capa una resistividad de  $\rho_1 = 12.083272 \Omega \text{ m}$ , con una profundidad de 1.35m. La segunda capa con una resistividad de  $\rho_2 = 1.696464 \Omega \text{ -m}$ , esta la encuentra a una profundidad de 9m, y lo encontrado después de esto son rocas grandes como, con resistividades altas de 3000 – 5000 $\Omega \text{ -m}$ .

La causa a este terreno no tan homogéneo, es una modificación hecha por el hombre, ya que este suelo por encontrarse cerca a una corriente de rio debería tener niveles muy bajos de resistividad y muy altos niveles freáticos en la mayoría de sus capas, pero encontramos que a partir de los 9 metros en adelante nos topamos con roca.

El motivo por el cual existe roca en dicho lugar, es porque hace tiempo atrás, el agua del rio entraba hasta donde ahora es la cancha de tierra, y como medida a tomar, se decidió evitar estas aguas con rocas en forma de barrera.

Lo ya explicado con lleva a diseñar una malla reticulada a una distancia de 0.7m, como lo fue diseñado, ya que esto también se pudo hacer porque la resistividad del suelo a esta profundidad es muy buena que no se debieron utilizar varillas verticales con la malla reticulada.

#### **4.8. SOLUCIONES Y RECOMENDACIONES.**

El diseño de la malla toma en cuenta la caracterización y modelación del suelo, tenemos claro la resistividad del suelo para las profundidades de hasta 10m.

Teniendo en cuenta esto, la malla fue diseñada de la siguiente manera:

- Medición, de la resistividad del suelo, en sitio, mediante el método de Wenner.
- Obtención de modelo del suelo mediante técnicas de gráfica, en el modelo dos capas, usando cálculos y Gráfica de método de Sunde.
- Dimensionamiento de la red de tierra, verificación de voltajes de toque y de paso, según lo previsto en el documento IEEE-80, año 2000. Los procedimientos de cálculo se realizan mediante hoja de cálculo.
- Para la verificación de los voltajes de Toque y Paso se asume la condición más desfavorable, la cual considera 50 Kg de peso para una persona, dentro o en la periferia de la subestación.
- Uso de piedra picada, #2, espesor de 10cm como elemento mejorador de la resistencia superficial. Se asume la resistividad de la piedra en  $2500 \Omega \text{ m}$ .
- Conductor de la malla de cobre desnudo, semiduro, trenzado, 7 hilos, calibre 4/0 AWG ( $107.22\text{mm}^2$ ), diámetro exterior 13.3 mm.
- Malla conformada por arreglo reticular de 5 metros.
- Unión de retículas mediante conexiones exotérmicas. Temperatura máxima  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Temperatura máxima para diseño,  $40^\circ\text{C}$ .

La malla fue diseñada con todos estos parámetros y regidas a las Normas de la ANSI/IEEE Std 80-2000, ANSI/IEEE Std 80\_1986 y Código Eléctrico Nacional NEC.

#### **4.9. CONCLUSIONES**

La malla de puesta a tierra se diseño, teniendo como base la calidad de terreno en el cual se implantara la subestación.

- El terreno en donde se hicieron los estudios, es muy bueno, ya que se encuentra muy cerca a las riveras del rio Guayas, nos podemos dar cuenta por sus niveles freáticos y de muy baja resistividad. Gracias a esto pudimos superar, nuestro diseño de la malla que se presento con una capa de roca, ubicada a unos 10m de profundidad.
- Diseñando así una malla reticulada superficial a una profundidad de 0.60m desde la primera capa del suelo, también se logro una malla sin electrodos verticales adicionales, ya que la resistencia de la malla nos dio entre los parámetros aceptables de muy buena resistencia.
- Se diseñó dentro de los voltajes permisibles de Toque y de Paso, asegurando así de manera tal, la vida del personal que se encuentre dentro de la subestación.
- Sus cálculos no se realizaron en software alguno que exista en el mercado ya que su costo bordea entre los 13000 Dólares, nos ayudamos con formulas realizadas en una hoja de cálculo de Excel, elaborada por cuenta propia.
- Se utilizó el programa Google SketchUp, para realizar una presentación en 3D y darle un toque de realidad al proyecto de Graduación.
- El diseño de esta malla, me enseñó a despertar el habito de investigar, ya que para un diseño de esta escala, se necesita tener conocimientos de suelo, estudios de cortocircuito de una red eléctrica, Formulas que no se encuentran fácilmente en libros, mucha creatividad a la hora del diseño, para que todo funcione bien en conjunto. Ya que de este diseño depende la vida de las personas, las cuales se encuentren dentro de la subestación y de manera

secundaria pero también importante, la vida útil de todos los equipos y dispositivos eléctricos que se encuentren conectados a la malla.

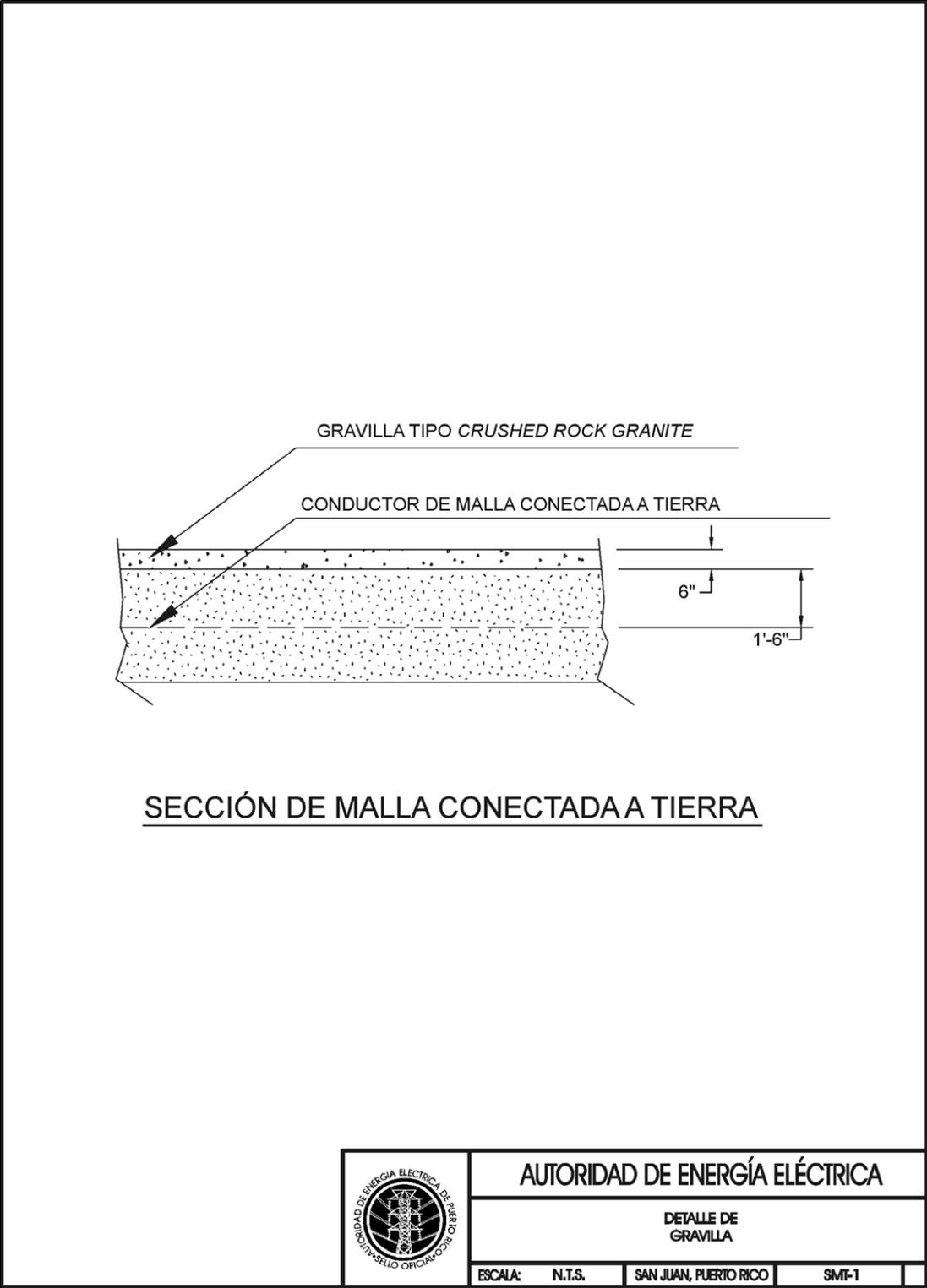
- Como una conclusión al valor investigativo que ha costado este Proyecto de Graduación, podríamos citar una frase que tiene mucho de cierto y encierra todo aquello que hemos tenido que hacer para el diseño de esta malla.

“El Buen Ingeniero, es una persona que hace un Diseño que funciona con ideas originales”..

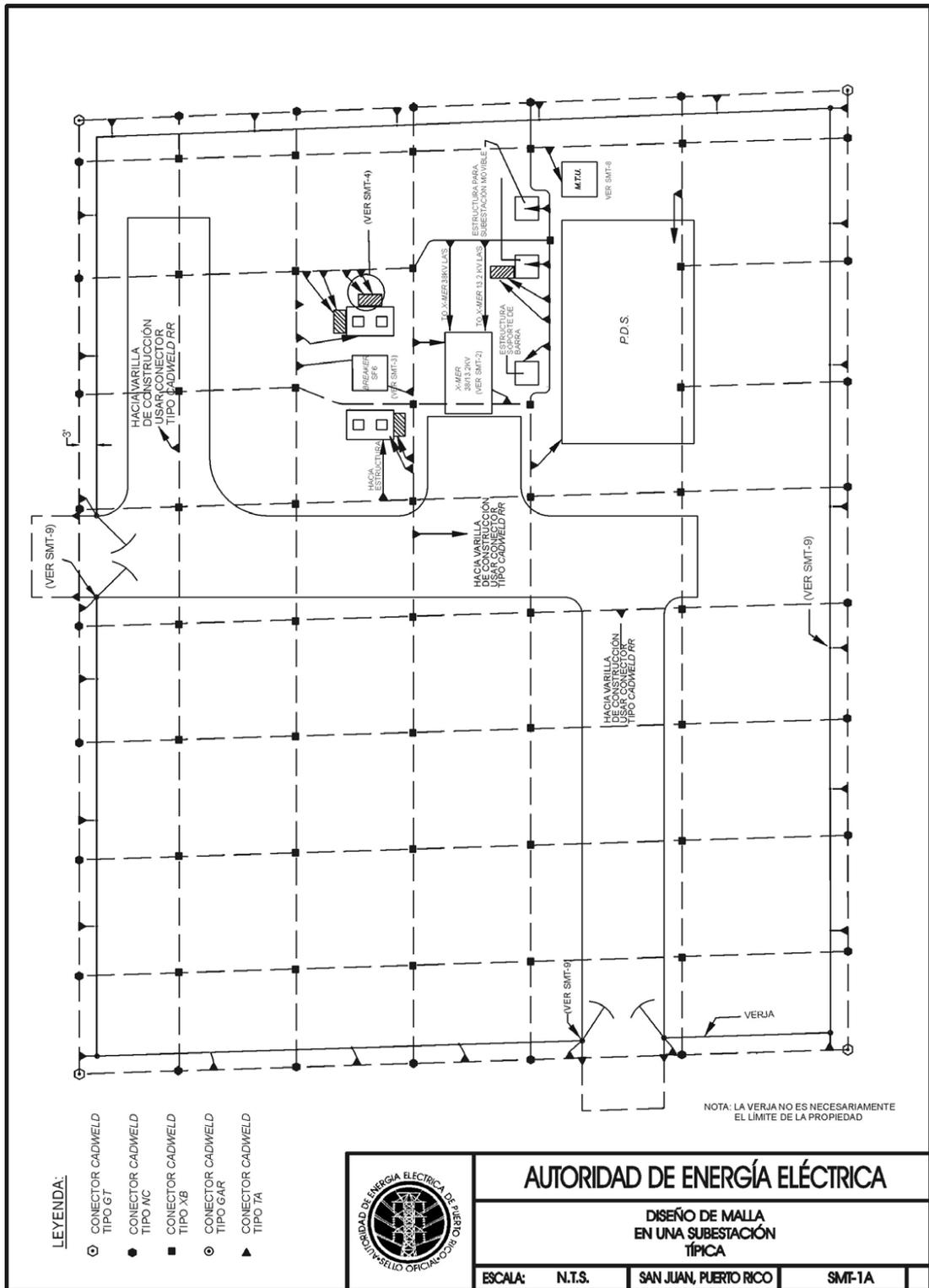
## BIBLIOGRAFÍA

- DIAZ, Pablo, *Soluciones Prácticas para la Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos de Distribución*, 1<sup>era</sup> Edición, Editorial McGraw-Hill, México, 2001.
- GRAINGER, John J., y otros, *Análisis de Sistemas de Potencia*, 1<sup>era</sup> Edición, Editorial McGraw-Hill, México, 1996.
- GARCÍA, Rogelio, *La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas*, 1<sup>era</sup> Edición, Editorial Alfa y Omega, México, 1999.
- Norma ANSI/IEEE Std 80\_1986.
- Norma ANSI/IEEE Std 80\_2000.
- Manual de FLUKE 1625KIT, [www.fluke.com.es](http://www.fluke.com.es) , España.

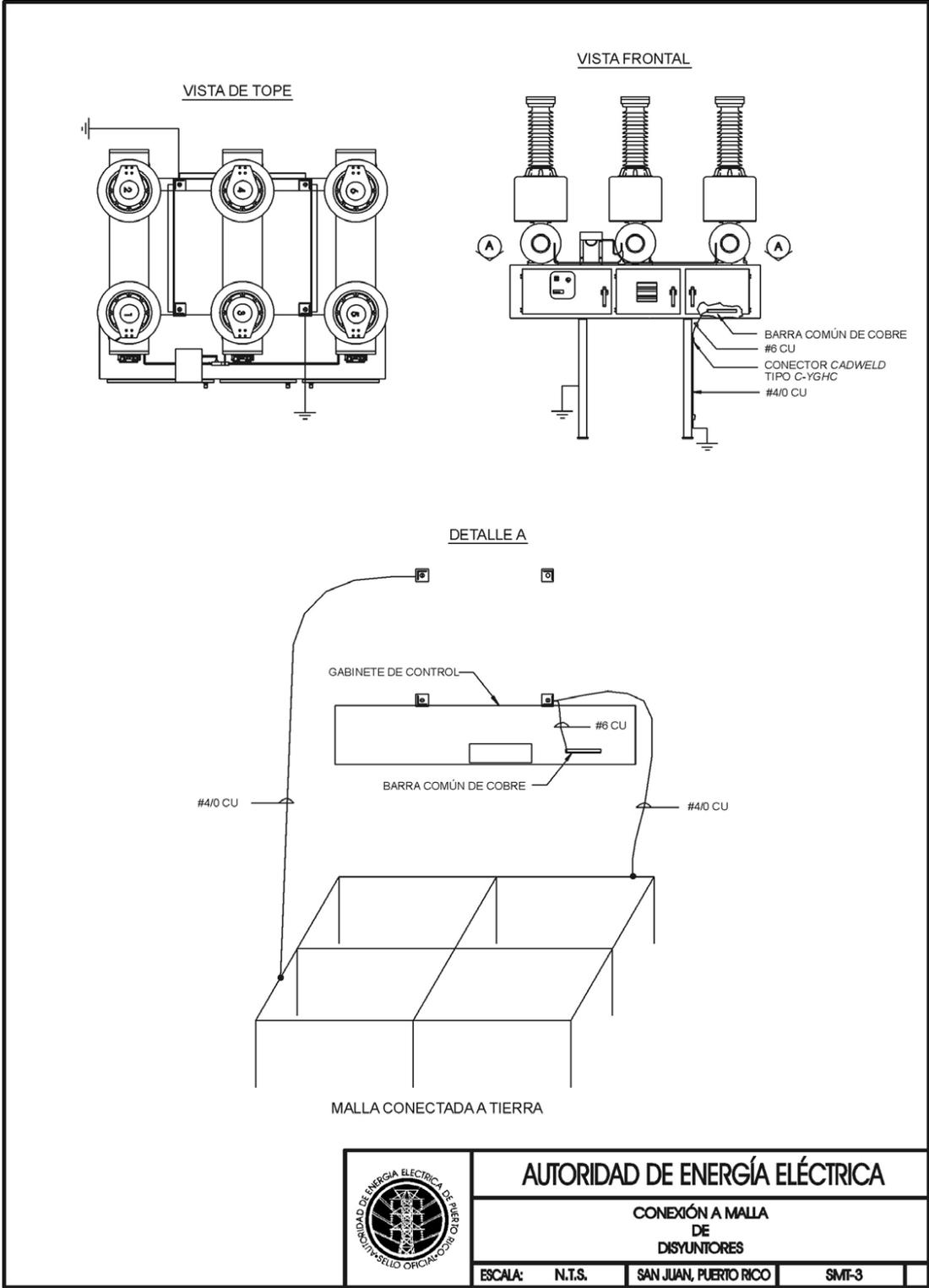
**Anexo 1**  
**Patrones de construcción**  
**Sistema de Mallas Conectadas a Tierra (SMT)**



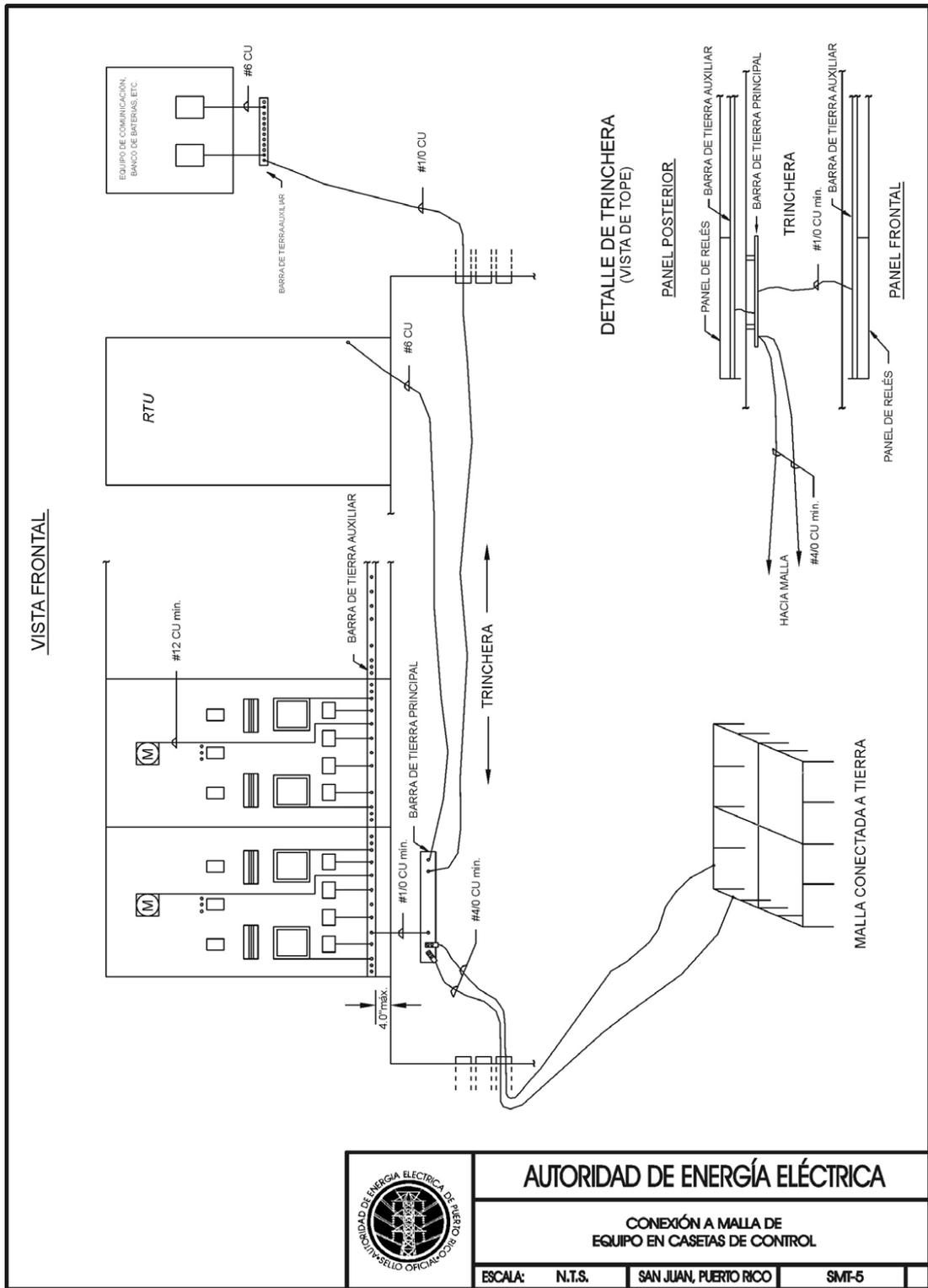
**Figura SMT-1:** Sección de Malla Conectada a Tierra  
 Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico



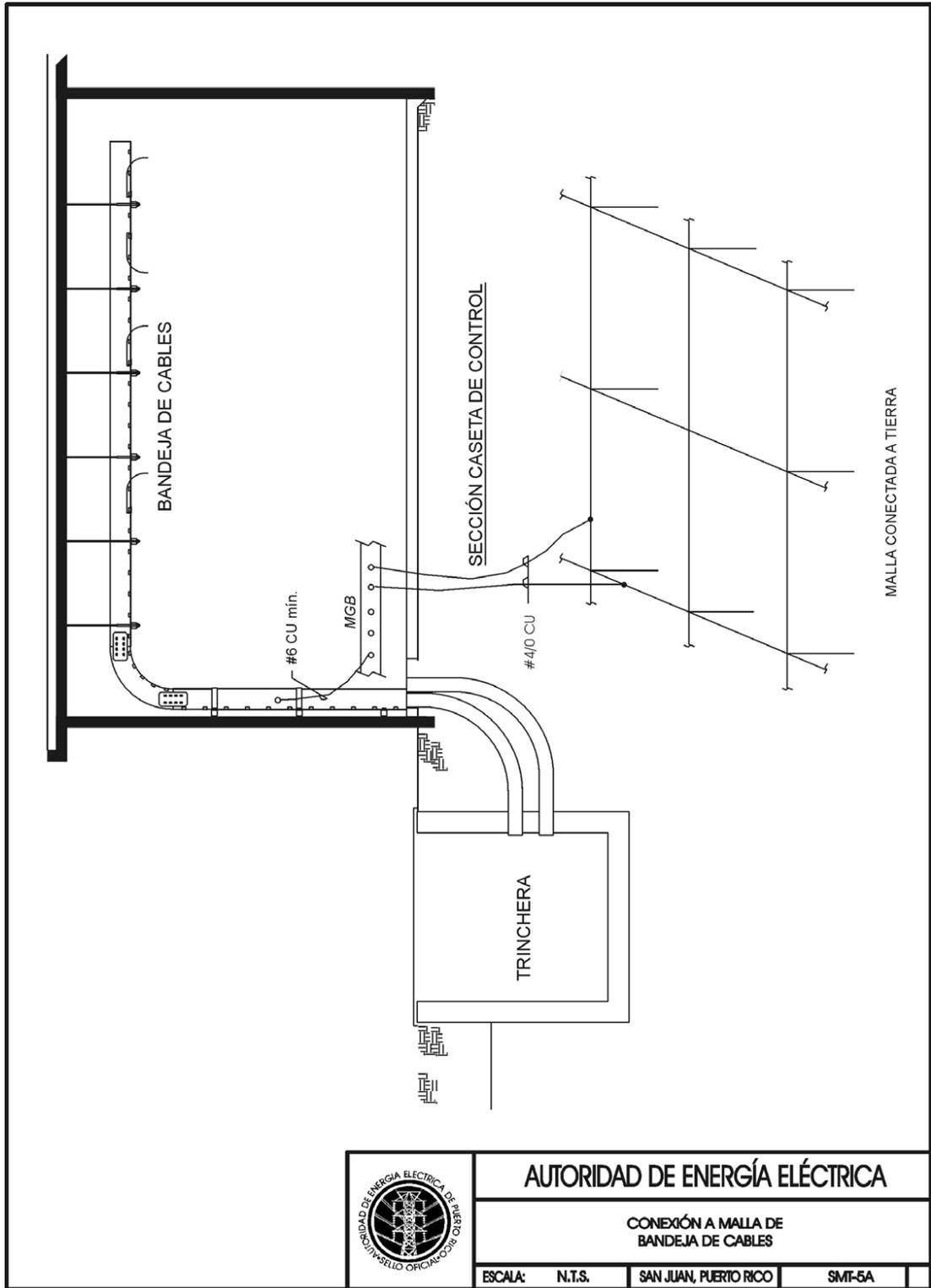
**Figura SMT-1A:** Diseño de una Malla en una Subestación Típica  
 Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico



**Figura SMT-3:** Conexión a Malla de Disyuntores  
 Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico

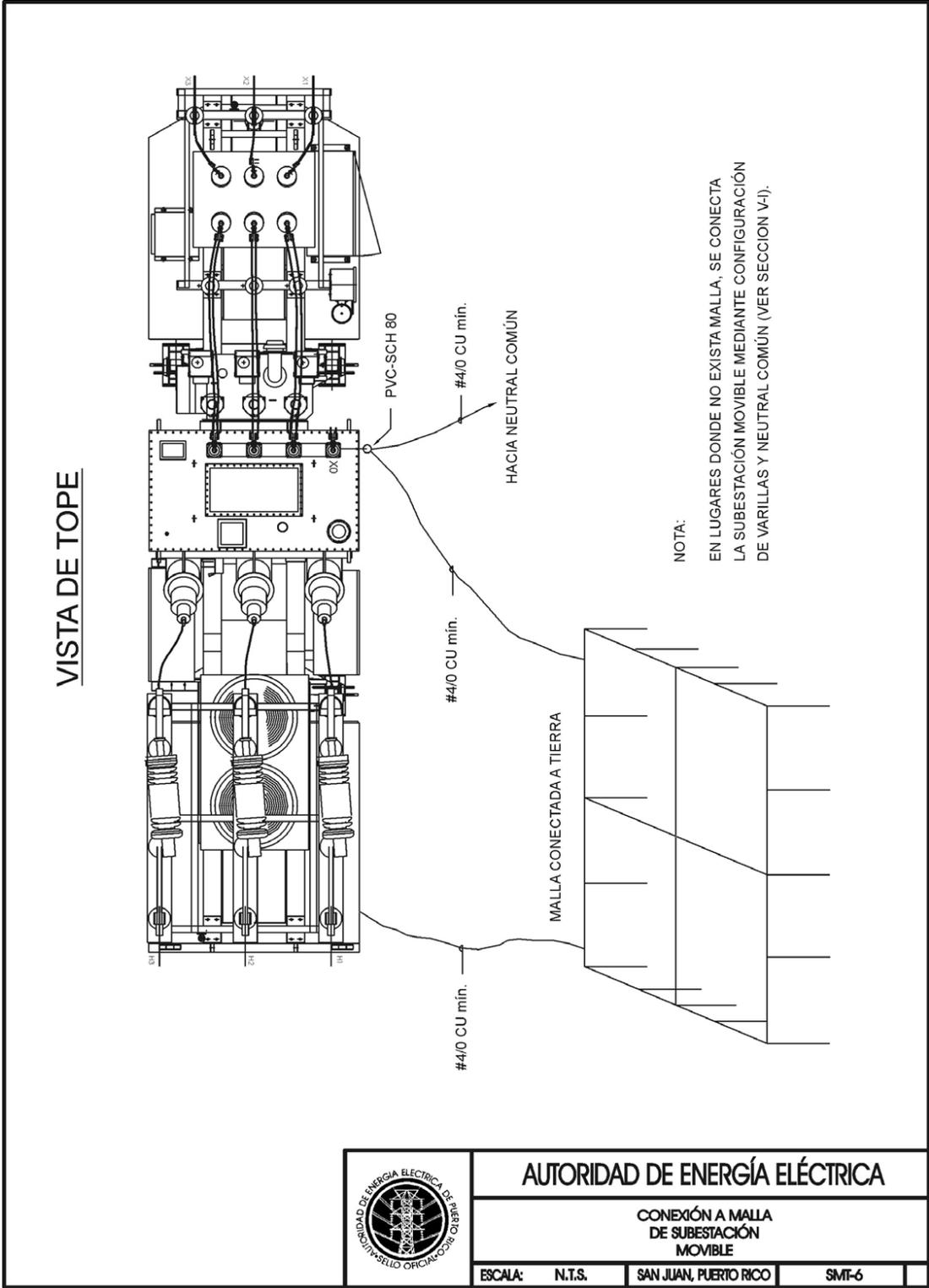


**Figura SMT-5:** Conexión a Malla de Equipo en Casetas de Control  
 Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico



**Figura SMT-5A: Conexión a Malla de Bandeja de Cables**  
 Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico

	<b>AUTORIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA</b>		
	CONEXIÓN A MALLA DE BANDEJA DE CABLES		
ESCALA:	N.T.S.	SAN JUAN, PUERTO RICO	SMT-5A



**Figura SMT-6:** Conexión a Malla de Subestación Movable  
Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico

**ANEXO 2:**  
**DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO MEDIDOR DE RESISTENCIA DE TIERRA**  
**(FLUKE 1625 KIT)**

## **DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO MEDIDOR DE RESISTENCIA DE TIERRA**

### **(FLUKE 1625 KIT)**

#### **Medidor GEO Avanzado de Resistencia de Tierra**

Los medidores de resistencia de tierra de la nueva Serie 1620 de Fluke no solo miden la resistencia de tierra mediante la clásica prueba de caída de potencial, sino que también ahorran tiempo al utilizar los métodos de comprobación selectiva y sin picas. La comprobación selectiva no requiere que se desconecte el electrodo que se está comprobando durante la medida, por lo que ofrece una mayor seguridad. El sencillo método de comprobación sin picas comprueba las conexiones a tierra mediante dos transformadores de corriente (sondas) que se fijan alrededor del conductor que se esté comprobando. El modelo 1625 de esta serie, destaca por su versatilidad para las aplicaciones más exigentes.

La resistencia de tierra y la resistividad del terreno deben medirse al:

- Diseñar sistemas de puesta a tierra
- Instalar un nuevo sistema de puesta a tierra y equipos eléctricos.
- Comprobar periódicamente sistemas de protección contra rayos y de puesta a tierra
- Instalar equipos eléctricos de gran tamaño, tales como transformadores, conmutadores de alta tensión, maquinaria, etc.

## Características y Especificaciones del (FLUKE 1625 KIT)



Fluke 1625

Figura A-2: Equipo de medición FLUKE 1625

[www.fluke.com](http://www.fluke.com)

## Características

	1625
Medidas con un solo botón	
Medida de la resistencia de tierra a 3 y 4 hilos	●
Medida de la resistividad del terreno a 4 hilos	●
Medida AC de la resistencia de tierra a 2 hilos	●
Medida CC de la resistencia de tierra a 2 y 4 hilos	●
Comprobación selectiva, sin necesidad de desconexión del conductor de tierra (1 pinza)	●
Comprobación sin picas, rápida comprobación de bucle de tierra (2 pinzas)	●
Frecuencia de la señal de prueba de 128 Hz	
Medida de la impedancia de tierra a 55 Hz	●
Control automático de frecuencia (CFA) (94 - 128 Hz)	●
Medida de tensión conmutable 20/48 V	●
Límites programables, ajustes	●
Continuidad con zumbador	●
Resistencia al polvo/agua	IP56
Categoría de seguridad	CAT II 300 V

Figura A-2: Características del Equipo de Medición

[www.fluke.com](http://www.fluke.com)

## Especificaciones

	1625
Rangos de resistencia	0 a 300 k $\Omega$
Error de operación	$\pm 5\%$
Tensiones de comprobación	20/48 V
Corriente de cortocircuito	250 mA



Fluke 1625 kit

**Figura A-2:** Accesorios FLUKE 1625 KIT

[www.fluke.com](http://www.fluke.com)

Presupuesto del sistema de