

**UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**“DISEÑO ASISTIDO POR SOFTWARE EN UN SISTEMA PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACIÓN EN PACHACAMAC DE 10000 KVA”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

Para optar el Título Profesional de

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

HERCILLA HUAPAYA, NELSON RENE

**Villa El Salvador**

**2020**

**DEDICATORIA:**

A mi familia, por su apoyo incondicional, por confiar en mi persona en los buenos malos momentos de nuestra vida.

### **AGRADECIMIENTOS:**

A Dios por su infinito amor y protección, a mi familia, por entenderme y brindarme todo su apoyo motivándome a seguir mis sueños.

## ÍNDICE

Resumen .....	ix
Introducción .....	x
Objetivos.....	1
a. General. ....	1
b. Específicos.....	1
Capítulo I: Marco Teórico .....	2
1.1. Bases Teóricas: .....	2
1.1.1. Antecedentes.....	2
1.1.2. Sistema de Puesta a Tierra. ....	4
1.1.3. Medición de Resistividad del Suelo. ....	16
1.1.4. Valores Normados de Resistencia de Puesta a Tierra.....	28
1.1.5. Criterios Tolerables de Voltaje.....	29
1.1.6. Criterio de Tensión de Toque y Paso.....	32
1.1.7. Requerimiento mínimo de la Varilla (Electrodo) y Conductores .....	33
1.1.8. Conexión de Conductores y Electrodo en Malla.....	36
1.2. Definición de Términos Básicos. ....	39
Capítulo II: Metodología de desarrollo del Trabajo Profesional .....	41
2.1. Delimitación del Trabajo Profesional .....	41
2.1.1. Temporal. ....	41
2.1.2. Espacial.....	41
2.2. Determinación y Análisis del Problema .....	41
2.2.1. Problema General. ....	42
2.2.2. Problemas Específicos. ....	42
2.3. Modelo de solución propuesto .....	42
2.3.1. Diseño Realizado por Calculo Simple o Común.....	44
2.3.2. Diseño Asistido por el Software CYMEGROUND para un Sistema de Puesta a Tierra de una Subestación.....	57
2.4. Resultados.....	69
2.4.1. Diseño Asistido del Sistema Puesta a Tierra. ....	69
2.4.2. Resistencia del Sistema de Puesta a Tierra. ....	70
2.4.3. Conductores Obtenidos. ....	71
2.4.4. Tensiones de Toque y Paso Obtenidos. ....	72
Conclusiones .....	75
Recomendaciones .....	76

Bibliografía .....	77
Anexos .....	79
Anexo 1: Datos de Placa de transformador .....	80
Anexo 2: Datos Técnicos sobre las secciones de los conductores según catalogo .....	82
Anexo 3: Datos de la Subestación. ....	84

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Descargas Atmosférica en un punto.....	4
Figura 2: Sistema Monofásico de Retorno por Tierra. ....	5
Figura 3: Malla de Tierra (Superficie de ecualización de Potencial). ....	5
Figura 4: $\rho$ x Humedad Porcentual Suelo Arenoso. ....	8
Figura 5: Defecto del Aislador del Transformador de Distribución. ....	9
Figura 6: $\rho$ x Temperatura.....	11
Figura 7: Estratificación del Suelo en Dos Camadas.....	12
Figura 8: Estratificación del Suelo en Dos Camadas.....	13
Figura 9: Líneas de Corrientes Eléctricas.....	18
Figura 10: Comportamiento de Líneas de Corriente Eléctricas en el Suelo. ....	19
Figura 11: Punto donde se genera un Potencial.....	20
Figura 12: Cuatro Electrodo Clavados en el Suelo. ....	21
Figura 13: Toma de Potencial en el punto 2 y 3. ....	22
Figura 14: Instrumento Megger - Método Wenner.....	23
Figura 15: Penetración a una profundidad "a". ....	24
Figura 16: Direcciones de un Punto de aterramiento en Medición.....	25
Figura 17: Direcciones de mediciones para el área de una malla de una subestación.....	26
Figura 18: Situaciones usuales de tensión de contacto.....	31
Figura 19: Situación usual de potencial Transferida.....	31
Figura 20: Dimensionamiento mínimo requerido para el Electrodo Varilla de Cobre. ....	34
Figura 21: Unión exotérmica - molde grafito.....	38
Figura 22: Ubicación del Proyecto.....	41
Figura 23: Designación de Nombre de proyecto en el software. ....	59
Figura 24: Designación de los parámetros del terreno y de seguridad en Software. ....	59
Figura 25: Distanciamientos y Resistividad Obtenida.....	60
Figura 26: gráfica de resistividad vs longitud.....	60
Figura 27: Datos de la barra en subestación. ....	61
Figura 28: Variedad de Conductores y varillas en Software. ....	62
Figura 29: Dimensionamiento de varillas y conductores.....	63
Figura 30: Distribución Simétrica de conductores en malla. ....	64
Figura 31: Distribución de las varillas (Electrodos) asimétricas. ....	64

Figura 32: Vista de planta de Modelado de Malla.....	65
Figura 33: Vista en 3D de modelo de Malla.....	65
Figura 34: Diagrama de Contorno de Potencial.....	66
Figura 35: Niveles de umbral del Potencial de Contacto. ....	67
Figura 36: Diagrama de Perfil de potencial. ....	68
Figura 37: Potenciales en el terreno.....	69
Figura 38: Datos de placa de Transformador. ....	80
Figura 39: Tipo de Conexión según región.....	80
Figura 40: Vista de los Trafos en seco. ....	81
Figura 41: Sección de conductores grandes. ....	82
Figura 42: Sección de conductores Pequeño. ....	83
Figura 43: Esquema de Secciones de Conductores.....	83
Figura 44: Datos de Subestación. ....	84
Figura 45: Datos de tramo de la subestación. ....	84

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Variación de la Resistividad con respecto a la Naturaleza del Suelo. ....	6
Tabla 2: Variación de la Resistividad con respecto a la Humedad. ....	7
Tabla 3: Influencia de la Temperatura en suelo arenoso. ....	10
Tabla 4: Configuración y Espaciamientos Recomendados. ....	24
Tabla 5: Valores Normados Máximos de Resistencia de puesta a tierra. ....	29
Tabla 6: Conductor de puesta a tierra para sistemas de corriente alterna. ....	35
Tabla 7: Sección mínima de los Conductores de Protección. ....	36
Tabla 8: Selección de carga para un tipo de Empalme o conexión exotérmica. .	37
Tabla 9: Selección de Molde de grafito para la soldadura exotérmica. ....	38
Tabla 10: Factor de Decremento con respecto al tiempo y ciclos. ....	45
Tabla 11: Temperatura de Fusión de Conductores más usados. ....	47
Tabla 12: Calibres de conductores más Usados. ....	47
Tabla 13: Cantidad de conductores para diseño. ....	51
Tabla 14: Descripción de Parámetros de Seguridad. ....	60
Tabla 15: Resultados de Salida de estudio de Suelo. ....	60
Tabla 16: Parámetro de Barra. ....	62
Tabla 17: Factor de Decremento. ....	62
Tabla 18: Conductos utilizados por norma IEEE 80. ....	62
Tabla 19: Parámetros definidos por usuario. ....	65
Tabla 20: Potencial de Tierra. ....	66
Tabla 21: Parámetros de diagrama de contorno de Potencial. ....	67
Tabla 22: Tensión máxima de contacto por software. ....	67
Tabla 23: Potenciales de Contacto. ....	68
Tabla 24: Potenciales Máximos admisibles. ....	68
Tabla 25: Cantidad de conductores para diseño. ....	71
Tabla 26: Resultados de potencial de contactor con el Software. ....	73



## RESUMEN

El presente trabajo de suficiencia profesional se enfocó en la descripción de cómo se realizó el diseño del sistema de puesta a tierra para una subestación de 1000Kva Ubicada en buena vista – Pachacamac, la cual brindara una protección para los equipos Eléctricos y sobre todo antepone la protección de la vida humana que es lo más importante. Este diseño se realizó con el Software CYMEGROUND el cual está especializado para poder realizar Un sistema de malla de puesta a tierra para una subestación con poco margen de error.

Para la realización del diseño de nuestro proyecto de protección de puesta a tierra para una sub estación de 1000Kva Pachacamac, se determinó usar la norma Internacional IEEE 80 (2000), la cual nos brindó parámetros y factores que influyen en la obtención de resultados aplicativos para diferentes casos de falla de corriente eléctrica para la protección de toque y paso.

En el presente trabajo nos mostró dos formas de realizar el cálculo de protección de puesta a tierra, las cuales son la realización de obtención por medio de cálculo manual convencional escrito, la que nos brindó cual es la capacidad aproximada mínima para saber cuánto se necesita de materiales de cobre para obtener la resistencia mínima en la malla y la otra parte se realizó por un software llamado CYMEGROUND en la cual nos brindó el cálculo de resistividad de terreno y el cálculo de protección de toque y paso.

Cada resultado obtenido en este trabajo está relacionado a los objetivos que se quiere llegar y se brindara sus respectivas conclusiones.

Palabra clave: Puesta a tierra, malla, Red, spat.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de suficiencia es un informe descriptivo, el cual como su nombre lo dice nos ira describiendo cuales son los pasos que se tomó para la realización del diseño de puesta a tierra para una subestación.

El sector eléctrico crece constantemente por un aumento de población y un aumento en el sector de la industria, por tal motivo estamos en la necesidad de ir aumentando subestaciones las cuales puedan satisfagan las necesidades de la población. Por estas razones nos vemos en la necesidad de tener un sistema que nos proteja de elevadas tensiones que lleguen a fugarse y termine en algo fatídico; y es donde esté presente trabajo se centró y se realizó, en un diseño de puesta a tierra para subestaciones que se encuentra realizado dentro de la norma IEEE 80 (2000), la cual nos dice los parámetros para poder prever la descarga eléctrica en un ser humano.

Erica (2009), Nos dice que un sistema de puesta a tierra es fundamental ya que es el encargado de brindar un recorrida de bajan impedancia permitiendo disipar de la mejor manera las corrientes de corto circuito y las sobretensiones, para un sistema de distribución el sistema de puesta a tierra permite que no se interrumpa la continuidad eléctrica y permanezca estable también dando la seguridad que cualquier persona pueda estar caminando sin generar diferencial de tensiones de toque y paso que superen esa resistencia. Entonces por tal motivo para poder diseñar una puesta a tierra para una subestación el criterio que siempre se debe tomar es la máxima corriente que una persona puede aguantar por la falla de diferencia de potencial de toque y paso.

Edgar (2016), nos indica que para la realización de un diseño de puesta a tierra es muy factible realizarlo con una calculadora a la mano, siendo este muy económico y nos ayuda a entender mejor todos los factores que intervienen en el proceso de diseño, pero en estos tiempos de tecnología existen programas que nos facilitan mucho, sobre todo en cuanto a errores de numeración que pueden afectar el cálculo final de nuestro proyecto deseado, por tal motivo nace este software llamado CYMEGROUND que es muy intuitivo y brinda una gran ayuda para poder simular las distintas formas y configuraciones que uno le puede dar a

nuestro tan ansiada malla y darle la mejor configuración para poder alcanzar la resistencia deseada.

El presente trabajo tiene como objetivo general, Determinar el diseño asistido por software en un sistema de puesta a tierra para una subestación en Pachacamac de 10000 KVA y como objetivos específicos son determinar la resistencia, la cantidad de conductores / varillas y cuales son los potenciales de toque y paso para el diseño asistido por software en un sistema de puesta a tierra para una subestación en Pachacamac de 10000 KVA.

En el capítulo 1, Presentamos las bases teóricas que son los conocimientos de diferentes autores, los cuales dieron estudio con buenos resultados en la praxis y también se brinda una definición de términos específicos, lo que son términos técnicos relacionados a nuestra especialidad.

En el capítulo 2, Se muestra en donde se realizó el presente proyecto, como fue el desarrollo de trabajo, como ese fue ejecutando los datos y como se llega al valor deseado para la obtención de nuestros objetivos.

Por último, se muestra los resultados obtenidos en nuestro diseño realizado en el capítulo 2, y se concluye con la obtención de nuestro diseño de puesta a tierra, la resistividad de nuestra malla, cuanto fue la cantidad de conductores / varillas que se usaron y cuáles son potenciales de toque y paso.

## OBJETIVOS

### a. General.

- Determinar el diseño asistido por software en un sistema de puesta a tierra para una subestación en Pachacamac de 10000 KVA”.

### b. Específicos.

- Determinar la resistencia mínima para el diseño asistido por software en un sistema de puesta a tierra para una subestación en Pachacamac de 10000 KVA.
- Determinar la cantidad de conductores y varillas en el diseño asistido por software en un sistema de puesta a tierra para una subestación en Pachacamac de 10000 KVA.
- Determinar el potencial de toque y paso para el diseño asistido por software en un sistema de puesta a tierra para una subestación en Pachacamac de 10000 KVA.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Bases Teóricas:

#### 1.1.1. Antecedentes.

(Astudillo & Cajamarca, 2012) realizó la investigación titulada “Cálculo de sistemas de puesta a tierra aplicación de la norma IEEE 80-2000” en la Universidad de Cuenca, Cuenca – Ecuador. La investigación establece como objetivo lo siguiente: Brindar Seguridad a personas en el Cálculo de sistemas de puesta a tierra aplicación de la norma IEEE 80-2000; Al desarrollo de la investigación se concluye que: Al diseñar el S / E Azogues 2, descubrió que, al variar el espacio entre los conductores, el contacto peligroso y el voltaje de paso en la periferia podrían reducirse, dando como resultado un diseño satisfactorio. Al hacerlo, se concluye que el espaciamiento entre conductores es importante para garantizar un diseño adecuado de la red de puesta a tierra que garantice la seguridad de las personas.

(Vazquez, 2016) realizó la investigación titulada “Diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica mediante dos metodologías” en la Universidad Politécnica Nacional, Ciudad de México - México. La investigación establece como objetivo lo siguiente: Realizar el diseño de puesta a tierra de una subestación eléctrica por medio de dos metodologías; Al desarrollo de la investigación se concluye que: Con el programa CYMEgrd en su diagrama de contornos de potencial nos muestra cuáles son los tramos más seguros del área en la que se instalará el sistema de puesta a tierra, esto puede ayudar a una distribución ideal de los conductores y electrodos de la red, equipos en la subestación eléctrica o mejor diseñar los pasillos por los que caminas en el patio de la subestación eléctrica y se comprueba a través de cálculos que los datos obtenidos por el programa son similares.

(Manani, 2013) realizó la investigación titulada “Sistema de Puesta a tierra y protección equipotencial para sistemas de cómputo”

en la Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo - Perú. La investigación establece como objetivo lo siguiente: Aplicar los conocimientos y fórmulas para el desarrollo de un diseño óptimo de puesta a tierra en edificaciones inteligentes, clínicas, hospitales, centros comerciales, centros de cómputo, etc. a través de un programa; Al desarrollo de la investigación se concluye que: Para un subsistema de tierra interno se debe tener un camino de impedancia baja de conexión a tierra y también conseguir una diferencia de potencial mínima entre las estructuras conductivas dentro del sitio, eliminando cualquier onda de sobretensión que fluya, a través de los equipos del sitio. La barra principal de tierra es una barra de cobre usada como un punto de unión de baja resistencia para todas las tierras interiores. Todos los equipos de RF se conectan directamente a esta barra principal. Esta barra se conecta al sistema de tierra externo, como también la tierra de servicio AC, y otros caminos a tierra como estructuras metálicas.

(Quispe & Gutierrez, 2018) realizó la investigación titulada “Diseño e implementación de diferentes sistemas de puesta a tierra para los laboratorios de ingeniería mecánica eléctrica de la UNA-Puno” en la Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Perú. La investigación establece como objetivo lo siguiente: Realizar la descripción y aplicación de los conceptos y recomendaciones definidos en publicaciones, normativas y prácticas de la industria orientadas a que, en caso de falla a tierra de cualquier tipo, el sistema de puesta a tierra asegure la integridad física a las personas y las instalaciones, así como la apropiada operación de los equipos y sistemas de protección; Al desarrollo de la investigación se concluye que: Se realizó la descripción y aplicación de los conceptos y recomendaciones definidos en publicaciones, normativas y prácticas de la industria. Para que asegure la integridad física a las personas y las instalaciones, así como la apropiada operación de los equipos y sistemas de protección.

## 1.1.2. Sistema de Puesta a Tierra.

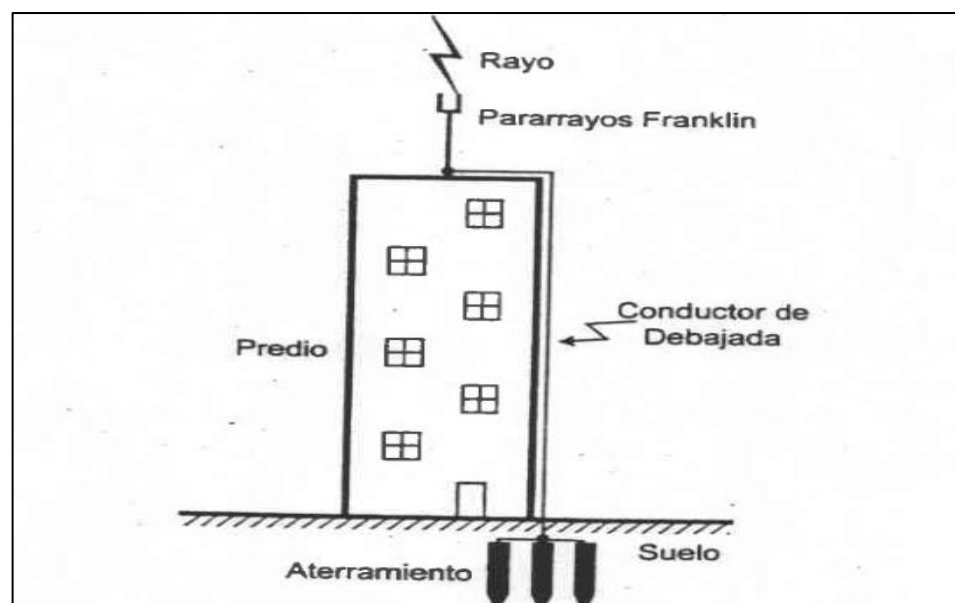
### 1.1.2.1. Como actúa la Corriente en un Sistema de Puesta a Tierra.

Según (Kindermann & Campagnolo, 2010), para que un Sistema de Energía Eléctrica trabaje en forma precisa, con una excelente calidad y continuidad en el servicio, con un óptimo desarrollo seguro por el sistema de custodia y ofrecer una correcta seguridad del personal, es requisito que el Sistema de Aterramiento Eléctrico tenga una buena dedicación al Diseñarlo.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), dice que estos cuidados se fundamentan en sostener una preparación de proyectos particulares, los que van a estar basados en datos que ya están y parámetros ya prefijados, teniendo en cuenta todas las opciones de condiciones al que el sistema de puesta a tierra logre ser sometido.

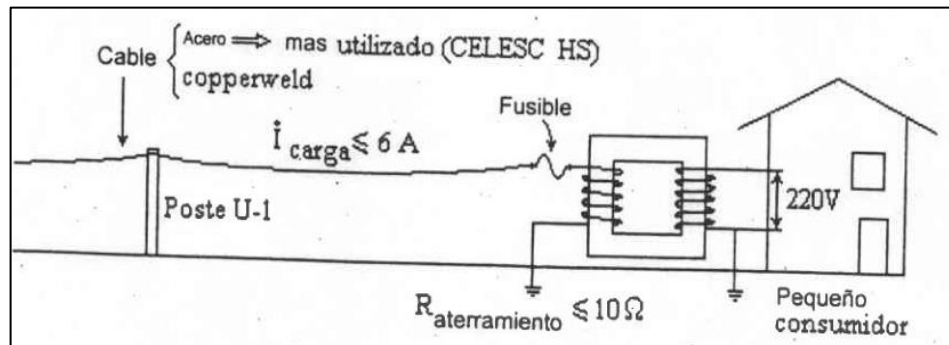
(Toledano & Martinez, 2004), nos apunta que se le proporciona un sendero (recorrido) a la Corriente de falla protegiendo la integridad de la gente, evadiendo la descarga al cuerpo humano y además protegiendo los equipos que se logren estar usando.

En la siguiente figura se observa el recorrido de protección hacia la puesta a tierra planteado por (Kindermann & Campagnolo, 2010).



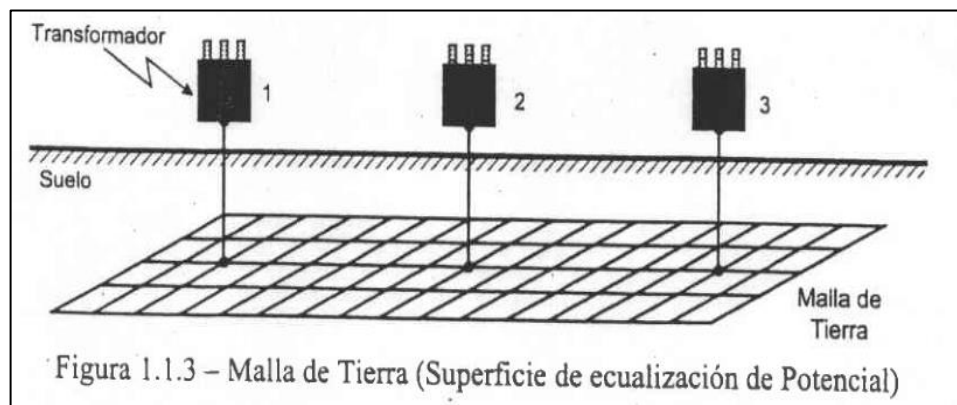
**Figura 1:** Descargas Atmosféricas en un punto.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

En la siguiente figura se muestra cómo se usa la tierra como retomo de corriente eléctrica del sistema Monofásico con Retomo por Tierra (MRT) planteada por (Kindermann & Campagnolo, 2010).



**Figura 2:** Sistema Monofásico de Retorno por Tierra.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010)

En la siguiente figura se aprecia como Filtrar las cargas quietas generadas en las carcasas de los equipamientos. Izo es, conseguir un área de eculización de potencial en las carcasas del equipamiento otorga instalación eléctrica planteada por (Kindermann & Campagnolo, 2010).



**Figura 3:** Malla de Tierra (Superficie de eculización de Potencial).  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

El apunte más considerable, para la preparación de un emprendimiento de aterramiento, es el saber de las propiedades del suelo, primordialmente su resistividad eléctrica. Esta, además de la consideración para la ingeniería eléctrica, en relación a custodia y seguridad, auxilia además a otras superficies, así como: (García, 1999)



- Geología; para la ubicación de fuente de minerales, fuentes de agua, petróleo, gas, estratificación del suelo y fallas de los estratos de Tierra.
- Arqueología; que dará soporte a los nuevos conocimientos arqueológicos.

### 1.1.2.2. Resistividad del Suelo.

Hay numerosos causantes que influyen la resistividad del suelo. Entre ellas, se tienen la posibilidad de destacar: (García, 1999)

- Tipo de suelo.
- Mezcla de diversos tipos de suelos.
- Suelos constituidos por capas estratificadas con profundidades y materiales diferentes.
- Porcentaje de humedad.
- Temperatura.
- Compactación y presión.
- Composición química de las sales disueltas en aguas estancadas.
- Concentración de las sales disueltas en aguas estancadas.

En relación a lo mencionado, Kindermann & Campagnolo (2010) nos dice que las distintas composiciones anotadas resultan en pisos con propiedades diferentes y, consecuentemente, con valores de resistividad diferentes, donde sus pisos son aparentemente iguales pero tienen resistividades diferentes.

En la siguiente Tabla nos muestra la variación de la resistividad de suelos en sus distintas naturalezas.

**Tabla 1:**  
Variación de la Resistividad con respecto a la Naturaleza del Suelo.

<b>Tipo de Suelo Resistividad</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega.m</math>)</b>
Lodo	5 a 100
Tierra de Jardín con 50% de Humedad	140

**Tabla 1:**  
Variación de la Resistividad con respecto a la Naturaleza del Suelo.

<b>Tipo de Suelo Resistividad</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega.m</math>)</b>
Tierra de Jardín con 20% de Humedad	480
Arcilla Seca	1.500 a 5.000
Arcilla con 20% de Humedad	330
Arcilla con 40% de Humedad	80
Arena mojada	1.300
Arena Seca	3.000 a 8.000
Piedra Caliza	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

Para (Kindermann & Campagnolo, 2010), es imposible usar la tabla mostrada como parámetro creíble para la preparación de proyectos, ni tampoco para formarnos un método de seguridad, porque el valor real de la resistividad del suelo es dependiente de las condiciones locales a que el suelo está sometido acorde a los criterios nombrados en esta parte.

### **1.1.2.3. La influencia de la Humedad.**

(Kindermann & Campagnolo, 2010), nos menciona que, La resistividad del suelo sufre modificaciones con la humedad. Esta alteración sucede en virtud de la conducción de las cargas eléctricas, el mismo que es principalmente iónica un porcentaje de humedad más grande provoca que las sales, presentes en el suelo, se disuelvan, formando un medio electrolítico conveniente para el pasaje de la corriente iónica. De esta forma, un suelo determinado, con concentración diferente de humedad, muestra una enorme alteración de su resistividad.

En la siguiente Tabla nos muestra la variación de la resistividad con la humedad de un suelo arenoso.

**Tabla 2:**  
Variación de la Resistividad con respecto a la Humedad.

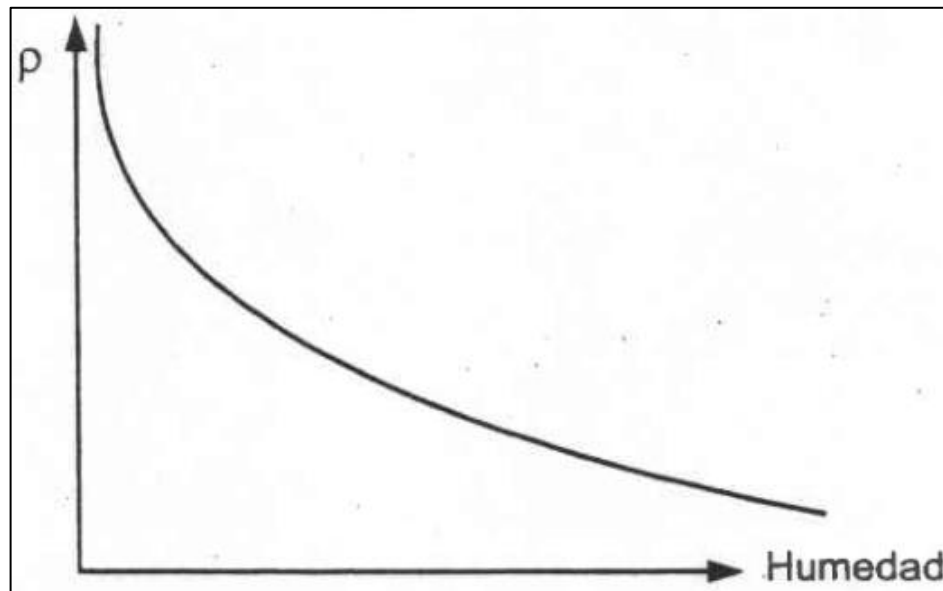
<b>Índice de Humedad (% por peso)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega.m</math>) (Suelo Arenoso)</b>
0,0	10.000.000
2,5	1.5
5,0	430

**Tabla 2:**  
Variación de la Resistividad con respecto a la Humedad.

<b>Índice de Humedad (% por peso)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega.m</math>) (Suelo Arenoso)</b>
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

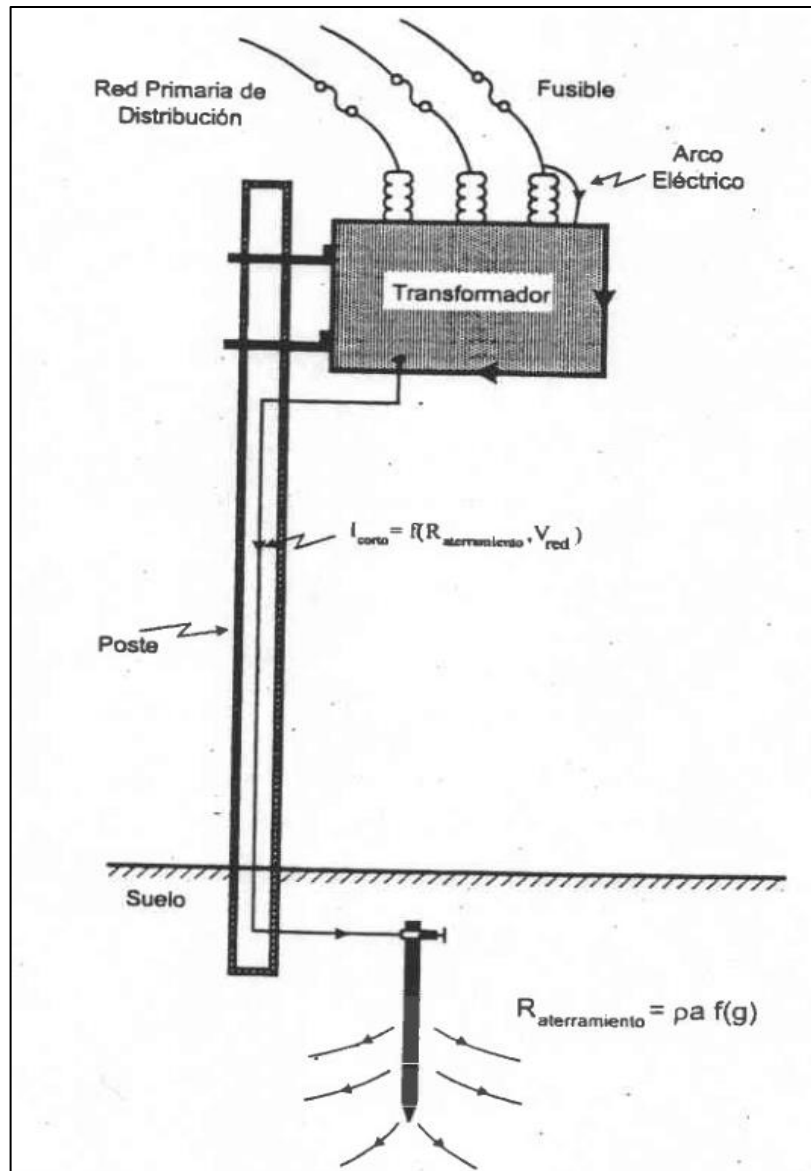
En la siguiente Figura nos muestra que En general, la resistividad ( $\rho$ ) varia acentuadamente con la humedad del suelo.



**Figura 4:**  $\rho$  x Humedad Porcentual Suelo Arenoso.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

(Kindermann & Campagnolo, 2010), menciona que, el valor de la resistividad del terreno sigue a los ciclos secos y días lluviosos en una zona. La calidad de los aterramientos se optimiza en terreno húmedo, y se pone peor en un lapso seco.

En la siguiente Figura nos muestra que la corriente de corto-circuito, que ocurre debido al defecto presentado en el aislador del transformador de distribución, depende del grado de humedad del suelo.



**Figura 5:** Defecto del Aislador del Transformador de Distribución.  
 Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

(Kindermann & Campagnolo, 2010), nos comenta que, luego de un lapso extenso de poca lluvia, el suelo queda muy seco, y por consiguiente su nivel de humedad es muy bajo, y según la figura 5, la resistividad del suelo va a ser muy alta. De esta forma, la resistencia del sistema de aterramiento va a ser muy alta y la corriente de defecto muy chiquita, la que no consigue ocasionar la apertura del fusible. Por consiguiente, la custodia no trabaja gracias a la baja calidad del sistema de aterramiento. Esta circunstancia caracteriza una circunstancia de peligro para el electricista, porque

la estructura del transformador va a estar energizada con la misma tensión de la red de energía eléctrica.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), nos dice que, en la situación contraria, con ocurrencia lloviznas frecuentes, el terreno va a estar mojado, quedando con prominente nivel de humedad, de esta forma la resistencia del sistema de aterramiento va a ser baja y la corriente de corto-circuito va a ser elevada, la que fundirá de manera rápida el fusible. Por ello, con la incidencia de lluvias, todos los aterramientos de los sistemas eléctricos van a tener bajas resistencias, y la custodia actuará como corresponde.

#### **1.1.2.4. La Influencia de la Temperatura.**

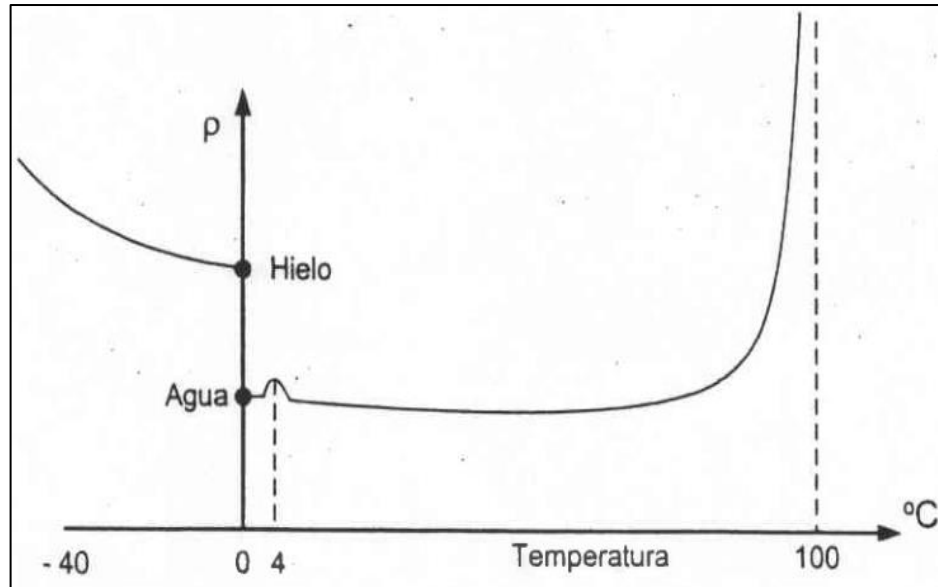
En la siguiente Tabla nos muestra, si en un suelo arenoso, se mantienen todas las demás características y se varía solo la temperatura, su resistividad se comporta así.

**Tabla 3:**  
Influencia de la Temperatura en suelo arenoso.

Temperatura (°C)	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ ) (Suelo Arenoso)
20	72
10	99
0 (Agua)	138
0 (Hielo)	300
-5	790
-15	3.300

Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

En la siguiente Figura nos muestra que, el desempeño de un suelo determinado sometido a variación de temperatura se puede expresar por esta curva.



**Figura 6:**  $\rho \times$  Temperatura.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

(Kindermann & Campagnolo, 2010), establece que, Desde el  $\rho_{\text{Mínimo}}$  con la reducción de la temperatura, y a causa de la contracción y estancado del agua, se da la dispersión de la ligación iónica entre los gránulos de tierra del terreno, y la resistividad recibe un valor más grande.

(IEEE81-STD, 2012), observó que, en la posición de temperatura 0°C (agua), la gráfica da una discontinuidad, acrecentando el valor de la resistividad en la posición 0°C (hielo). Esto hay que al hecho que se da un cambio tosco del estado de unión de los gránulos que conforman la unión electrolítica.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), relaciona que Con una más grande reducción de la temperatura hay una agrupacion en el estado molecular dandose un suelo más seco, acrecentando de esta manera su resistividad.

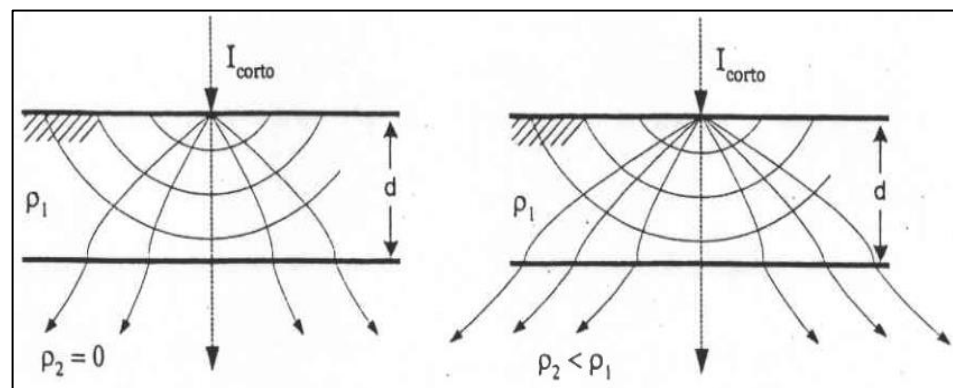
(Kindermann & Campagnolo, 2010), enfoca que en la otra parte con temperaturas altas, cercanas de 100°C, el estado de vaporización deja al terreno más seco, toma la formación de poros internas, poniendo en dificultad la conducción de la corriente, seguidamente, eleva el porcentaje de su resistividad.

### 1.1.2.5. La Influencia de la Estratificación.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), observo que, los suelos en su gran mayoría, no son homogéneos, sino formados por diversas capas de resistividad y de profundidades diferentes. Esas capas, debido a las formaciones 'geológicas, son en general horizontales y paralelas a la superficie del suelo.

(IEEE80-STD, 2000), existen casos en que las capas se presentan inclinadas y hasta verticales, debido a alguna falla geológica. Entretanto, los estudios presentados para explorar el perfil del suelo los consideran aproximadamente horizontales, uno que otros casos son menos típicos, principalmente en el lugar exacto de instalación de la subestación.

En la siguiente figura nos muestra el resultado de la variación de la resistividad de las capas del suelo, donde se tiene la variación de la dispersión de la corriente. Se presenta el comportamiento de los flujos de dispersión de las corrientes eléctricas en torno al aterramiento en un suelo heterogéneo, formado por dos capas, siendo la resistividad de la segunda capa menor que la de la primera capa. Las líneas punteadas son las superficies equipotenciales. Las líneas llenas son las corrientes eléctricas fluyendo al suelo.

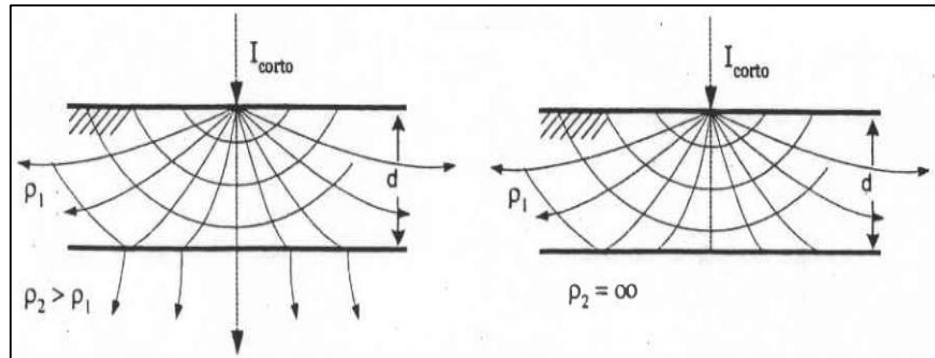


**Figura 7:** Estratificación del Suelo en Dos Capas.

Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

La siguiente figura nos muestra la representación del comportamiento de los flujos de dispersión de las corrientes eléctricas en torno al aterramiento en un suelo heterogéneo,

formado por dos capas, para el caso en que la resistividad de la segunda capa sea mayor que la primera capa.



**Figura 8:** Estratificación del Suelo en Dos Capadas.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

#### 1.1.2.6. La Conexión a Tierra.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), cuando ocurre un cortocircuito con descarga a tierra, se espera que la corriente sea elevada para que la protección pueda operar y actuar con fidelidad y precisión, eliminando el defecto lo más rápidamente posible.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), durante el tiempo en que la protección todavía no actúa, la corriente de defecto que recorre por el suelo, genera potenciales distintos en las estructuras metálicas y superficies del suelo.

(IEEE80-STD, 2000), por tanto, se debe efectuar una conexión adecuada de los equipamientos eléctricos a tierra, para tener el mejor aterramiento posible, dentro de las condiciones del suelo, de modo que la protección sea sensibilizada y los potenciales de toque y paso queden debajo de los límites críticos de la fibrilación ventricular del corazón humano.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), la manera de habilitar una conexión íntima con tierra es conectar los equipamientos y estructuras metálicas a un sistema de aterramiento conveniente.



### **1.1.2.7. Sistemas de Aterramiento.**

Los diversos tipos de sistemas de aterramiento se deben ejecutar para garantizar una buena conexión a tierra. Los principales tipos son: (Mosquera & Giraldo, 2014)

- Un electrodo simple clavado en el suelo.
- Electrodo alineados.
- Electrodo en triángulo.
- Electrodo en cuadrado.
- Electrodo en círculo.
- Placas de material conductor enterradas en el suelo.
- Conductor o cables enterrados en el suelo, formando diversas configuraciones, tales como:
  - Extendido en foso común.
  - En cruz.
  - En estrella.
  - Cuadrículados, formando una malla de tierra.

(Medina, 2009), nos comenta que, el tipo de sistema de aterramiento a adoptarse depende de la importancia del sistema eléctrico involucrado, del terreno y del costo. El sistema más eficiente es, evidentemente, **una malla de tierra**.

### **1.1.2.8. Electrodo de Aterramiento.**

El material de los electrodo de aterramiento debe tener las siguientes características: (Toledano & Martinez, 2004)

- Que sea buen conductor de electricidad.
- Que sea de material, prácticamente, inerte a las acciones de los ácidos y sales disueltos en el suelo.
- Que el material sufra lo menos posible debido a la corrosión galvánica existente en el suelo.
- Que sea de resistencia mecánica compatible para clavarse o removerse en el suelo.

Los mejores electrodos son generalmente los que utilizan cobre: (Toledano & Martinez, 2004)

- **Tipo Copperweld:** Es una barra de acero de sección circular donde el cobre es fundido sobre la superficie exterior de la barra.
- **Tipo Encamisado por Extrusión:** El alma de acero es introducida a un tubo de cobre mediante el proceso de extrusión.
- **Tipo Cadweld:** El cobre es depositado electrolíticamente sobre el alma de acero.

(Toledano & Martinez, 2004), también se emplean electrodos de ángulo de fierro galvanizado, sin embargo, estos presentan corrosión acentuada en comparación con los electrodos que utilizan cobre.

#### **1.1.2.9. Aterramiento.**

(Kindermann & Campagnolo, 2010), en términos de seguridad, se debe aterrizar todas las partes metálicas que eventualmente puedan tener contacto con las partes energizadas. Así, un contacto accidental de una zona energizada con la estructura metálica aterrada producirá un corto-circuito, provocando la actuación de la protección para interrumpir el contacto accidental del circuito energizado con la estructura metálica.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), por tanto, en todo sistema de aterramiento, se debe disponer una sólida conexión de las partes metálicas de los equipamientos. Por ejemplo, en las residencias, se deben aterrizar los siguientes equipamientos: el aire acondicionado, la ducha eléctrica, la estufa, el tablero de medición y distribución, la lavadora y secadora de ropa, la lavadora de vajilla, el refrigerador y freezer, el horno eléctrico, la tubería metálica o de cobre de los calentadores, las cercas metálicas largas, los postes metálicos y proyectores luminosos.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), en la industria del sector eléctrico, se debe hacer un análisis exacto y crítico a los

equipamientos a ser aterrados, para así obtener la mejor seguridad posible.

### **1.1.3. Medición de Resistividad del Suelo.**

#### **1.1.3.1. Localización del Sistema de Aterramiento.**

La localización del sistema de aterramiento depende de la posición estratégica ocupada por los equipamientos eléctricos importantes del sistema eléctrico en cuestión. Se cita, por ejemplo, la localización óptima de una subestación, debe ser definida tomando en consideración lo siguiente: (Kindermann & Campagnolo, 2010)

- Centro geométrico de cargas.
- Local con terreno disponible.
- Terreno accesible económicamente.
- Local seguro a las inundaciones.
- No comprometer la seguridad de la población.

Kindermann & Campagnolo (2010), por tanto, definida la localización de la 'subestación, queda definido el local de la malla de tierra.

(IEEE81-STD, 2012), en la distribución de energía eléctrica, los aterramientos se sitúan en los locales de instalación de los equipamientos tales como: transformadores, interruptores, seccionadores, reguladores de tensión, reclosers, etc. En el sistema de distribución con neutro multi-aterrado, el aterramiento se ejecuta a lo largo de la línea a distancias relativamente constantes.

El local de aterramiento queda condicionado al sistema de energía eléctrica, más precisamente, a los elementos importantes del sistema. Escogido preliminarmente el local, se deben analizar los temas nuevos, tales como: (Kindermann & Campagnolo, 2010)

- Estabilidad de la pedología del terreno.
- Posibilidad de inundaciones en el largo plazo.

- Mediciones locales.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), dice que, de existir algún problema que pueda comprometer el adecuado perfil esperado del sistema de aterramiento, entonces se debe escoger otro local.

### **1.1.3.2. Mediciones del Local.**

(Kindermann & Campagnolo, 2010), definido el local de instalación del sistema de aterramiento, se debe efectuar el levantamiento por medio de mediciones, para así obtener las informaciones necesarias para la elaboración del proyecto.

(Moreno, 1991), el suelo presenta una resistividad que depende del tamaño del sistema de aterramiento. La dispersión de corrientes eléctricas alcanza camadas profundas con el aumento del área implicada por el aterramiento.

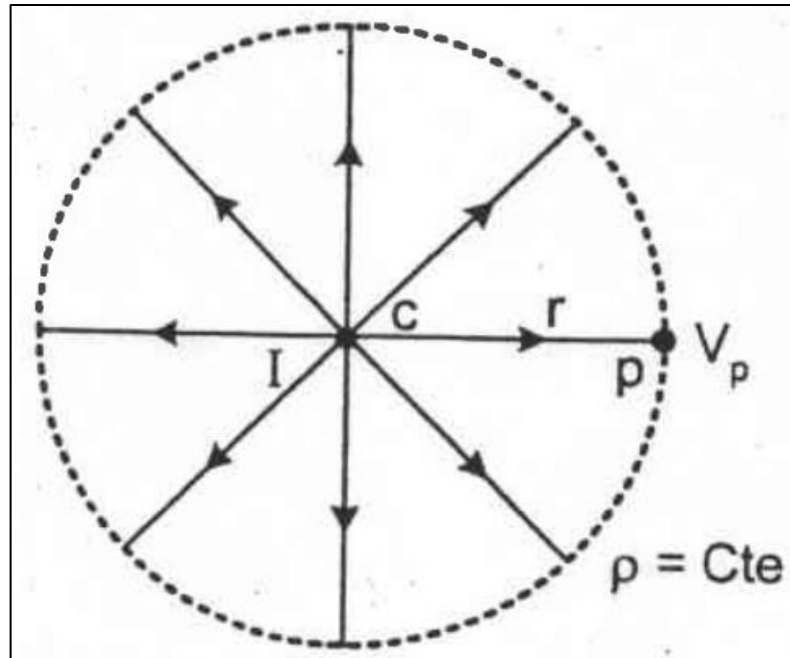
(García, 1999), nos informa que, para elaborar el proyecto del sistema de aterramiento se debe conocer la resistividad aparente que el suelo representa para determinar el aterramiento en particular.

(Medina, 2009), dice que la resistividad del suelo, que refleje sus características, por tanto, es un dato fundamental; por ello, se dará especial atención a su determinación.

(Bustamante, 2011), nos comenta que, el levantamiento de los valores de resistividad se hace por medio de mediciones en campo, utilizando métodos de prospección geo-eléctricos, dentro de los cuales, el más conocido y utilizado es el Método de Wenner.

### **1.1.3.3. Potencial en un Punto.**

En la figura nos muestra un punto "e" inmerso en un suelo infinito y homogéneo, emanando una corriente eléctrica  $I$ . El flujo resultante de la corriente diverge en forma radial.



**Figura 9:** Líneas de Corrientes Eléctricas.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

El campo eléctrico  $E_p = \rho J_p$  en el punto se da por la Ley de Ohm, indicado líneas abajo:

$J_p \rightarrow$  Densidad de corriente en el punto p.

$\rho \rightarrow$  Resistividad de Suelo Homogéneo.

La densidad de corriente es la misma sobre la superficie de la esfera de radio r, con centro en el punto "C" y que pasa por el punto p. Su valor es:

$$J_p = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Por tanto,

$$E_p = \frac{\rho I}{4\pi r^2}$$

El potencial del punto p, en relación a un punto infinito es dado por:

$$V_p = \int_r^\infty E dr \quad (2)$$

Donde:

$dr \rightarrow$  Es una variación infinitesimal en la dirección radial a lo largo del radio r.

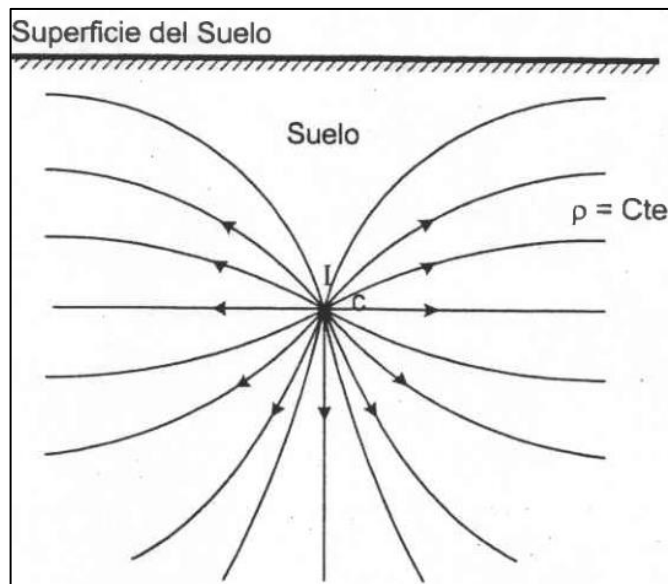
$$V_p = \int_r^\infty \frac{\rho I}{4\pi r^2} dr$$

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2}$$

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (3)$$

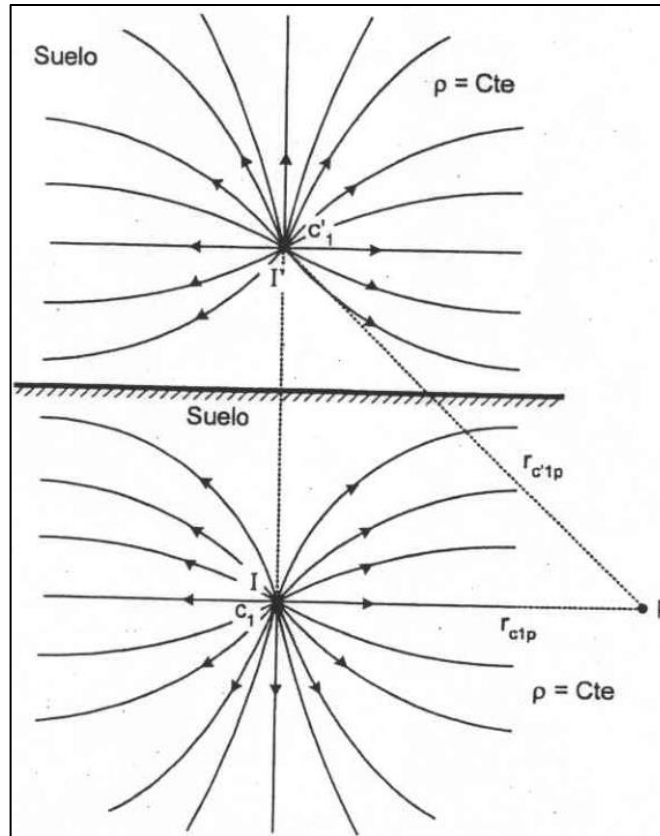
#### 1.1.3.4. Potencial de un Punto Sobre la Superficie de un Suelo Homogéneo.

En la figura nos muestra nos muestra un punto "e", inmerso sobre la superficie de un suelo homogéneo, emanando una corriente eléctrica I, produce un perfil de distribución de flujo de corriente.



**Figura 10:** Comportamiento de Líneas de Corriente Eléctricas en el Suelo.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

En la siguiente figura nos mostramos las líneas de corrientes que se comportan como si hubiese una fuente de corriente puntual simétrica en relación a la superficie del suelo.



**Figura 11:** Punto donde se genera un Potencial.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

(Kindermann & Campagnolo, 2010), el comportamiento es idéntico a una imagen real simétrica de la fuente de corriente puntual. Por tanto, para hallar el potencial de un punto “p” en relación al infinito, basta efectuar la superposición del efecto de cada fuente de corriente individualmente, considerando todo el suelo homogéneo, inclusive el de su imagen.

Así, para calcular el potencial de un punto “p”, basta usar dos veces la expresión 3.

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi r_{CIP}} + \frac{\rho I'}{4\pi r_{C'IP}}$$

Como:

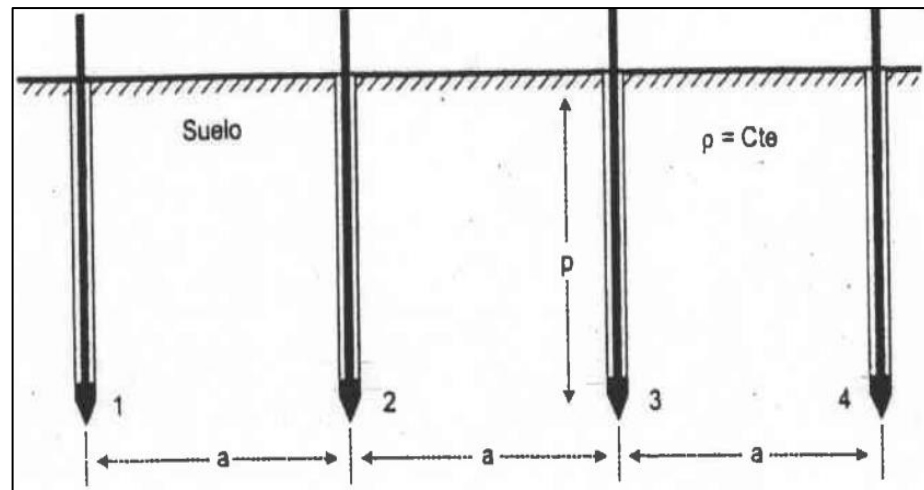
$$I' = I$$

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi} \left( \frac{1}{r_{CIP}} + \frac{1}{r_{C'IP}} \right) \quad (4)$$

### 1.1.3.5. Método de WENNER.

(IEEE81-STD, 2012), nos dice que, para el levantamiento de información de la curva de resistividad del suelo, y poder realizar el diseño de aterramiento, se puede emplear diversos métodos, pero en este caso solo se hablará del método de WENNER.

En la siguiente figura nos muestra la configuración de las picas en el suelo.



**Figura 12:** Cuatro Electrodo Clavados en el Suelo.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

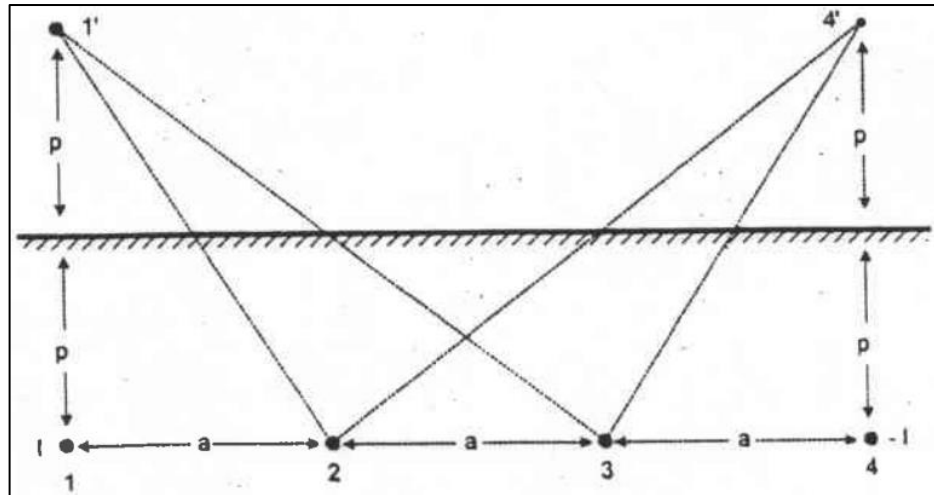
(IEEE81-STD, 2012) dice que una corriente eléctrica “I” es inyectada en el punto “1” por el primer electrodo y colectada en el punto “4” por el último electrodo. Esta corriente, pasando por el suelo entre los puntos “1” y “4”, produce el potencial en los puntos “2” e “3”.

El potencial en el punto 2 es:

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (5)$$

En la siguiente Imagen nos muestra cómo se realiza la toma de potencial de los puntos 2 y 4.





**Figura 13:** Toma de Potencial en el punto 2 y 3.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left( \frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right) \quad (6)$$

Por tanto, la diferencia de potencial en los dos puntos 2 a 3 es:

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left( \frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right)$$

Haciendo la división de la diferencia de potencial  $V_{23}$  por la corriente  $I$ , se tiene el valor de la resistencia eléctrica  $R$  del suelo para una profundidad aceptable de penetración de la corriente  $I$ .

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right)$$

La resistividad eléctrica del suelo es dada por:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega \cdot m] \quad (7)$$

La Formula (7) es conocida como la Fórmula de Palmer, y es usada en el Método de Wenner.

Se recomienda que:

Diámetro da hasta  $< 0,1 a$

Para una separación entre los electrodos relativamente grande, esto es,  $a > 20p$ , la fórmula de Palmer (Formula 7) se reduce a:

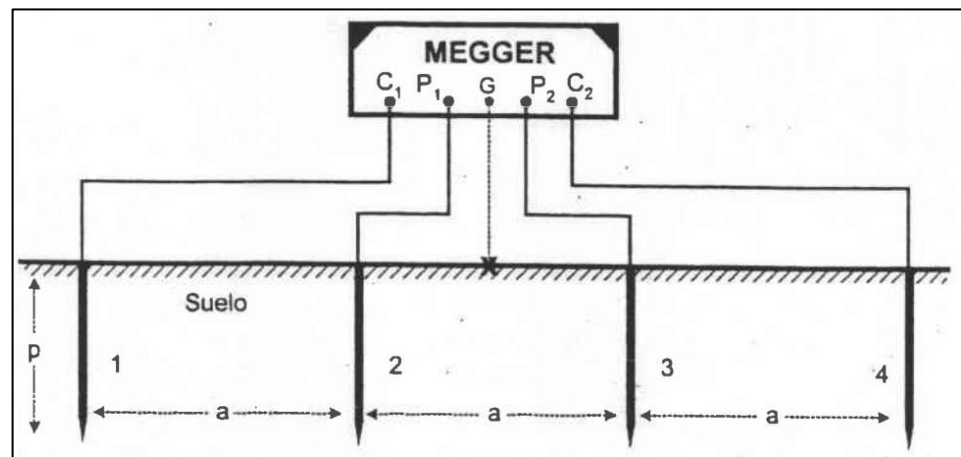
$$\rho = 2\pi a R \quad [\Omega \cdot m]$$

### 1.1.3.6. Medición por el Método de WENNER.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), el método utiliza un **Megger**, instrumento de medida de resistencia que posee cuatro terminales, dos de corriente y dos de potencial.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), nos dice que, el aparato, a través de su fuente interna, hace circular una corriente eléctrica  $I$  entre los dos electrodos externos que están conectados a los terminales de corriente  $C_1$  y  $C_2$ .

En la siguiente Figura se muestra como es la configuración del instrumento de medida MEGGER.



**Figura 14:** Instrumento Megger - Método Wenner.  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

Donde:

**R** = Lectura de la resistencia en  $\Omega$  del Megger, para una profundidad "a".

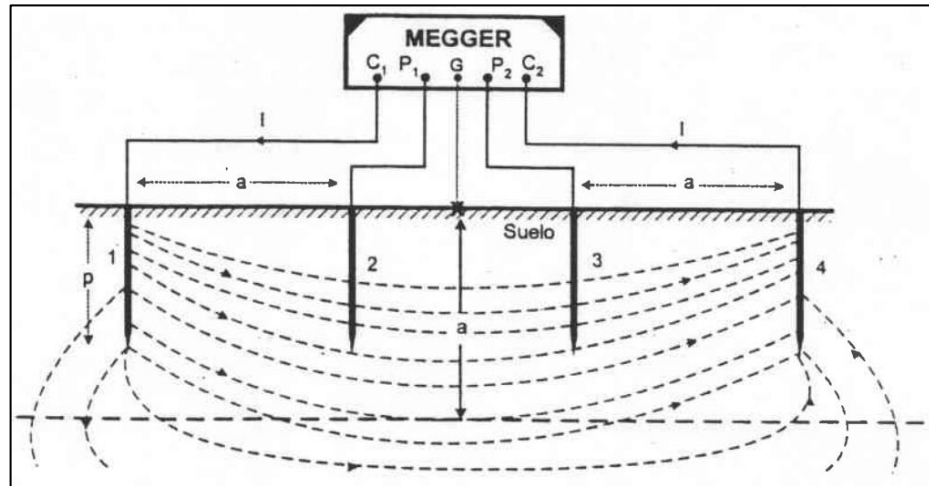
**a** = Espaciamiento de los electrodos clavados en el suelo.

**p** = Profundidad de los electrodos clavados en el suelo.

Los dos electrodos internos son conectados a los terminales P1 y P2. Así, el aparato procesa internamente e indica la lectura o valor de la resistencia eléctrica, de acuerdo a la figura 14.

En la siguiente figura muestra que El método considera prácticamente el 58% de la distribución de la corriente que pasa

entre los electrodos externos ocurre a una profundidad igual al espaciamiento entre los electrodos.



**Figura 15:** Penetración a una profundidad "a".  
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

(Moreno, 1991), nos dice que, la corriente alcanza una profundidad mayor, que abarca un área correspondiente mayor de dispersión, teniendo, en consecuencia, un efecto que puede ser despreciado. Por tanto, para el caso del Método de Wenner, se considera que el valor de la resistencia eléctrica, leída del aparato, es relativo a una profundidad "a" del suelo.

(Kindermann & Campagnolo, 2010), Los electrodos usados en este método deben tener aproximadamente 50cm de longitud y diámetros entre 1 o a 15mm. El material que forma el electrodo debe tener las mismas consideraciones indicadas en el Subcapítulo 1.1.1.8 (Electro de Aterramiento).

(IEEE81-STD, 2012), Se deben realizar diversas lecturas, para varios espaciamientos y con los electrodos siempre alineados.

### 1.1.3.7. Espaciamientos de los Electrodo.

En la siguiente tabla se muestra un cuadro de los espaciamientos recomendados y como se debe realizar una toma de lecturas.

**Tabla 4:**  
Configuración y Espaciamientos Recomendados.

Espaciamiento a (m)	Lectura R ( $\Omega$ )	Calculo $\rho$ ( $\Omega.m$ )
1	---	---

**Tabla 4:**  
Configuración y Espaciamientos Recomendados.

Espaciamento a (m)	Lectura R ( $\Omega$ )	Calculo $\rho$ ( $\Omega.m$ )
2	---	---
4	---	---
6	---	---
8	---	---
10	---	---
16	---	---
32	---	---

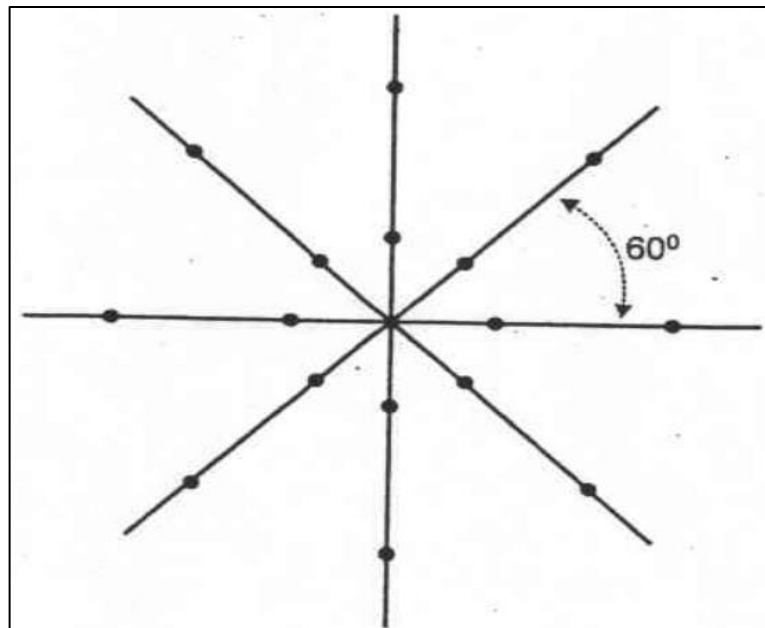
Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

### 1.1.3.8. Direcciones a ser Medidas.

El número de direcciones en que las medidas deberán ser levantadas depende: (Kindermann & Campagnolo, 2010)

- De la importancia del local de aterramiento.
- De la dimensión del sistema de aterramiento.
- De la variación acentuada de los valores medidos para los respectivos espaciamientos.

En la siguiente figura nos muestra que, para un único punto de aterramiento, esto es, para cada posición del aparato, se deben efectuar medidas en tres direcciones, con ángulo de  $60^\circ$  entre sí.

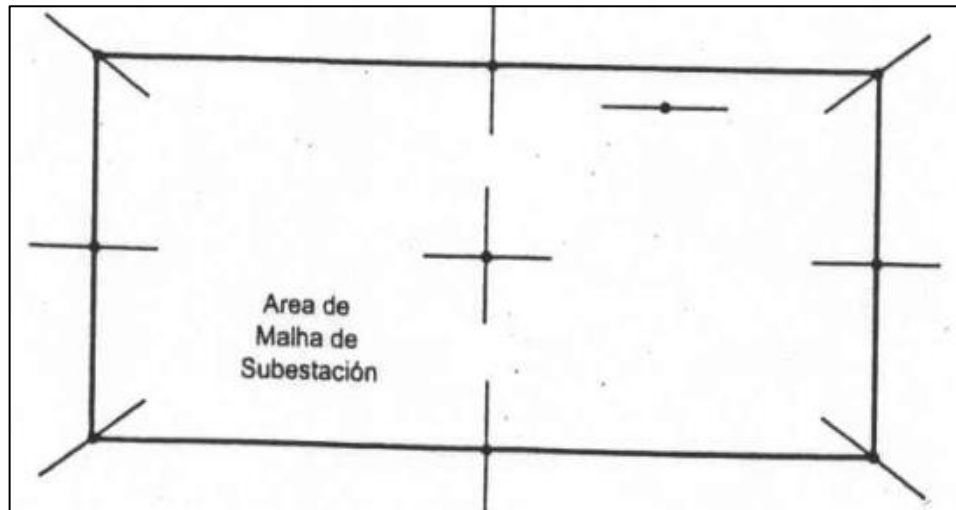


**Figura 16:** Direcciones de un Punto de aterramiento en Medición.

Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

(Kindermann & Campagnolo, 2010), este es el caso de un sistema de aterramiento pequeño, con un único punto de conexión a equipamientos de sistemas de pequeña dimensión, tales como: regulador de tensión, reconectador (rec/oser), transformador, seccionador, TC, TP, interruptores en aceite y en SF6, etc.

En la siguiente figura nos muestra En el caso de una subestación se deben efectuar mediciones en varios puntos, cubriendo toda el área de la malla proyectada.



**Figura 17:** Direcciones de mediciones para el área de una malla de una subestación. Fuente: (Kindermann & Campagnolo, 2010).

(IEEE81-STD, 2012), si la subestación fuera de grandes dimensiones, se debe efectuar mediciones en varias direcciones de modo de cubrir toda el área. En la figura 17, el aparato de medición debe quedar posicionado en el medio de la dirección indicada y efectuar las mediciones de acuerdo con los espaciamientos recomendados en la tabla 4.

El ideal es efectuar varias medidas en puntos y direcciones diferentes. Más si por algún motivo, se desea usar el mínimo de direcciones, entonces, se debe por lo menos efectuar las mediciones en la dirección indicada como sigue: (Kindermann & Campagnolo, 2010)

- En la dirección de la línea de alimentación.

- En la dirección del punto de aterramiento o aterramiento de la fuente de alimentación.

### 1.1.3.9. Análisis de las Medidas.

Efectuadas las mediciones, se debe realizar un análisis de los resultados para que los mismos puedan ser evaluados en relación a su aceptación o no. Esta evaluación se hace de la siguiente forma: (IEEE81-STD, 2012)

- a) Calcular la media aritmética de los valores de la resistividad eléctrica para cada espaciamiento adoptado. Se toma de esta manera:

$$\rho_M(a_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(a_j) \quad \forall \begin{matrix} i=1,n \\ j=1,q \end{matrix} \quad (8)$$

Donde:

$\rho_M(a_j)$  → Resistividad Media para el respectivo espaciamiento  $a_j$ .

$n$  → Número de mediciones efectuadas para el respectivo espaciamiento  $a_j$ .

$\rho_i(a_j)$  → Valor de la  $i$ -ésima medición de la resistividad con el espaciamiento  $a_j$ .

$q$  → Número de espaciamientos empleados.

- b) Proceder al cálculo de desvío de cada medida en relación al valor medio como sigue:

$$|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)| \quad \forall \begin{matrix} i=l,n \\ j=l,q \end{matrix} \quad (9)$$

- **Observación (a):** Se debe despreciar todos los valores de la resistividad que tengan un desvío mayor de 50% en relación a la media, esto es:

$$\frac{|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)|}{\rho_M(a_j)} \cdot 100 \geq 50\% \quad \forall \begin{matrix} i=l,n \\ j=l,q \end{matrix}$$

- **Observación (b):** Si el valor de la resistividad tuviera el desvío debajo de 50%, el valor será aceptado como representativo.
- **Observación (c):** Si observada la ocurrencia de un acentuado número de medidas con desvíos encima de 50%, se recomienda ejecutar nuevas medidas en la región correspondiente. Si la ocurrencia de desvíos persiste, entonces se debe considerar el área como una región independiente para efectos del modelaje.

Con una nueva tabla, se efectúa el cálculo de las medias aritméticas de las resistividades remanentes.

- c) Con las resistividades medias para cada espaciamento, entonces se tienen los valores definitivos y representativos para trazar la curva  $\rho$  x a, necesaria al procedimiento de las aplicaciones de los métodos de estratificación del suelo; este asunto será tratado en el capítulo siguiente.

#### **1.1.4. Valores Normados de Resistencia de Puesta a Tierra.**

(RETIE-Artículo15, 2013) nos dice que, un buen diseño de conexión a tierra debe garantizar el control de los voltajes de paso, contacto y transferencia. Dado que la resistencia de tierra es un indicador que limita directamente el aumento máximo de potencial. El cumplimiento de estos valores no exime al diseñador y fabricante de garantizar que las tensiones de paso, contacto y transferencia aplicadas a las personas en caso de falla a tierra no superen el máximo permitido.

En la siguiente tabla nos puesta los valores máximos admisibles para los diferentes equipos eléctricos que se puedan presentar de conexión a tierra, adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI / IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552.

**Tabla 5:**  
Valores Normados Máximos de Resistencia de puesta a tierra.

Aplicación	Valores Máximos de Resistencia de Puesta a Tierra
Estructuras y torrecillas metálicas de líneas o redes con cable de guarda	20 $\Omega$
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1 $\Omega$
Subestaciones de media tensión	10 $\Omega$
Protección contra rayos	10 $\Omega$
Punto neutro de acometida en baja tensión	25 $\Omega$
Redes para equipos electrónicos o sensibles	10 $\Omega$

Fuente: (RETIE-Artículo15, 2013)

Cuando existen altos valores de resistividad de tierra, altas corrientes de falla a tierra o tiempos prolongados de eliminación, se deben tomar las siguientes medidas para evitar exponer a las personas a voltajes por encima de los límites de soporte humano: (RETIE-Artículo15, 2013)

- ✓ Hacer inaccesibles las áreas donde se espera que se excedan los límites de soporte para humanos.
- ✓ Instale pisos o pisos altamente aislados.
- ✓ Aísle todos los dispositivos que puedan ser manipulados por una persona.
- ✓ Establezca conexiones equipotenciales en áreas críticas.
- ✓ Aísle el conductor del electrodo de puesta a tierra en su entrada al suelo.
- ✓ Disponer de señalización en áreas críticas donde puedan trabajar profesionales competentes siempre y cuando cuenten con capacitaciones sobre el tipo de riesgo y estén equipados con elementos de protección individual con aislamiento adecuado.

#### **1.1.5. Criterios Tolerables de Voltaje.**

Los siguientes puntos que deben ser tomados en cuenta para realizar nuestra configuración del sistema de puesta a tierra son las siguientes: (IEEE80-STD, 2000)



**Aumento del potencial terrestre (GPR):**

El potencial eléctrico máximo que puede alcanzar un electrodo de tierra con respecto a un punto de tierra de cierta distancia que se supone que es el potencial de tierra remoto. Esta tensión, GPR, es igual a la corriente máxima de tierra, multiplicada por la resistencia de la red de tierra.

**Tensión de la Malla:**

Es el voltaje de contacto máximo dentro de una malla de una cuadrícula de puesta a tierra.

**Voltaje de contacto de metal a metal:**

Es la diferencia de potencial entre los objetos metálicos o las estructuras dentro de una subestación que se puede controlar mediante el contacto directo de mano a mano o de mano a pie. En una subestación convencional, el peor voltaje de contacto suele ser la diferencia de potencial entre una mano y un pie en un punto de máxima distancia. Sin embargo, en el caso de contacto de metal a metal de mano a mano o de mano a pie, ambas situaciones deben investigarse para las peores condiciones de alcance posibles.

**Tensión de Paso:**

La diferencia en el potencial de la superficie que puede experimentar una persona de pie a 1 metro de distancia, sin entrar en contacto con un objeto conectado a tierra.

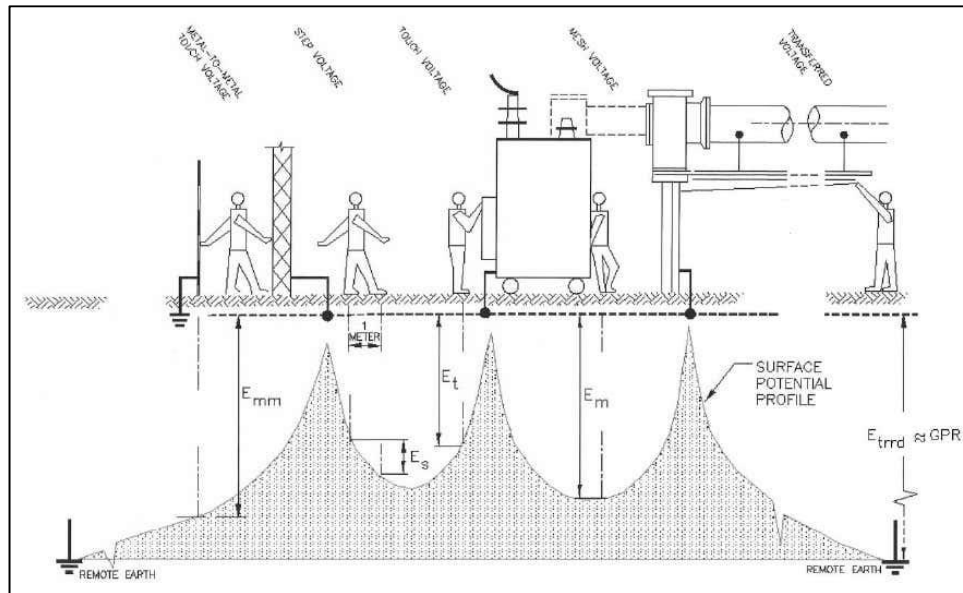
**Voltaje de Toque:**

La diferencia de potencial entre el aumento en el potencial de tierra (GPR) de una cuadrícula o sistema de tierra y el potencial de superficie en el punto donde una persona puede pararse mientras tiene una mano en contacto con una estructura conectada a tierra. Las mediciones de voltaje de contacto pueden ser de "circuito abierto" (sin la resistencia del cuerpo equivalente contenida en el circuito de medición) o "circuito cerrado" (con la resistencia del cuerpo equivalente contenida en el circuito de medición).

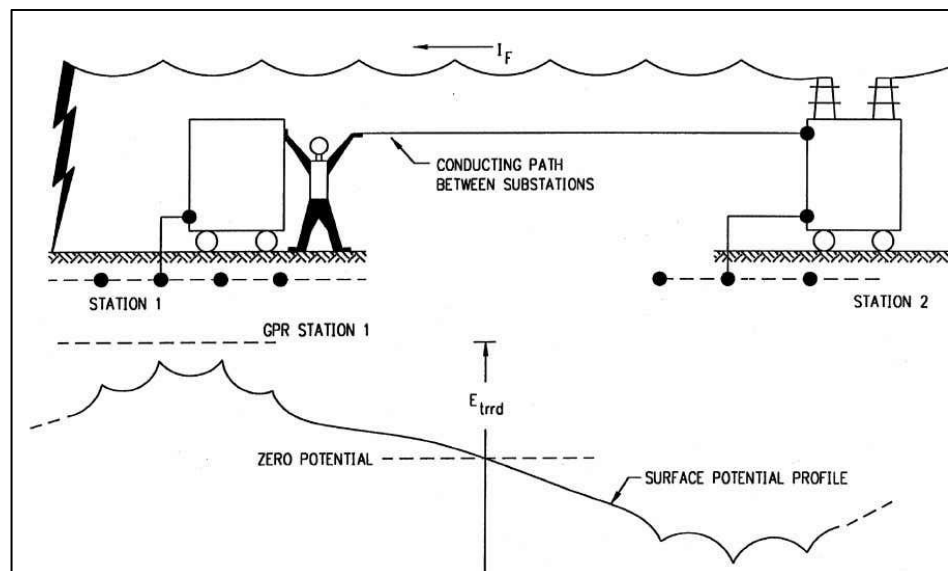
### Voltaje transferido:

Un caso especial de voltaje de contacto cuando el voltaje se transfiere dentro o fuera de la subestación desde o hacia un punto remoto fuera de la ubicación de la subestación.

En la siguientes figuras nos muestra todas las situaciones donde se produce la diferencia de potencial por contacto con una persona.



**Figura 18:** Situaciones usuales de tensión de contacto.  
Fuente: (IEEE80-STD, 2000).



**Figura 19:** Situación usual de potencial Transferida.  
Fuente: (IEEE80-STD, 2000)

### 1.1.6. Criterio de Tensión de Toque y Paso.

La seguridad de una persona depende de prevenir la absorción de la cantidad crítica de energía del impacto antes de que la falla desaparezca y el sistema se apague. El voltaje de conducción máximo de cualquier circuito accidental no debe exceder los límites definidos a continuación: (IEEE80-STD, 2000)

#### 1.1.6.1. Para la Tensión de Paso, el límite se da así:

$$E_{paso} = (R_B + 2R_f)I_B \quad (11)$$

Para un peso corporal de 50Kg.

$$E_{paso\ 50} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (12)$$

Para un peso corporal de 70Kg.

$$E_{paso\ 70} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (13)$$

Donde:

$E_{paso}$  = es la Tensión de paso en V.

$R_B$  = es la resistencia de cuerpo humano en  $\Omega$ .

$R_f$  = es la resistencia a tierra de un pie (ignorando la presencia del sistema a tierra de la subestación).

$I_B$  = es la magnitud RMS de la corriente que pasa por en cuerpo en A.

$C_s$  = es el factor de Reducción.

$\rho_s$  = es la resistividad del material Superficial en  $\Omega$ -m.

$t_s$  = es el tiempo o la duración de corriente de coque en S.

#### 1.1.6.2. Para la Tensión de Toque, el límite se da así:

$$E_{Toque} = (R_B + \frac{R_f}{2})I_B \quad (14)$$

Para un peso corporal de 50Kg.

$$E_{Toque\ 50} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (15)$$

Para un peso corporal de 70Kg.

$$E_{Toque\ 70} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (16)$$

Donde:

$E_{toque}$  = es la Tensión de toque en V.

$R_B$  = es la resistencia de cuerpo humano en  $\Omega$ .

$R_f$  = es la resistencia a tierra de un pie (ignorando la presencia del sistema a tierra de la subestación).

$I_B$  = es la magnitud RMS de la corriente que pasa por en cuerpo en A.

$C_s$  = es el factor de Reducción.

$\rho_s$  = es la resistividad del material Superficial en  $\Omega$ -m.

$t_s$  = es el tiempo o la duración de corriente de coque en S.

#### 1.1.7. Requerimiento mínimo de la Varilla (Electrodo) y Conductores

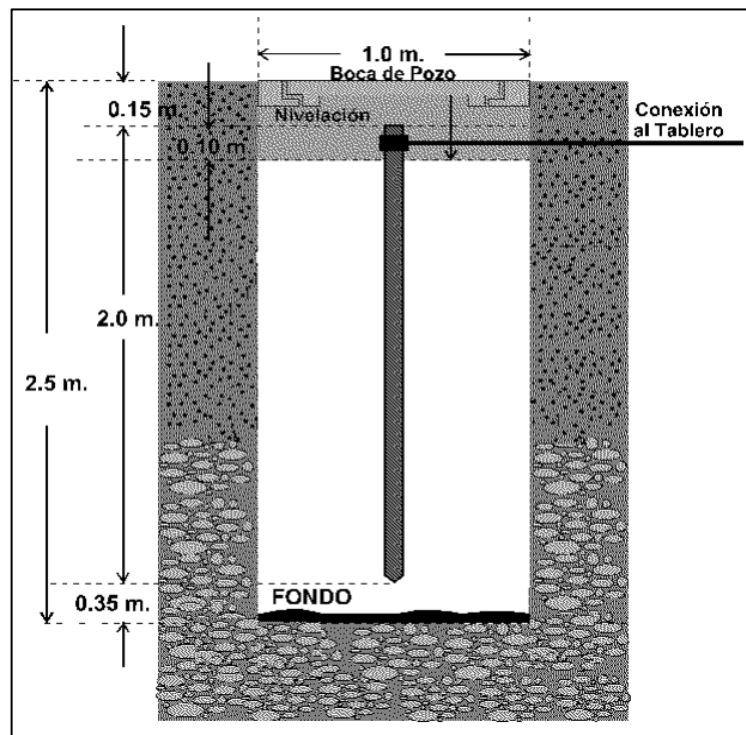
##### Varilla Electrodo.

Deben cumplir las siguientes especificaciones como mínimo: (NTP-370.056, 1999)

- ✓ El Electrodo varilla de cobre con el diámetro nominal de al menos 12 mm y una longitud de al menos 2,0 m. La profundidad mínima a la que debe insertarse es de 2,5 m. Si se encuentra roca de menos de 1,25 m de profundidad, el electrodo debe enterrarse horizontalmente.
- ✓ Los electrodos de tierra, si corresponden a varillas de cobre, están grabados de forma indeleble y fácilmente legible con el nombre o marca del fabricante, seguido de su longitud en metros, el diámetro en mm y las iniciales NTP 370.056.
- ✓ La marca se coloca en la parte superior de la varilla y de tal manera que no se impida el contacto normal entre el electrodo y la conexión del conductor de tierra.
- ✓ Las varillas de cobre utilizadas como electrodos deben corresponder a las propiedades técnicas de NTP 342.020.

- ✓ Los conductores de cobre utilizados como electrodos deben corresponder a las propiedades de NTP 370.220, NTP 370.042 y NTP 370.043.
- ✓ El material del electrodo está hecho de cobre electrolítico con una pureza del 99,9%.
- ✓ Se utiliza cobre electrolítico para los electrodos conductores de cobre, templado suave (recocido) y cobre electrolítico para las varillas.
- ✓ Las pruebas que se indican a continuación se realizan en el 1% de los electrodos en cada suministro con al menos dos electrodos.
- ✓ Si una prueba no es satisfactoria, se repite en un número doble de muestras, todas las cuales deben pasar. En caso contrario, se rechazará la entrega.

En la siguiente figura nos muestra el dimensionamiento mínimo de una puesta a tierra.



**Figura 20:** Dimensionamiento mínimo requerido para el Electrodo Varilla de Cobre.  
Fuente: (NTP-370.056, 1999).

## Conductores

Deben cumplir con las siguientes condiciones: (NTP-370.053, 1999)

- ✓ Debe ser de cobre. El material debe ser resistente a todas las condiciones de corrosión que existan en la instalación o debe estar adecuadamente protegido contra la corrosión. El conductor puede ser sólido o trenzado, aislado, cubierto o desnudo.
- ✓ Cuando el conductor de protección esté provisto de una protección o aislamiento, debe ser de color amarillo para poder distinguirlos de los conductores activos (fase) o del conductor neutro, si lo hubiera.
- ✓ Los conductores destinados a utilizarse como conductores neutros para circuitos (si los hay) deben tener Revestimiento de color blanco.

Los conductores de protección no deben ser menores a las selecciones postradas en las siguientes tablas.

En la siguiente tabla nos muestra los conductores para poner a puesta a tierra.

**Tabla 6:**  
Conductor de puesta a tierra para sistemas de corriente alterna.

<b>Sección nominal del conductor mayor de la acometida o su equivalente para conductores en paralelo (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Sección nominal del conductor de puesta a tierra (cobre) (mm<sup>2</sup>)</b>
35 ó menor	10
50	16
70	25
95 a 185	35
240 a 300	50
400 a 500	70
Más de 500	95

Fuente: (NTP-370.053, 1999).

En la siguiente tabla nos muestra los conductores de protección a tierra.

**Tabla 7:**  
Sección mínima de los Conductores de Protección.

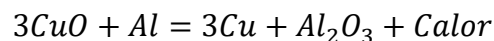
<b>Capacidad nominal o ajuste del dispositivo automático de sobrecorriente No mayor de, en (A)</b>	<b>Sección nominal del conductor de protección (cobre) (mm<sup>2</sup>)</b>
15	2
20	3
60	5
100	8
200	16
400	25
800	50
1000	70
1200	95
2000	120
2500	185
4000	240
6000	400

Fuente: (NTP-370.053, 1999).

#### 1.1.8. Conexión de Conductores y Electrodo en Malla.

(IEEE-837, 2014), nos dice que, las conexiones y/o empalmes que se encuentre enterrados en el suelo se realizan mediante soldadura exotérmica. Deben llenarse lo suficientemente para llenar y cubrir totalmente los conductores. La superficie de la junta debe ser razonablemente lisa y libre de depósitos importantes de escoria. Los compuestos exotérmicos consisten en una reacción química en la que el óxido de cobre se reduce por el polvo de aluminio de acuerdo con la siguiente aleación:

(17)



(IEEE-837, 2014) nos dice que no se debe soldar con materiales de bajo punto de fusión (estaño, plomo, etc.) para evitar contactos incorrectos. Así mismo también debe garantizar una conductividad eléctrica suficiente, soportando aumentos bruscos de temperatura debido a descargas atmosféricas, una alta resistencia mecánica y evitar el deterioro con el tiempo.

En la siguiente tabla nos muestra la selección de carga para el tipo de conexión exotérmica según se requiera.

**Tabla 8:**  
Selección de carga para un tipo de Empalme o conexión exotérmica.

CONEXIÓN	CARGA
Conexión fundida de varilla copperweld de $\varnothing$ 5/8" y cable de cobre calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG)	115 gramos por fusión
Conexión fundida tipo "T" entre cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG) y cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG)	150 gramos por fusión
Conexión fundida tipo "X" entre cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG) y cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG)	250 gramos por fusión
Conexión fundida tipo "T" entre cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG) y cable calibre 70 mm <sup>2</sup> (2/0 AWG)	90 gramos por fusión
Conexión fundida tipo "Empalme" entre cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG) y cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG)	90 gramos por fusión
Conexión fundida tipo "T" entre cable calibre 70 mm <sup>2</sup> (2/0 AWG) y cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG)	115 gramos por fusión

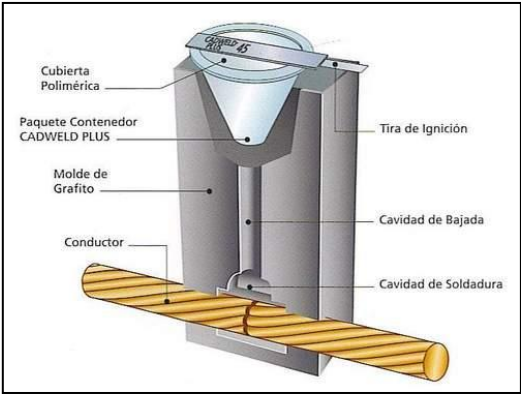
Fuente: (Ende, 2020).

(IEEE-837, 2014), nos dice que el material del molde será grafito o materiales similares aptos para realizar las uniones por reacción exotérmica, a una temperatura igual al punto de fusión del cobre. El calor generado no debe alterar el funcionamiento de la junta siempre que no aumente la resistencia eléctrica de los conductores o partes que confluyen y no reduzca su resistencia a la corrosión. Las soldaduras no deben presentar imperfectos u otros defectos visibles que puedan poner en peligro la junta soldada. La sección transversal de la soldadura será mayor que la de las partes que está soldando. La longitud axial de la soldadura debe ser necesaria para cumplir con los requisitos mecánicos y eléctricos.



En la siguiente figura nos muestra la selección de nuestro molde de grafito para el tipo de unión u conexión exotérmica.

**Tabla 9:**  
Selección de Molde de grafito para la soldadura exotérmica.

MOLDES	DISEÑO
Molde para hacer conexión fundida de varilla copperweld de $\varnothing$ 5/8" y cable de cobre calibre 185 mm <sup>2</sup> (350 kCM)	
Molde para hacer conexión fundida tipo "T" entre cable calibre 185 mm <sup>2</sup> (350 kCM) y cable calibre 185 mm <sup>2</sup> (350 kCM)	
Molde para hacer conexión fundida tipo "T" entre cable calibre 185 mm <sup>2</sup> (350 kCM) y cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG)	
Molde para hacer conexión fundida tipo "T" entre cable calibre 185 mm <sup>2</sup> (350 kCM) y cable calibre 70 mm <sup>2</sup> (2/0 AWG)	
Molde para hacer conexión fundida de varilla copperweld de $\varnothing$ 5/8" y cable de cobre calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG)	
Molde para hacer conexión fundida tipo "T" entre cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG) y cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG)	
Molde para hacer conexión fundida tipo "X" entre cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG) y cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG)	
Molde para hacer conexión fundida tipo "T" entre cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG) y cable calibre 70 mm <sup>2</sup> (2/0 AWG)	
Molde para hacer conexión fundida tipo "Empalme" entre cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG) y cable calibre 107 mm <sup>2</sup> (4/0 AWG)	

**Figura 21: Unión exotérmica - molde grafito.**  
Fuente: (Ende-Catálogo, 2020).

## 1.2. Definición de Términos Básicos.

- **Puesta a tierra de protección:** Es el que conecta de forma conductiva los elementos metálicos expuestos de una instalación, estos elementos conductores, normalmente libres de tensión (carcasa, tuberías, crucetes, etc.) pero que eventualmente pueden adquirir un potencial respecto a tierra cuando ocurre falla en la instalación.
- **Puesta a tierra de operación o funcionamiento:** A menudo, el funcionamiento adecuado de los sistemas eléctricos y algunos de sus componentes requiere realizar una conexión a tierra en ubicaciones específicas. Ejemplos de este tipo de puesta a tierra son la puesta a tierra del conductor neutro de generadores y transformadores conectados en estrella, la puesta a tierra de pararrayos, cables de protección, protección contra sobretensiones en sistemas de baja tensión, etc.
- **Puesta a tierra de servicio:** Al reparar y mantener muchas instalaciones, las partes normalmente energizadas deben estar temporalmente conectadas a tierra para evitar accidentes por reconexión incorrecta de las mismas o por voltajes causados por sistemas energizados cercanos.
- **Conductor de puesta a tierra:** conductores utilizados para conectar equipos o sistemas de cables a uno o más electrodos de tierra.
- **Conexión equipotencial:** Conexión permanente de baja resistencia de piezas metálicas normalmente no vivas a una ruta eléctricamente conductora que garantiza la continuidad eléctrica y la capacidad de conducir de forma segura cualquier corriente fugada.
- **Resistividad de un terreno:** es la relación entre el voltaje de la malla con respecto a la tierra de referencia y la corriente a través de la red a tierra.
- **Efectivamente puesto a tierra o puesto a tierra de una manera efectiva:** Conexión a tierra intencional a través de una conexión directa a tierra o una conexión con una resistencia baja, de capacidad suficiente en la limitación del aumento de voltajes por debajo de lo que podría causar daños a seres humanos o equipos conectados.

- **Puesto a tierra:** conectado a tierra o en contacto con él o conectado a un cuerpo conductor que actúa como tierra. Es la conexión eléctrica entre un electrodo de red o de tierra y una parte externa. Las conexiones a tierra enterradas y no aisladas se consideran parte de la red de electrodos.
- **Mallas de tierra:** es el grupo de electrodos que están conectados eléctricamente entre sí.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL TRABAJO PROFESIONAL

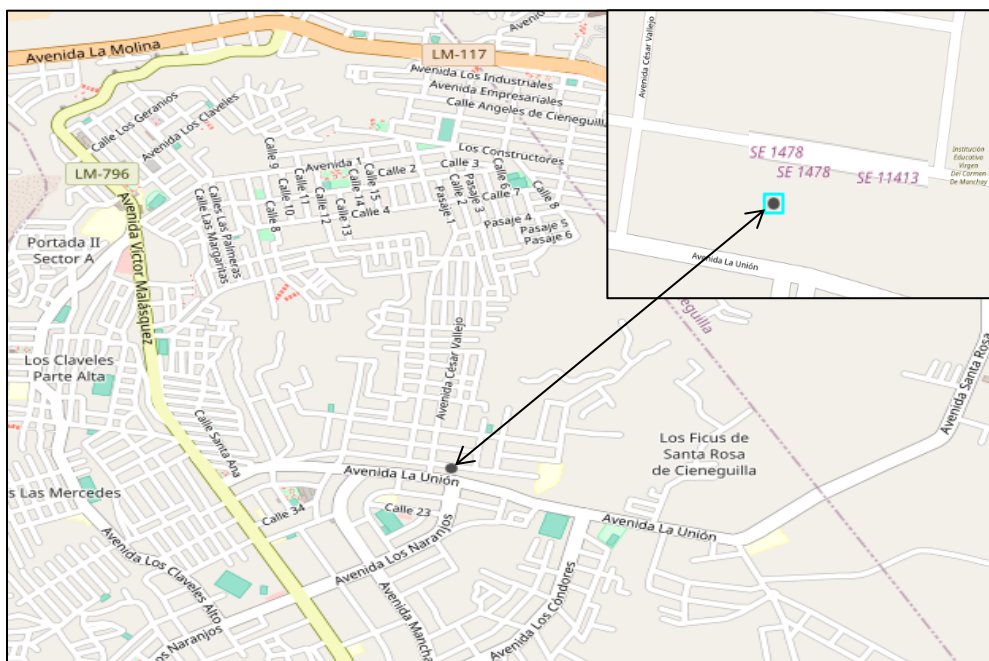
#### 2.1. Delimitación del Trabajo Profesional

##### 2.1.1. Temporal.

La delimitación Temporal de este trabajo Profesional, se estableció desde el mes de Agosto al mes Octubre del 2018.

##### 2.1.2. Espacial.

La delimitación Espacial de este trabajo Profesional, se ejecutó Subestación-Buena Vista, el cual se ubica en el distrito de Pachacamac, provincia de Lima, departamento de Lima – Perú.



**Figura 22:** Ubicación del Proyecto.  
Fuente: (Arcgis & Ubicación-Proyecto, 2020).

#### 2.2. Determinación y Análisis del Problema

El Distrito de Pachacamac es un pueblo joven con grandes extensiones territoriales, en donde su gente e industrias crecen día a día, por tal motivo se propuso poner una subestación por la necesidad de un aumento de potencia eléctrica debido a interrupciones en el servicio eléctrico las cuales causan malestar en la población y también estaban causando pérdidas económicas en la industria.

Ante esto se puso en marcha la instalación de una subestación de 1000Kva (ver Anexo 3) que evite las caídas de tensión que se reflejaban En las reiterativas interrupciones del servicio eléctrico.

La realidad problemática se centra en dar un sistema de protección en la subestación que nos brinde seguridad para los equipos instalados y para el personal que se encuentre cerca de ella.

De esta manera, el presente trabajo busca determinar el diseño de puesta a tierra para la subestación asistido por un software que nos pueda asegurar la protección debida para el personal que se encuentre en dicho lugar. Por tal motivo se requiere determinar la resistencia del sistema, la cantidad conductores, el potencial de toque y paso que garanticen esta protección.

#### **2.2.1. Problema General.**

¿Cómo nos permite el diseño asistido por software en un sistema de puesta a tierra lograr una mejora para la subestación en Pachacamac de 10000 KVA con respecto al cálculo tradicional que se ejerce?

#### **2.2.2. Problemas Específicos.**

- ¿Por qué es necesario determinar la resistencia mínima del diseño asistido por software en un sistema de puesta a tierra para la subestación en Pachacamac de 10000 KVA?
- ¿De qué depende saber la cantidad de conductores y varillas del diseño asistido por software en un sistema de puesta a tierra para considerarlo a la subestación en Pachacamac de 10000 KVA?
- ¿De qué manera nos ayuda obtener el potencial de toque y paso para el Diseño asistido por software en un sistema de puesta a tierra para la subestación en Pachacamac de 10000 KVA?

### **2.3. Modelo de solución propuesto**

La solución propuesta para esta subestación (ver anexo 1) es diseñar el sistema de puesta a tierra con el programa CYMEGROUND ya que cuenta con una gran herramienta que nos permite obviar los cálculos y nos da la respuesta a la mano para saber rápidamente si es viable el sistema propuesto

de malla a puesta a tierra. Los datos para poder calcular a través del programa son:

Corriente de fase – Tierra= 1202.81 A.

Tiempo de liberación de falla por protección= 0.3 s.

Resistividad especifica media en el terreno= 53  $\Omega \cdot m$ .

Resistividad superficial del suelo= 2500  $\Omega \cdot m$ .

Espesor de capa superficial= 0.2 m.

Área que ocupa la red de tierra=40m × 80m = 3200m<sup>2</sup>.

Profundidad de aterramiento de la red (recomendada)=0,6m.

### **Consideraciones de Terreno y Diseño:**

- La tierra es de chacra con índices ricos en minerales y sales lo que nos proporciona una buena conductividad para la descarga.
- Los periodos de lluvia son casi iguales en todas las estaciones sin desbordamiento de agua.
- No existen meses de sequía.
- Se encuentra en un lugar alejado de las viviendas aledañas.
- El terreno es de extensión mediana horizontal.
- La norma (IEEE-837, 2014), nos plantea realizar las juntas de la malla por soldadura exotérmica, ya que se encuentran debajo del suelo y nos evitara el deterioro y desgaste de las uniones de soldadura evitando realizar mantenimientos innecesarios.
- La Norma (IEEE80-STD, 2000), nos dice que para una subestación lo más seguro y recomendable es realizarle una malla de protección.
- La norma (IEEE80-STD, 2000), nos guiara en el desarrollo del diseño de la malla y se tomaran todas sus consideraciones y recomendaciones que nos proponga al respecto.
- La norma (CNE-Suministro, 2001) y (CNE-Utilización, 2006), nos guían para el momento de la conexión tomar en consideración la conexión del neutro a la malla.

### 2.3.1. Diseño Realizado por Calculo Simple o Común.

#### 2.3.1.1. Establecimiento de Corriente de corto Circuito para la Malla.

En la práctica se calcula una corriente de cortocircuito de fase a tierra simétrica de valor eficaz ( $I_f$ ) y, además, se toma en cuenta un factor de división de la corriente de falla ( $S_f$ ), el cual varía de 0.6 a 1.0, dependiendo de las trayectorias de retorno de la corriente de cortocircuito (hilos de guarda, pantallas de cables subterráneos, etc.).

$$I_{CCS} = \frac{(Xfmr FLA) \times 100}{\%Z}$$

Donde:

- $I_{CCS}$  = Es la corriente de corto Circuito o a máxima carga del transformador en Amp.
- $Xfmr FLA$  = Es la carga plena o continua del transformador en Amp.
- $\%Z$  = Es el Porcentaje de reactancia del transformador.

$$Xfmr FLA = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

Donde:

- $S$  = Es la potencia aparente del transformador en KVA.
- $V$  = Es el voltaje de salida del transformador en V.

$$Xfmr FLA = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 480} = 1202.81 A$$

Entonces nuestra corriente de cortocircuito simétrica será:

$$I_{CCS} = \frac{(1202.81) \times 100}{5} = 24056.2 A$$

La cual se le aumentara a un 10% por seguridad, la cual se halla de la siguiente forma:

$$I_{CCS} = 24056.2 \times 1.10 = 26461.6 A \approx 26.5 KA$$

Para la corriente asimétrica de cortocircuito de fase a tierra

$$I_{CCA} = D_f(T_f) \times I_{CCS}$$

Dónde:

- $I_{CCA}$  =Corriente asimétrica de cortocircuito de fase - tierra.
- $D_f(T_f)$  =Factor de decremento de la corriente de falla asimétrica, durante un tiempo de duración " $T_f$ ".
- $I_{CCS}$  =Corriente de falla de fase a tierra simétrica inicial de valor eficaz.

Nota: el  $D_f(T_f)$  factor que es en base a la relación X/R en el punto de falla, según el capítulo 15 de la norma IEEE STD 80, se tomara un X/R=10 con el tiempo que tenemos de 0.3s, el cual tomara el valor de "1.033".

En la Siguiete tabla de la Norma IEEE 80 se muestra la relación X/R con respecto al intervalo de tiempo de falla.

**Tabla 10:**

Factor de Decremento con respecto al tiempo y ciclos.

Duración de la Falla ( $T_f$ )		Factor de Decremento ( $D_f$ )			
Segundos	Ciclos	X/R=			
		10	20	30	40
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.1	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.2	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.3	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.4	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.5	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Fuente: (IEEE 80-STD, 2000)

$$I_F = 26461.6 \times 1.013 = 26805.6 \text{ A} \approx 26.8 \text{ KA}$$

### Calculo de la máxima corriente de falla:

Para este diseño Tomaremos un factor  $S_f = 0.7$

$$I_g = S_f \times I_{CC}$$

$$I_g = 0.7 \times 26805.6 = 18763.92 \text{ A} \approx 18.76 \text{ KA}$$



Para el diseño de esta malla se realiza con el máximo valor de corriente que tomara por medio de la siguiente expresión ( $I_G$ ):

$$I_G = C_p \times D_f \times I_g$$

Dónde:

- $I_G$  =Corriente máxima en la malla en Amperes.
- $C_p$  =Proyección a futura de corriente de falla en caso se tenga una ampliación, para este caso como no hay se toma el valor  $C_p = 1$ .
- $D_f$  =Factor de decremento de la corriente de falla asimétrica, durante un tiempo de duración " $T_f$ ". El cual tomaremos el valor de  $D_f = 1.043$ .
- $I_g$  =Corriente simétrica de la red en amperes, por lo que resulta:

$$I_G = C_p \times D_f \times I_g$$

$$I_G = 1 \times 1.043 \times 18763.92 = 19570.77 \text{ A}$$

$$I_G \approx 19.57 \text{ KA Eficaz}$$

### 2.3.1.2. Hallando el Calibre del Conductor de Malla.

$$A_{cmil} = \frac{I_G}{\sqrt{\frac{\ln\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{33T_f}}}$$

Donde:

$A_{cmil}$  =Área sección transversal del conductor Circular en mils.

$T_m$  =Temperatura máxima permisible del conductor en °C (Se elige un alambre de cobre suave estándar con temperatura de 1083 °C).

$T_a$  =Temperatura ambiente en °C.

$I_G$  =Corriente máxima de corto circuito de la malla en fase – neutro.

$T_f$  =Tiempo de la en segundos.

**Tabla 11:**  
Temperatura de Fusión de Conductores más usados.

Descripción	Temperatura de fusión (0°C)
Alambre de cobre suave estándar	1083
Alambre de cobre duro comercial	1084
Cobre estañado con alma de acero	1084/1300
Cobre con alma de acero	1084/1300
Alambre de aluminio Comercial	657
Aluminio Aleación 5005	660
Aluminio Aleación 6201	660
Alambre de aluminio estañado con alma de acero	660/1300
Alambre de acero cubierto con Zinc	419/1300
Acero Inoxidable	1400

Fuente: (IEEE 80-STD, 2000).

$$A_{cmil} = \frac{19570.77}{\sqrt{\frac{\ln\left(\frac{1083 - 40}{234 + 40} + 1\right)}{33(0.3)}}} = 81614.5 \text{ cmil}$$

$$A_{mm^2} = 81614.5 \times (5.0671 \times 10^{-4} mm^2) = 41.35 mm^2$$

En la siguiente tabla se muestra el Calibre y su respectiva área.

**Tabla 12:**  
Calibres de conductores más Usados.

Calibre AWG o Kcmil	Área en "A" en mm <sup>2</sup>	Diámetro "d" en mm
8	8.4	3.27
6	13.3	4.12
4	21.2	5.2
2	33.6	6.54
1	42.4	7.35
1/0	53.5	8.25
2/0	67.4	9.26
3/0	85	10.4
4/0	107	11.67

Fuente: (IEEE 80-STD, 2000).

El área hallada  $41.35 mm^2$  se elige el mayor valor de la tabla de conductores (ver anexo 2) que sería un equivalente a  $42.4 mm^2$  la cual vendría a ser un calibre 1 en AWG, pero Según la norma IEEE

80-STD temas de resistencia mecánica corrosión conductibilidad y corrosión se elegirá el conductor de calibre 4/0 en AWG, con un área determinada que es  $107 \text{ mm}^2$  que también se encuentra dentro de la tabla de conductores desnudos.

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4(107)}{\pi}} = 11.67 \text{ mm}$$

### 2.3.1.3. Hallando la Longitud de Conductor de Malla.

$$L = \frac{K_m \times K_i \times \rho \times I_G \times \sqrt{T_f}}{116 + 0.174 C_s (h_s \times K) \rho_s}$$

Dónde:

- $\rho$  =Resistividad en terreno, será de 53 ohm – m.
- $\rho_s$  =Resistividad de la superficie, será de 2500 ohm – m.
- $I_G$  =Corriente máxima de corto circuito de la malla en fase– neutro es de 19570.77 A.
- $T_f$  =Tiempo de falla en s = 0.3 s.
- $K_m$  =Coeficiente que toma los datos de los conductores.
- $K_i$  =Factor de irregularidad de terreno.

El factor geométrico  $K_m$  de Sverak, se da por la siguiente formula:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D + 2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n - 1)} \right) \right]$$

Dónde:

- $D$  =Espacio entre conductores (no debe ser menor a 2.5), el cual es 8 m.
- $h$  =Profundidad de la malla  $m = 0.5 \text{ m}$ .
- $d$  = Diámetro de conductor desnudo en el calibre 4/0.
- $K_{ii}$  =Factor corrección,  $K_{ii} = 1$  que es considerado para los electrodos del perímetro.

- $K_h$  =Factor de corrección se relaciona con la profundidad de la malla:

Cálculo de  $K_{ii}$ :

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} = 1$$

Cálculo de  $K_h$ :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = \sqrt{1.5} = 1.2$$

Dónde:

- $h_0$  =profundidad de referencia de enterramiento de la red en  $m = 1.0 m$ .
- $n$  =número de conductores paralelos en una dirección los cuales son para el largo= $N_a$  y para el ancho= $N_b$ .
- $h_s$  =Espesor de la capa de grava triturada en  $m = 0.1 m$ .
- $K$  =Factor de reflexión entre las resistividades de los diferentes materiales, siendo:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

$$K = \frac{53 - 2500}{53 + 2500} = -0.958$$

**Nota:** Para la grava se da esta resistividad,  $\rho_s = 2500$  ohm-metro.

El Factor de reducción " $C_s$ " se da por:

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

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{53}{2500}\right)}{2 \times 0.2 + 0.09} = 0.87$$

El número aproximado de conductores paralelos ( $n$ ) basado en el lado más ancho de la red, resulta:

$$N_a = \frac{a}{e} + 1$$

$$N_a = \frac{80}{8} + 1 = 11$$

Finalmente, el factor geométrico " $K_m$ ", resulta ser:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{8^2}{16(0.5)(11.67 \times 10^{-3})} + \frac{(8 + 2(0.5))^2}{8(8)(11.67 \times 10^{-3})} - \frac{0.5}{4(11.67 \times 10^{-3})} \right) + \frac{1}{1.2} \ln \left( \frac{8}{\pi(2(11) - 1)} \right) \right] = 0.781$$

El factor de irregularidad del terreno " $K_i$ " resulta ser:

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

$$K_i = 0.644 + 0.148(11) = 2.27$$

Finalmente, la longitud del conductor se calcula como:

$$L = \frac{K_m \times K_i \times \rho \times I_G \times \sqrt{T_f}}{116 + 0.174 C_S (h_S \times K) \rho_S}$$

$$L = \frac{0.781 \times 2.27 \times 53 \times 1950.77 \times \sqrt{0.3}}{116 + (0.174 \times 0.9906 \times 2500)} = 1120m \approx 480 m$$

#### **2.3.1.4. Hallando las especificaciones de varillas (Electrodos) para la Malla**

Es difícil proporcionar una expresión generalizada para calcular el número requerido de varillas, pero se acepta la fórmula empírica siguiente:

$$N_V = 1.125 R_V$$

Dónde:

$N_V$  =Número de varillas.

$R_V$  =Resistencia de una varilla en  $\Omega$ .

$$R_V = \frac{\rho}{1.915 L_v} \times \ln\left(\frac{96 L_V}{d_V} - 1\right)$$

Dónde:

- $R_V$  = Resistencia de una varilla en  $\Omega$ .
- $\rho$  = Resistividad del terreno en  $\Omega \cdot m$ .
- $L_V$  = Longitud de la varilla en pies.
- $d_V$  = Diámetro de la varilla en pulgadas.

Para una varilla de copperweld de 3,05 m (10 pies) de longitud y 19 m (3/4 de pulgada) de diámetro.

$$R_V = \frac{53}{1.915(9.84)} \times \ln\left(\frac{96 (9.84)}{4.21} - 1\right) = 15 \Omega$$

$$N_V = 1.125(1) = 16.4 \approx 16 \text{ Varillas}$$

Para este diseño, por facilidad práctica se usarán en la periferia de la red de tierra 16 varillas de copperweld de 3.05 m de longitud y espesor mínimo del recubrimiento de 0.254 mm.

### 2.3.1.5. Material Total hallado para la utilización de conductores en la Malla.

Tabla 13:  
Cantidad de conductores para diseño.

Cantidad de Conductores	Metrado
11 conductores de 80 m	880 m
6 conductores de 40 m	240 m
16 varillas de 3 m	48 m
<b>total</b>	<b>1168 m</b>

Fuente: Propia

(IEEE80-STD, 2000), exige comprobar por calculo entonces, como se puede observar la longitud real de la red es mayor a la longitud calculada en los pasos anteriores; por lo cual se deduce que la red de puesta a tierra cumple y es apropiada para el nivel de corriente de falla.

### 2.3.1.6. Hallando la Resistencia de la Malla.

La resistencia de la red de tierra se calcula por medio de la expresión denominada “Expresión de Sverak”, que resulta ser válida para redes de tierra con profundidades de 0.25 a 2.5 m, siendo:

$$R_{TC} = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} + \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$
$$R_{TC} = \left[ \frac{1}{1168} + \frac{1}{\sqrt{20(40)(80)}} + \left( 1 + \frac{1}{1 + (0.5)\sqrt{\frac{20}{(40)(80)}}} \right) \right]$$
$$= 0.201 \Omega$$

Para evaluar la resistencia de la red de tierra se debe comparar el resultado anterior, con el valor deseado, que resulta de la expresión siguiente:

$$R_{TD} = \frac{EPR}{I_G}$$

Dónde:

- $R_{TD}$  =Valor deseado de resistencia a tierra en  $\Omega$ .
- $EPR$  =Elevación de potencial aceptable para la red en  $V$ .
- $I_G$  =Valor máximo de la corriente de cortocircuito de fase a tierra en  $A$ .

$$R_{TD} = \frac{10000}{19570.77} = 0.510 \Omega$$

Para que el diseño sea bueno en cuanto al valor de la resistencia eléctrica, se debe cumplir lo siguiente:

$$0.510 > 0.201$$

Dónde:

- $R_{TD}$  =Valor deseado de la resistencia de la red de tierra en  $\Omega$ .

- $R_{TC}$  =Valor calculado de la resistencia de la red de tierra en  $\Omega$ .

En este caso lo anterior se cumple de manera sobrada, ya que:

$$R_{TD} = 0.510 \Omega$$

$$R_{TC} = 0.201 \Omega$$

$$R_{TD} > R_{TC}$$

$$0.510 \Omega > 0.201 \Omega$$

### 2.3.1.7. Hallando la Tensión de Paso.

La tensión de paso de la red de tierra se da por la expresión siguiente:

$$E_{Paso} = \frac{\rho I_G K_S K_i}{L_S}$$

Dónde:

- $\rho$  =Resistividad del suelo en  $\Omega \cdot m = 53 \Omega \cdot m$ .
- $K_S$  =Es el factor de espacio y para profundidades de 0,25 a 2,5 m, se da como:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

- $K_i$  =es el factor de irregularidad del terreno, que se calcula como:

$$K_i = 0.644 + 0.148 n$$

El número efectivo de conductores paralelos de la red de tierra “n”, se calcula de una manera más exacta utilizando la expresión siguiente:

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d$$

$$N_a = \frac{2 \times L_C}{L_p} = \frac{2 \times 1120}{240} = 9.33$$

$$N_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{240}{4\sqrt{3200}}} = 1.03$$



- $n_c = 1$ , para malla rectangular.
- $n_d = 1$ , para malla rectangular.
- $L_C =$  longitud total del conductor de la red en  $m = 1120 m$ .
- $L_p =$  longitud del conductor de la periferia de la red en  $m = 240 m$ .
- $A =$  área que ocupará la red de tierra en  $m^2 = 3200 m^2$ .

Finalmente, el número efectivo de conductores paralelos de la red de tierra “ $n$ ”, resulta ser:

$$n = 9.33 \times 1.03 \times 1 \times 1 = 9.61 \approx 10$$

Finalmente, el factor de espacio “ $K_S$ ” para profundidades de la red de tierra de 0,25 a 2,5  $m$ , resulta ser:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{8+0.5} + \frac{1}{8} (1 - 0.5^{10-2}) \right] = 0.395$$

Finalmente, el factor de irregularidad del terreno, resulta ser como se indica:

$$K_i = 0,644 + 0,148 n$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 (10) = 2.124$$

Para redes de tierra con electrodos de tierra en la periferia, la longitud efectiva del conductor “ $L_S$ ” para calcular la tensión de paso, resulta ser:

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R$$

$$L_S = 0.75(1120) + 0.85(48) = 880.8 m$$

Dónde:

- $L_C =$  Longitud total del conductor de la red en  $m = 1120 m$ .
- $L_R =$  Longitud total de los electrodos a tierra en  $m = 48 m$ .

Finalmente, se calcula la tensión de paso de la red de tierra por la expresión siguiente:

$$E_{Paso} = \frac{\rho I_G K_S K_i}{L_S}$$

$$E_{Paso} = \frac{(53)(19570.77)(0.395)(2.124)}{880.8} = 988 V$$

La tensión de paso máxima tolerable por seguridad, se da por la expresión siguiente:

$$E_{ST\ 50Kg} = [1000 + 6C_S \times (h_S, K) \times \rho_S] \times \frac{0.116}{\sqrt{T_f}}$$

$$E_{ST\ 50Kg} = [1000 + (6 \times 0.87 \times (2500))] \times \frac{0.116}{\sqrt{0.3}} = 3604.97V$$

Para que el diseño del sistema de tierra sea bueno, se debe cumplir lo siguiente:

$$E_{ST} > E_S$$

Dónde:

- $E_{ST}$  =tensión de paso máxima tolerable por seguridad en  $V$ .
- $E_S$  =tensión de paso de la red de tierra en  $V$ .

En este caso lo anterior se cumple de manera sobrada, ya que:

$$E_{ST} = 3604.97V$$

$$E_S = 988 V$$

$$E_{ST} > E_S$$

$$3604.97V > 988 V$$

### **2.3.1.8. Hallando la Tensión de Toque.**

La tensión de toque de la red de tierra " $E_T$ " prácticamente representa la tensión de malla " $E_M$ ", que puede ocurrir en la red de tierra y se da por la expresión siguiente:

$$E_{Toque} = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M}$$

Dónde:

- $\rho$  =resistividad específica del suelo en  $\Omega \cdot m = 53 \Omega \cdot m$ .

El coeficiente “ $K_m$ ” se calcula de una manera más exacta considerando el nuevo valor de conductores paralelos “ $n$ ”, por la expresión siguiente:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{8^2}{16(0.5)(11.67 \times 10^{-3})} + \frac{(8+2(0.5))^2}{8(8)(11.67 \times 10^{-3})} - \frac{0.5}{4(11.67 \times 10^{-3})} \right) + \frac{1}{1.22} \ln \left( \frac{8}{\pi(2(10)-1)} \right) \right] = 0.79$$

El factor de irregularidad del terreno “ $K_i$ ” resulta ser:

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

$$K_i = 0.644 + 0.148(8) = 1.828$$

Para redes de tierra con electrodos en la periferia, la longitud efectiva de la red “ $L_m$ ”, se da por la expresión siguiente:

$$L_m = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \times L_R$$

Dónde:

- $L_C$  =Longitud total del conductor de la red de tierra en m = 1120 m.
- $L_r$  =Longitud de cada electrodo de tierra en m = 3 m.
- $L_R$  =Longitud total de los electrodos en m = 48 m.
- $L_x$  =Longitud de la red en la dirección “x” en m = 80 m.
- $L_y$  =Longitud de la red en la dirección “y” en m = 40 m.

Finalmente, la longitud efectiva de la red “ $L_m$ ” para calcular la tensión de contacto, resulta ser:

$$L_m = 1120 + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{3}{\sqrt{80^2 + 40^2}} \right) \right] \times 48 = 1196.36 m$$

Finalmente, la tensión de toque " $E_T$ ", que puede ocurrir en la red de tierra, se obtiene como:

$$E_{Toque} = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_m}$$

$$E_{Toque} = \frac{(33)(19570.77)(0.79)(1.828)}{1196.36} = 779.58 V$$

La tensión de toque máxima tolerable por seguridad " $E_{TT}$ ", se da por la expresión siguiente:

$$E_{TT} = [1000 + 1.5C_S \times (h_S, K) \times \rho_S] \times \frac{0.116}{\sqrt{T_f}}$$

$$E_{TT} = [1000 + (1.5 \times 0.87 \times 2500)] \times \frac{0.116}{\sqrt{3}} = 942.74 V$$

Para que el diseño del sistema de tierra sea bueno, se debe cumplir lo siguiente:

$$E_{TT} > E_{Toque}$$

- $E_{TT}$  =Tensión de toque máxima tolerable por seguridad en  $V$ .
- $E_{Toque}$  =Tensión de toque de la red de tierra o tensión de malla en  $V$ .

$$E_{TT} = 942.74 V$$

$$E_{Toque} = 779.58 V$$

$$E_{TT} > E_{Toque}$$

$$942.74 V > 779.58 V$$

### 2.3.2. Diseño Asistido por el Software CYMEGROUND para un Sistema de Puesta a Tierra de una Subestación.

El diseño de un SPAT es de vital importancia porque este es el encargado de brindar la seguridad necesaria de protección para las personas y equipos, por ende, nos vemos en la necesidad de conocer los criterios necesarios para poder dar un servicio de calidad, estos

cálculos se pueden realizar de una manera calculada a través de la norma (IEEE80-STD, 2000), que nos brinda el proceso detallado de cálculo de puesta a tierra.

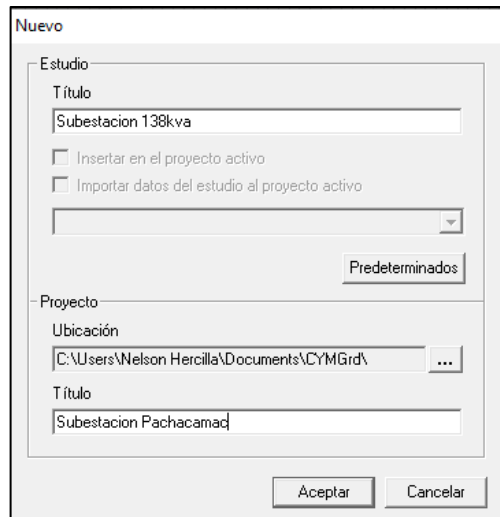
La tecnología en este tiempo se acrecienta a pasos gigantes en cuanto a softwares se refiere y nos brinda facilidades para poder realizar los cálculos y diseño de una manera más confiable y acreditada en el diseño de mallas a tierra. En este trabajo se realizó en el programa llamado CYMEGROUND, que le pertenece a la Empresa CYME que brinda y provee a apoyo a todo el sector eléctrico.

Para poder iniciar con el programa CYMEGROUND solo se necesita una breve capacitación para poder saber cuáles son sus funciones y donde se ubican los parámetros a colocar, está libre de cálculos ya que esta lo realiza por uno y nos brinda una gran confiabilidad en cuanto a su exactitud de respuesta. En este programa se puede modelar múltiples configuraciones de mallas dándonos respuestas al instante de si es viable para poder garantizar la mejor configuración de malla en un sistema de puesta a tierra.

Se pasará a exponer los pasos a seguir de cómo se usó el programa, es bueno tener en consideración de ya tener una noción de cómo es que se quiere el diseño de malla para poder comprobarlo en programa si es apropiada para la corriente de falla con respecto a el tiempo de su liberación y la resistividad de la tierra.

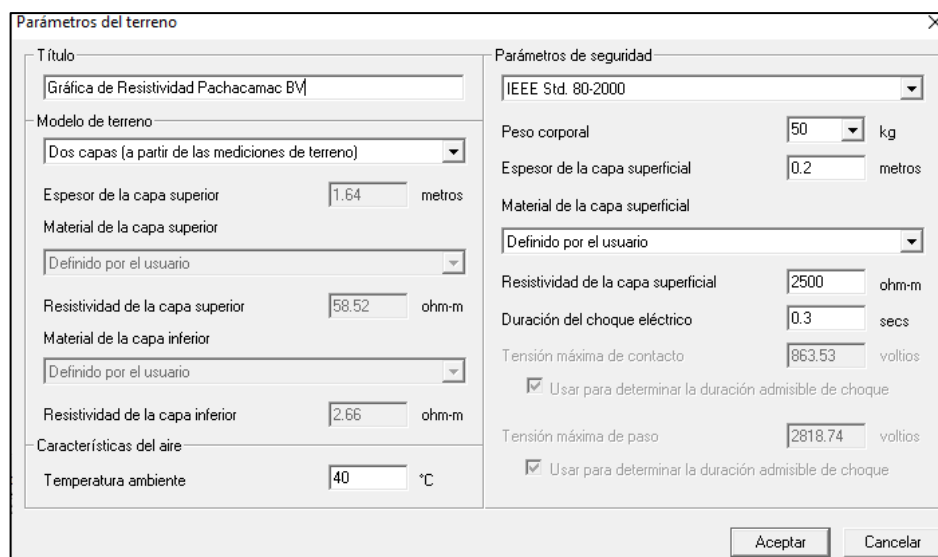
#### **2.3.2.1. Datos de parámetros del estudio de suelo en CYMEGROUND.**

Al iniciar se debe colocar datos generales como son el nombre del proyecto y título del área de malla en donde se va a Estudiar.



**Figura 23:** Designación de Nombre de proyecto en el software.  
Fuente: (Propia).

Después pasa a colocar los datos de los parámetros de suelo donde se pondrá la resistividad superficial del suelo, que tipo de material es con su determinado espesor, y en tiempo de la duración del choque eléctrico, en cuanto a los parámetros de seguridad el programa se guía por los parámetros de la norma (IEEE80-STD, 2000).



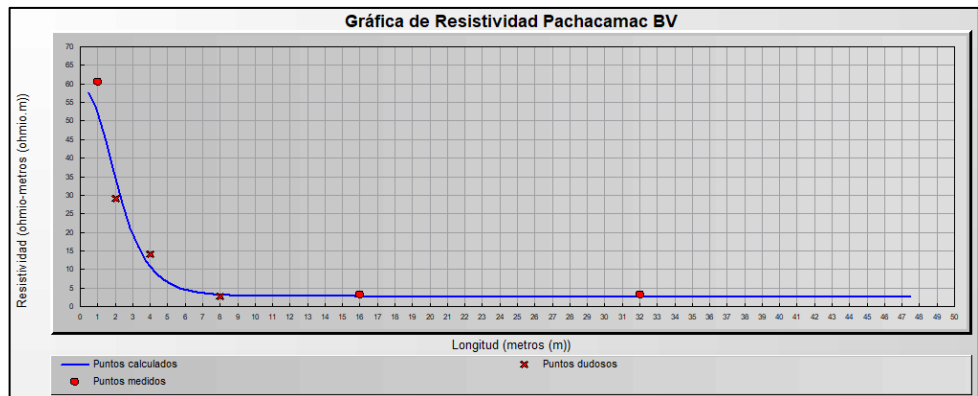
**Figura 24:** Designación de los parámetros del terreno y de seguridad en Software.  
Fuente: (Propia).

La medición de resistividad del suelo halladas en el área donde se propone realizar la malla de puesta a tierra es colocada en el

programa la cual nos brinda un estudio de suelo y no brinda la gráfica.

	Activado	Distancia entre las sondas (m)	Resistividad (ohm-m)
1	✓	1	60.4
2	✓	2	29
3	✓	4	14
4	✓	8	2.6
5	✓	16	3.1
6	✓	32	3
7	✓		

**Figura 25:** Distanciamientos y Resistividad Obtenida.  
Fuente: (Propia).



**Figura 26:** gráfica de resistividad vs longitud.  
Fuente: (Propia).

**Tabla 14:**  
Descripción de Parámetros de Seguridad.

Título	
Modelo de suelo	Estratificado en 2 capas
Modelo seguritario	IEEE STD. 80-2000
Peso corporal	50 kg
Espesor de la capa superficial	0.2 m
Resistividad de la capa superficial	2500 ohm-m
Duración del choque eléctrico	0.3 s

Fuente: (Propia).

**Tabla 15:**  
Resultados de Salida de estudio de Suelo.

Resultados de salida	
Espesor de la capa superior	1.64 m
Resistividad de la capa superior	58.52 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	2.66 ohm-m
Factor Cs de reducción	0.820626

**Tabla 15:**  
Resultados de Salida de estudio de Suelo.

<b>Resultados de salida</b>	
Tensión máxima de contacto	863.53 V
Tensión máxima de paso	2818.74 V
Error RMS	17.43 %

Fuente: (Propia).

El programa también nos brinda unos valores más exactos de cada espaciamento extrapolados atreves de los distintos espaciamientos de la última medición realizada del espaciamento más amplio.

Después se procede a colocar los datos de la barra de entrada de los cuales pondremos la corriente de falla y el tiempo de liberación de esta, estos datos servirán para que el programa pueda brindar los reportes de perfiles de tensión que nos arrojará de acuerdo al diseño de la malla realizada.

	Activado	Nombre de la barra	Corriente de falla LG (amps)	Duración de la falla (segs.)	Contribución telemantada (%)	LG X/R	Rtg (ohms)	Líneas de transmisión	Rdg (ohms)	Líneas de distribución
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Buena Vista	19570	0.3	100	10	100	1	200	1
2	<input checked="" type="checkbox"/>									

**Figura 27:** Datos de la barra en subestación.  
Fuente: (Propia).

### **2.3.2.2. Selección de tipo de conductor y varilla.**

En esta sección el programa nos muestra una amplia gama de conductores y tipos de electrodos con sus respectivos tipos de materiales, tipo de conductividad que tienen, etc.



La cual se seleccionarán todas para después poder usarlas en la malla.

	Activado	Tipo	Material	Conductividad	Factor Alfa (1/C°)	Pr (µohm-m)	TCAP (J/cm3-°C)	Tm
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Conductor	Copper anne	100	0.00393	1.72	3.42	1083
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Conductor	Copper com	97	0.00381	1.78	3.42	1084
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Conductor	Copper_clad	40	0.00378	4.4	3.85	1084
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Conductor	Copper_clad	30	0.00378	5.86	3.85	1084
5	<input checked="" type="checkbox"/>	Conductor	Aluminum EC	61	0.00403	2.86	2.56	657
6	<input checked="" type="checkbox"/>	Conductor	Aluminum 50	53.5	0.00353	3.22	2.6	652
7	<input checked="" type="checkbox"/>	Conductor	Aluminum 62	52.5	0.00347	3.28	2.6	654
8	<input checked="" type="checkbox"/>	Conductor	Aluminum_cl	20.3	0.0036	8.48	3.58	657
9	<input checked="" type="checkbox"/>	Rod	Copper_clad	20	0.00378	8.62	3.85	1084
10	<input checked="" type="checkbox"/>	Rod	Aluminum EC	61	0.00403	2.86	2.56	657
11	<input checked="" type="checkbox"/>	Rod	Aluminum 50	53.5	0.00353	3.22	2.6	652
12	<input checked="" type="checkbox"/>	Rod	Aluminum 62	52.5	0.00347	3.28	2.6	654
13	<input checked="" type="checkbox"/>	Rod	Steel 1020	10.8	0.0016	15.9	3.28	1510
14	<input checked="" type="checkbox"/>	Rod	Stainless cla	9.8	0.0016	17.5	4.44	1400
15	<input checked="" type="checkbox"/>	Rod	Zinc-coated	8.6	0.0032	20.1	3.93	419
16	<input checked="" type="checkbox"/>	Rod	Stainless ste	2.4	0.0013	72	4.03	1400

Mediciones del suelo \ Barras \ Electrodos \ Conductores asimétricos \ Conductores simétricos \ Conductores

Análisis del suelo \ Dimensionamiento del electrodo \ Análisis de la malla \ Reporte /

**Figura 28:** Variedad de Conductores y varillas en Software.

Fuente: (Propia).

El programa nos brinda un reporte que es sobre el dimensionamiento del electrodo con los datos siguientes:

**Tabla 16:**

Parámetro de Barra.

**Parámetros**

Nombre de la barra	PRINCIPAL
Corriente de falla LG	19 570 A
Duración de la falla	0.3 seg
Temperatura ambiente	40 °C

Fuente: (Propia).

**Tabla 17:**

Factor de Decremento.

**Resultados de salida**

Factor de decremento	1.04327
----------------------	---------

Fuente: (Propia).

El programa nos muestra un listado de conductores y electrodos con el dimensionamiento mínimo que se debe utilizar para la malla requerida. Que se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 18:**

Conductos utilizados por norma IEEE 80.

	Conductividad	Tm	Kf	Área	Calibre nominal
Material	(%)	(°C)		(mm <sup>2</sup> )	
Copper anneal soft-drawn	100	1083	7.00693	17.7484	2/0AWG
Copper commercial hard-drawn	97	1084	7.06809	17.9033	2/0AWG
Copper_clad steel wire 40%	40	1084	10.4519	26.4746	7/#8
Copper_clad steel wire 30%	30	1084	12.062	30.5528	7/#8
Aluminum EC Grade	61	657	12.1204	30.7008	2/0AWG
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652	12.4188	31.4567	2/0AWG
Aluminum 6201 Alloy	52.5	654	12.4752	31.5995	2/0AWG
Aluminum_clad steel wire	20.3	657	17.2066	43.5839	7/#8

Fuente: (Propia).

#### Dimensionamiento del conductor (mínimo requerido)

Material	Conductividad (%)	Tm (°C)	Kf	Área (mm <sup>2</sup> )	Calibre nominal
Copper anneal soft-drawn	100	1083	7.00693	39.6956	2/0AWG

#### Dimensionamiento de la varilla de tierra (mínimo requerido)

Material	Conductividad (%)	Tm (°C)	Kf	Diámetro (mm)	Calibre nominal
Copper_clad steel 20%	20	1084	14.6293	10.2725	1/2"

**Figura 29:** Dimensionamiento de varillas y conductores.

Fuente: (Propia).

### 2.3.2.3. Diseño de la Malla del Puesta a Tierra.

Después de seleccionar los tipos de conductores y varillas (electrodo), se procede a realizar el diseño de malla donde se deben utilizar coordenadas en su sistema tridimensional donde se hallan los Ejes X, Y, Z. Existen dos tipos de introducción de datos los cuales son llamados simétricos y asimétricos. Cuando los electrodos o los conductores son simétricos es porque tienen en mismo espaciamiento se procede a colocar solo un valor el cual los duplicará y se realizará de una forma más fácil y rápida el dimensionamiento de la malla, para este caso se realizará una malla asimétrica, donde se tomarán algunos puntos los cuales solo se desean ser tomados por ya tener una malla deseada.

En la figura siguiente nos muestra como son introducidas la condena para poder formar la malla con respecto a los conductores.

	Activado	Tipo	X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Conductores de la malla paralelos a X	Elementos por conductor paralelos a X	Conductores de la malla paralelos a Y	Elementos por conductor paralelos a Y	Profundidad (m)	Material	Tamaño	Diámetro (mm)
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	0	0	80	40	6	6	11	11	0.5	Copper an	4/0AWG	13.462
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario										Elegir		

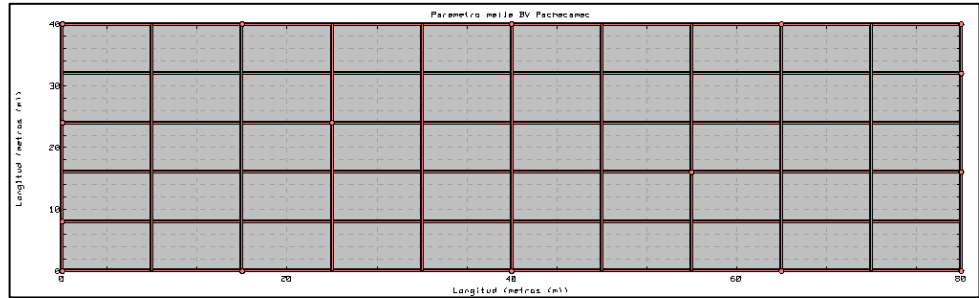
**Figura 30:** Distribución Simétrica de conductores en malla.  
Fuente: (Propia).

Una vez terminado el diseño de los conductores se procede al diseño de las varillas, como ya se hablo se elige si es simetrico o asimetrico, como en nuestro caso solo se quiero tomar agunos puntos donde estaran las varillas de electrodo pondremos los datos en las opcion asimetrica. Toda esta tabla está basada en un sistema de cordenas la cuales se debe llenar todas porque sino el programa lo va a tomar como error o lo va asumir en algun punto exidistate el cual no nos dará el resultado deseado.

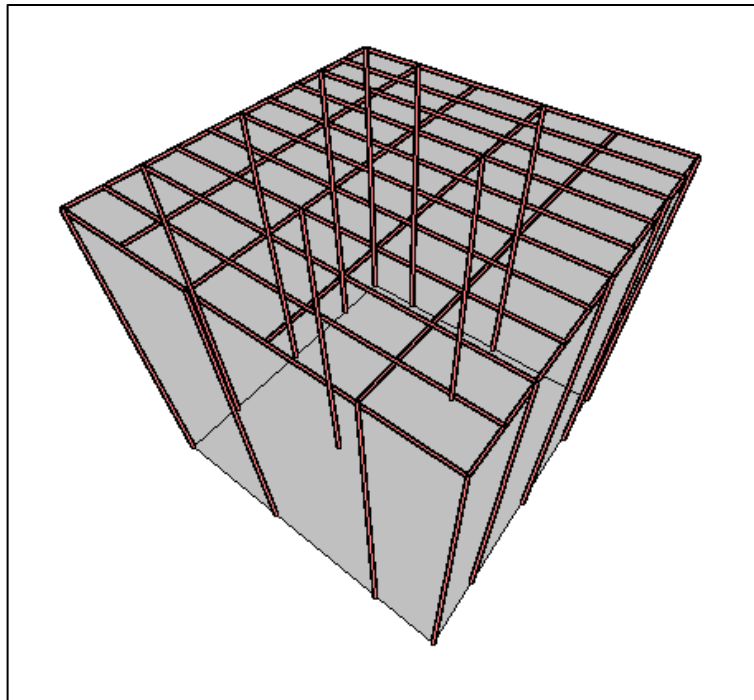
	Activado	Tipo	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Número de varillas de tierra a lo largo del eje	Elementos por varilla en la capa superior de suelo	Elementos por varilla en la capa inferior de suelo	Longitud (m)	Material	Tamaño
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	0	0	0.5	0	0	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	16	0	0.5	16	0	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	40	0	0.5	40	0	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	64	0	0.5	64	0	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
5	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	80	0	0.5	80	0	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
6	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	0	8	0.5	0	8	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
7	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	56	16	0.5	56	16	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
8	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	80	16	0.5	80	16	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
9	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	0	24	0.5	0	24	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
10	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	24	24	0.5	24	24	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
11	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	80	32	0.5	80	32	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
12	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	0	40	0.5	0	40	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
13	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	16	40	0.5	16	40	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
14	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	40	40	0.5	40	40	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
15	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	64	40	0.5	64	40	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
16	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario	80	40	0.5	80	40	3.5	1	1	1	3	Copper_cl	5/8"
17	<input checked="" type="checkbox"/>	Primario											Elegir	

**Figura 31:** Distribución de las varillas (Electrodos) asimétricas.  
Fuente: (Propia).

Después del realizar el respectivo ingreso de datos de los conductores y las varillas, el programa tiene por defecto una gama amplia, mostrándonos como se ve el diseño de nuestra malla en 2D y 3D, la cual nos dará la idea de cómo es que está distribuido nuestros electrodos y conductores dados en metros.



**Figura 32:** Vista de planta de Modelado de Malla.  
Fuente: (Propia).



**Figura 33:** Vista en 3D de modelo de Malla.  
Fuente: (Propia).

#### **2.3.2.4. Estudio de Malla.**

Cuando se termina de colocar todos los datos implicados se da en el botón ejecutar el cual nos brindará un informe de análisis del diseño de la malla en donde esta nos dará los cálculos de las dimensiones físicas y también de los datos eléctricos.

**Tabla 19:**  
Parámetros definidos por usuario.

<b>Parámetros</b>	
Spec. Z paralelo equivalente	Z infinito

**Tabla 19:**  
Parámetros definidos por usuario.

<b>Parámetros</b>	
Frecuencia nominal	60 Hz
Nombre de la barra	PRINCIPAL
Corriente de falla LG	19 570 A
Contribución a distancia	100%
Espesor de la capa superior	1.64 m
Resistividad de la capa superior	58.52 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	2.66 ohm-m

Fuente: (Propia).

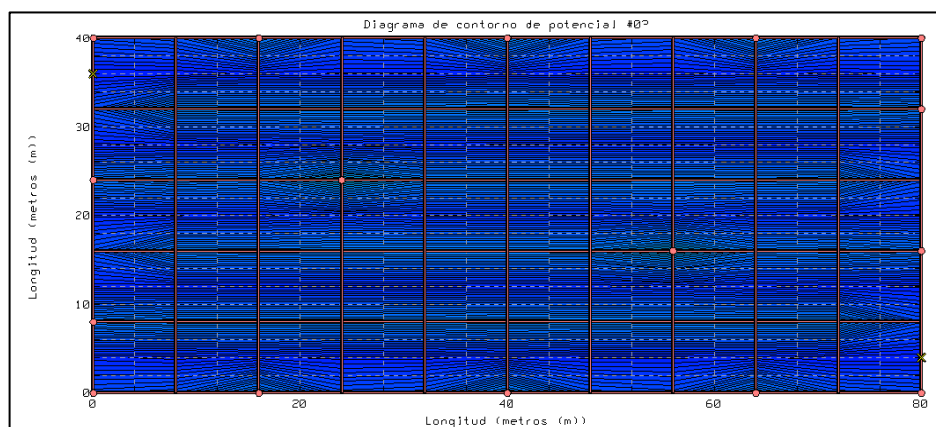
**Tabla 20:**  
Potencial de Tierra.

<b>Resultados de salida</b>	
Elevación del potencial de tierra	1119.17 V
Resistencia de tierra calculada	0.0548164 ohm
Impedancia equivalente	0.0548161 ohm
Longitud total de los conductores primarios	920 m
Longitud total de las varillas primarias	48 m
Número total de elementos	189

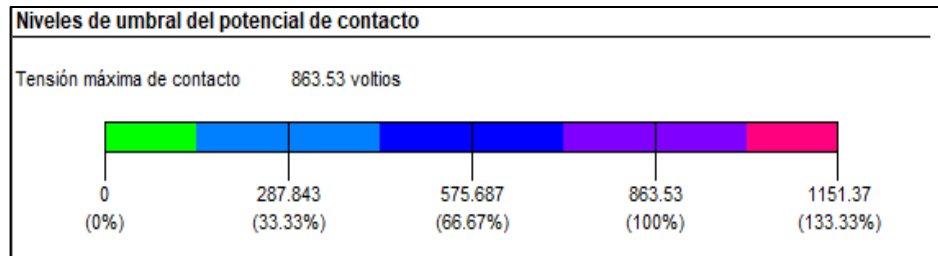
Fuente: (propia).

### 2.3.2.5. Contorno de Potencial.

El programa también nos brinda un diagrama de contorno el cual nos muestra como es la distribución de seguridad en la malla a través de colores en los cuales se ve si la tensión de contorno y de contacto está dentro de los límites de seguridad.



**Figura 34:** Diagrama de Contorno de Potencial.  
Fuente: (Propia).



**Figura 35:** Niveles de umbral del Potencial de Contacto.  
Fuente: (Propia).

**Tabla 21:**  
Parámetros de diagrama de contorno de Potencial.

<b>Parámetros</b>	
Título	Diagrama de Contorno de Potencial
Nombre de la barra	PRINCIPAL
Corriente de falla LG	19 570 A
Contribución a distancia	100%
Corriente del electrodo de retorno	0A
Espesor de la capa superior	1.64 m
Resistividad de la capa superior	58.52 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	2.66 ohm-m
Potenciales iguales (distintos)	Sí

Fuente: (Propia).

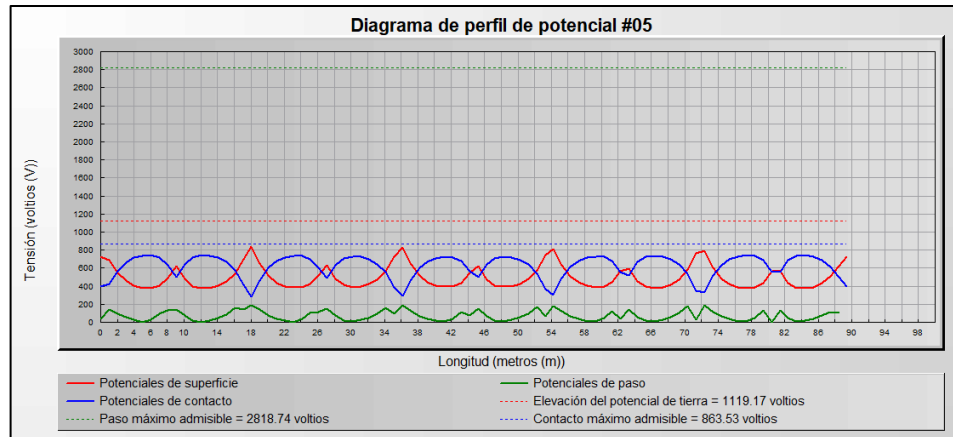
**Tabla 22:**  
Tensión máxima de contacto por software.

X1	0 m
Y1	0 m
X2	80 m
Y2	40 m
Intervalos X	10
Intervalos Y	10
Tensión máxima de contacto	863.53 V
Máximo Potencial de contacto en los puntos	501.949 V
Corriente LT Permitida	33 667.1 A
X (metros)	Y (metros)
0	36
80	4

Fuente: (Propia).

Del Diagrama mostrado se observa que no existen un punto de la red exista una máxima tensión de contacto, malla o de toque, por esto se puede afirmar que la malla es segura para el trabajo o pase de cualquier persona que transite por esa zona.

### 2.3.2.6. Perfil de Potencial.



**Figura 36:** Diagrama de Perfil de potencial.  
Fuente: (Propia).

**Tabla 23:**  
Potenciales de Contacto.

<b>Niveles de umbral del potencial de contacto</b>	
Elevación del potencial de tierra	1119.17 V
Tensión máxima de paso	2818.74 V
Tensión máxima de contacto	863.53 V

Fuente: (Propia).

**Tabla 24:**  
Potenciales Máximos admisibles.

<b>Máximo</b>	
Potenciales de superficie	840.61 V
Potenciales de paso	191.36 V
Potenciales de contacto	745.224 V

Fuente: (Propia).

Para finalizar como se ve en la imagen y en los datos finales hallados, todos los potenciales que se vayan a generar por el diseño de nuestra malla se encuentran por debajo de los máximos permisibles, por este motivo podemos decir que se logró obtener un diseño que cumple con la máxima seguridad ante las personas.

## 2.4. Resultados

Para el diseño de un sistema de puesta a tierra para una subestación de 10000kva se tienen los siguientes resultados:

### 2.4.1. Diseño Asistido del Sistema Puesta a Tierra.

Para el diseño de nuestra malla se basan en los resultados obtenidos en la resistencia de la malla y el potencial de toque y paso que se obtengan para saber si es funcional.

En cuanto a los resultados obtenidos hallados son los siguientes:

Resultados de resistencia de la malla:  $0.510 \Omega > 0.054 \Omega$

Resultados de Potencial y toque:  $E_{ST} > E_{Paso} = 3604.97V > 988 V$

Los cuales son resultados óptimos para la ejecución de la malla.

En cuanto a los resultados obtenidos por el programa asistidos son los siguientes:

Resultados de resistencia de la malla:  $0.510 \Omega > 0.054 \Omega$

Resultados de Potencial y toque:  $E_{ST} > E_{Paso} = 2818.74 V > 191.36 V$

Para realizar los cálculos se debe tener una malla pre diseñada y corroborar mediante este si es viable para después poder ejecutarlo con certeza. En ambos resultados nos brindan resultados favorables y óptimos para la realización de nuestra malla a tierra.

La diferencia de nuestro programa asistido destaca por lo siguiente:

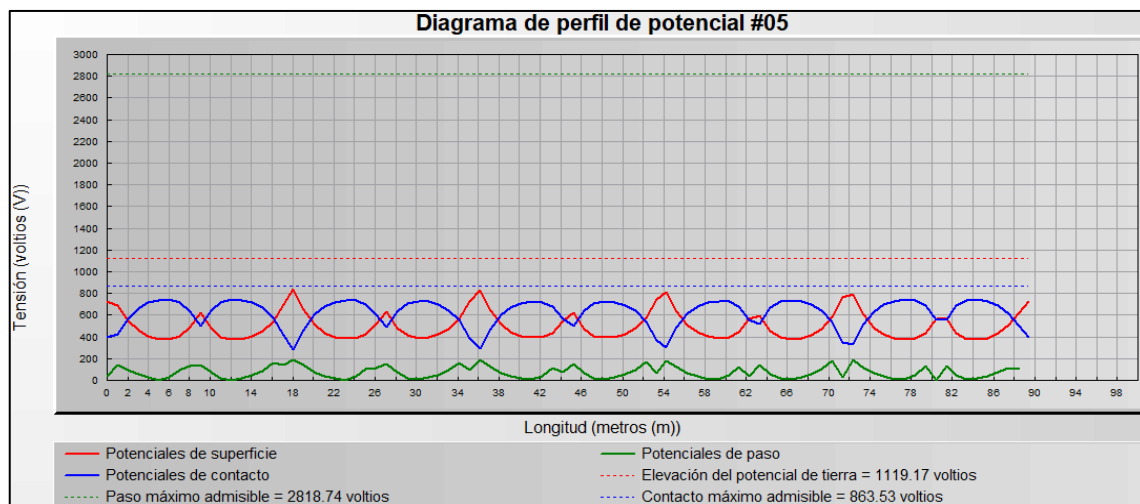


Figura 37: Potenciales en el terreno.

Fuente: (Propia).



En la siguiente grafica nos muestra los potenciales de superficie, paso y toque admisible de toda la malla para poder tener certeza de que nuestra malla es correcta, la cual, si en alguna parte de nuestra malla hubiera un potencial elevado, se puede corregir rápidamente modelando en nuestro software, corrigiendo ese punto de falla en nuestro pre diseño.

#### 2.4.2. Resistencia del Sistema de Puesta a Tierra.

(IEEE80-STD, 2000), nos dice para que nuestro sistema de puesta a tierra sea valido se debe cumplir lo siguiente:

$$R_{TD} > R_{TC}$$

Donde:

$R_{TD}$  =Valor deseado de la resistencia de la red de tierra en  $\Omega$ .

$R_{TC}$  =Valor calculado de la resistencia de la red de tierra en  $\Omega$ .

En nuestro caso para el  $R_{TC}$  se da con la siguiente formula, dándonos el siguiente valor:

$$R_{TC} = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} + \left( 1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] = 0.201 \Omega$$

Y para el caso del  $R_{TD}$  se da con la siguiente formula, dándonos el siguiente valor:

$$R_{TD} = \frac{EPR}{I_G} = 0.510 \Omega$$

De acuerdo a lo mencionado la expresión quedaría de esta manera:

$$0.510 \Omega > 0.201 \Omega$$

En cuando a la asistencia por el programa para el  $R_{TC}$  nos brinda el siguiente valor:

$$R_{TC} = 0.0548164 \text{ ohm}$$

El cual también estaría cumpliendo en la siguiente expresión

$$0.510 \Omega > 0.054 \Omega$$

El programa tanto como el calculo realizado nos dan resultados positivos para saber si nuestra resistencia obtenida es validad antes de poder ejecutar nuestra malla en campo.

### 2.4.3. Conductores Obtenidos.

Para hallar la longitud del conductor de la malla se da por la siguiente expresi3n, d3ndonos el siguiente valor:

$$L = \frac{K_m \times K_i \times \rho \times I_G \times \sqrt{T_f}}{116 + 0.174 C_S (h_S \times K) \rho_S} = 480 \text{ m}$$

Para hallar el conductor de la malla se da por la siguiente expresi3n, d3ndonos el siguiente valor:

$$N_V = \frac{\rho}{1.915 L_v} \times \ln \left( \frac{96 L_V}{d_v} - 1 \right) \times 1.125 R_V = 16 \text{ Varillas}$$

Se debe recalcar que para la cuantificaci3n proporcional de cuantos conductores y varillas deber3a tener la malla se toma como referencia las formulas usadas, mas no es una cifra exacta la cual deber3a tener nuestro poso a tierra.

Se lleg3 a determinar a determinar la siguiente cantidad de conductores y varillas:

**Tabla 25:**  
Cantidad de conductores para dise1o.

<b>Cantidad de Conductores</b>	<b>Metrado</b>
11 conductores de 80 m	880 m
6 conductores de 40 m	240 m
16 varillas de 3 m	48 m
<b>total</b>	<b>1168 m</b>

Fuente: Propia

En nuestra tabla mostrada se observa una sobredimensionada cantidad de conductores y varillas por el motivo de que es dif3cil cuantificar cuantas varillas deber3a tener nuestra malla a tierra.

Nuestro programa CYMEGROUND no cuenta con capacidad para darnos la cantidad de cuantas varillas y conductores deberíamos tener ya que es un programa el cual nos modela una malla a tierra a partir de un diseño ya diseñado y también porque no existe porque todo se basa en el lugar y el área que nos puedan proporcionar para poder realizar nuestro sistema de puesta a tierra. Lo que si nos puede asegurar nuestro programa es si realmente es viable la cantidad puesta mediante los resultados obtenidos en las resistencias de la malla y los resultados obtenidos en el potencial de toque y paso.

#### 2.4.4. Tensiones de Toque y Paso Obtenidos.

(IEEE80-STD, 2000), Para que pueda cumplir nuestro potencial de paso se debe cumplir la siguiente expresión:

$$E_{ST} > E_{Paso}$$

Dónde:

- $E_{ST}$  =tensión de paso máxima tolerable por seguridad en  $V$ .
- $E_{Paso}$  =tensión de paso de la red de tierra en  $V$ .

Para la tensión de paso de la red se da por la siguiente expresión, teniendo como resultado lo siguiente:

$$E_{Paso} = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} = 988 V$$

Para la tensión de paso máximo admisible por seguridad se da por la siguiente expresión, teniendo como resultado lo siguiente:

$$E_{ST\ 50Kg} = [1000 + 6C_S \times (h_S, K) \times \rho_S] \times \frac{0.116}{\sqrt{T_f}} = 3604.97V$$

Donde la expresión para cumplir por norma con los datos hallados sería la siguiente:

$$3604.97V > 988 V$$

(IEEE80-STD, 2000), Para que pueda cumplir nuestro potencial de toque se debe cumplir la siguiente expresión:

$$E_{TT} > E_{Toque}$$

Donde:

- $E_{TT}$  =Tensión de toque máxima tolerable por seguridad en  $V$ .
- $E_{Toque}$  =Tensión de toque de la red de tierra o tensión de malla en  $V$ .

Para la tensión de toque de la red se da por la siguiente expresión, teniendo como resultado lo siguiente:

$$E_{Toque} = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_m} = 779.58 V$$

Para la tensión de paso máximo admisible por seguridad se da por la siguiente expresión, teniendo como resultado lo siguiente:

$$E_{TT} = [1000 + 1.5C_S \times (h_s, K) \times \rho_S] \times \frac{0.116}{\sqrt{T_f}} = 942.74 V$$

Donde la expresión para cumplir por norma con los datos hallados sería la siguiente:

$$942.74 V > 779.58 V$$

En nuestro programa asistido se tubo los siguientes resultados:

Se llego a determinar el potencial de toque y paso las cuales son:

**Tabla 26:**

Resultados de potencial de contactor con el Software.

Parámetro	Siglas	Resultado
Voltaje de paso	$E_S$	191.36 V
voltaje de Toque	$E_T$	745.224 V

Fuente: (Propia).

En tensión de paso se tiene:

$$2818.74 V > 191.36 V$$

En tensión de Toque se tiene:

$$2863.53 V > 745.224 V$$

En nuestros resultados obtenidos en el calculo y por el software son similares y cumplen con la regla de la norma.

El programa destaca porque nos brinda la facilidad de poder obtener el valor de potencial en cualquier parte de nuestra malla.

## CONCLUSIONES

- Se concluye que se logró determinar una buena configuración en el diseño de malla de puesta a tierra con la ayuda asistida por el software CYMEGROUND, el cual nos indica a través de la gráfica que en toda la malla no existen potenciales elevados que puedan afectar a la persona en caso de fallo.
- Se concluye de igual forma que se logró determinar la mínima resistencia de un sistema de puesta a tierra para la subestación en Pachacamac de 1000KVA con la asistencia de programa.
- Se llegó a determinar la cantidad de conductores y varillas que es un total de 1168 *m* la cual se sobredimensiono para obtener mejores resultados en la obtención de la resistencia.
- Se concluye por último que se llegó a obtener los valores deseados de potencial de toque en 745.224 V y paso en 191.36 V, los cuales se encuentran por debajo del lumbral de contacto descrito por la norma (IEEE80-STD, 2000), lo que nos permitirá una protección adecuada para el personal, evitando la fibrilación ventricular del corazón. El programa nos corroboró que los valores están dentro de los parámetros de seguridad.

## RECOMENDACIONES

- Para poder realizar un diseño de malla de puesta a tierra se debe tener en consideración la distancia de los conductores que no deben ser menores a su tamaño, las retículas no deben ser menor a 2.5m y realizar siempre las uniones con soldadura exotérmica las cual nos brindara una unión perfecta evitando realizar mantenimientos innecesarios.
- Para obtener una resistencia aceptable, primero se debe de realizar el estudio de suelo el cual es ver todas las posibles causas de cambios climatológicos, a partir de eso se pueden utilizar el tratamiento químico, cemento conductivo y cuando hay demasiada lluvia o sequia ponerles una capa de cemento para evitar que se moje demasiado o se seque.
- Se recomienda después de hallar el cálculo de conductores y varillas, sobredimensionarlo al menos un 15% de lo hallado para obtener mejores resultados.
- Se debe considerar siempre que el potencial de Toque debe ser el menor ya que este es el que brinda una mayor diferencia de potencial.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arcgis, & Ubicación-Proyecto. (2020). *google*. Obtenido de <https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=bb1c588095c8457faa83ad1ecacf982a>
- Astudillo, C., & Cajamarca, M. (2012). Calculo de Sistemas de puesta a tierra aplicación de la norma IEEE 80-2000. *pre grado*. Universidad de Cuenca, Cuenca-Ecuador.
- Bustamante, J. (2011). Evaluación y Diagnostico de la malla de puesta a tierra de la subestación obrapía con niveles de tensión de 69Kv y 13.8Kv cumplido por la norma IEEE 80-STD. *Pre grado*. Universidad Politecnica Salesiana, Cuenca-Ecuador.
- CNE-Suministro, S. 3. (2001). Métodos de Puesta a Tierra para Instalaciones de Suministro Eléctrico y Comunicaciones. Lima - Perú: Código Nacional de Electricidad-Suministro.
- CNE-Utilización, S. 0. (2006). Puesta a Tierra y Enlace Equipotencial. Lima - Perú: Código Nacional de Electricidad Utilización.
- García, R. (1999). *La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas*. Barcelona - España: Marcombo.
- IEEE80-STD. (2000). Guía para la Seguridad de puesta a tierra en Subestaciones de Corriente Alterna. *Norma Internacional Americana*. New York, Estados Unidos: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
- IEEE81-STD. (2012). Guía para medir la resistividad de la tierra, Impedancia de tierra y potenciales de la superficie de la tierra de una conexión a tierra. New York, Estados Unidos: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
- IEEE-837. (2014). Estándar para la Calificación de Conexiones Permanentes Utilizadas en la puesta a tierra de Subestaciones. New York, Estados Unidos: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
- Kindermann, G., & Campagnolo, J. (2010). *Aterramiento Eléctrico*. Lima - Perú: Geraldo Kindermann.
- Manani, C. (2013). Sistema de Puesta a tierra y protección equipotencial para sistemas de cómputo. *Pre grado*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo - Perú.
- Medina, J. (2009). Estudio y evaluación de la malla de puestas a tierra existe en la subestación caja seca 115/34.5/13.8Kv utilizando como herramienta el software cymgrd. *pre grados*. Universidad de los Andes, Mérida- México.
- Moreno, J. (1991). *Instalaciones de puesta a tierra en centros de transformación*. Malaga: Moreno.



- Mosquera, R., & Giraldo, J. (2014). Inspección de los sistemas de puesta a tierra de las instalaciones del instituto técnico superior de Pereira. *Pre Grado*. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira-Colombia.
- NFR-011-CFE. (2004). Sistema de Tierra para Plantas y Subestaciones Electricas. Obtenido de [https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pea0NRF\\_011\\_Sistema\\_de\\_Tierra\\_Plantas\\_y\\_Subestaciones.pdf](https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pea0NRF_011_Sistema_de_Tierra_Plantas_y_Subestaciones.pdf)
- NTP-370.053. (1999). Seguridad Eléctrica. Elección de los materiales Eléctricos en las Instalaciones para Puesta a Tierra. Conductores de Protección de Cobre. Lima - Perú: Norma Técnica Peruana.
- NTP-370.056. (1999). Seguridad Eléctrica. Electroodos de Cobre para Puesta a Tierra. Lima - Perú: Norma Técnica Peruana.
- Quispe, R., & Gutierrez, Y. (2018). Diseño e implementación de diferentes sistemas de puesta a tierra para los laboratorios de ingeniería mecánica eléctrica de la UNA-Puno. *Pre grado*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Perú.
- RETIE-Artículo15. (2013). Sistemas de Puesta a Tierra. Colombia: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.
- Toledano, J., & Martinez, J. (2004). *Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas*. Madrid - España: Parinfo.
- Vazquez, E. (2016). Diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica mediante dos metodologías. *pre grado*. Escuela superior de Ingenieria, Ciudad de México.

## **ANEXOS**

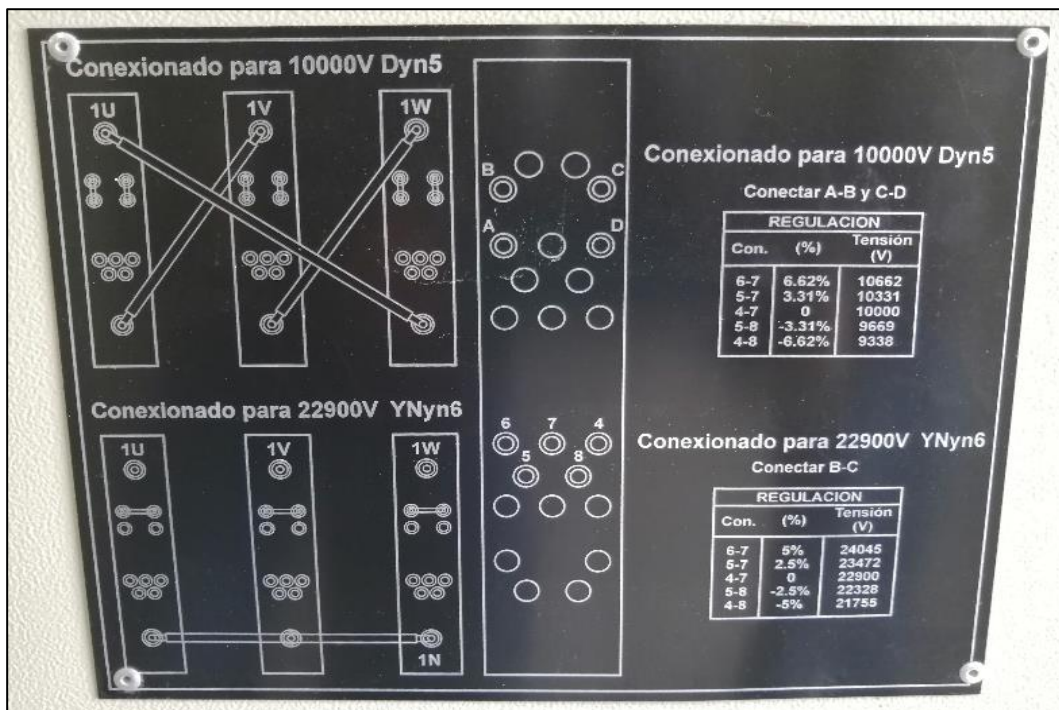
## Anexo 1:

### Datos de Placa de transformador

En las siguientes Figuras se muestran los datos del transformador.



**Figura 38:** Datos de placa de Transformador.  
 Fuente: (Propia).



**Figura 39:** Tipo de Conexión según región.  
 Fuente: (Propia).



**Figura 40: Vista de los Trafos en seco.**  
Fuente: (Propia).

## Anexo 2:

### Datos Técnicos sobre las secciones de los conductores según catalogo

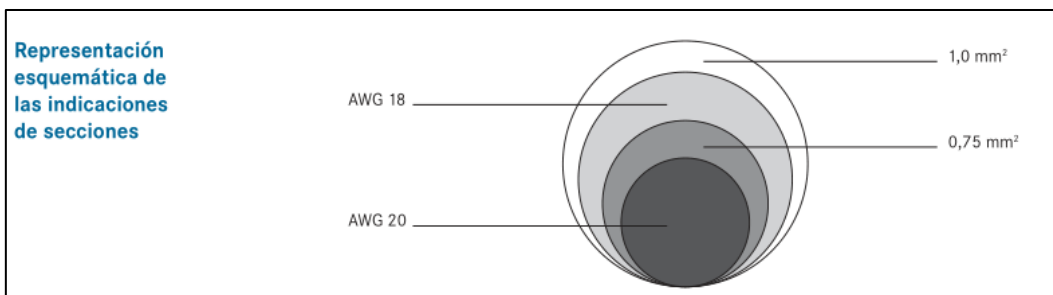
En las siguientes figuras se muestra las secciones de los conductores más usados en cable desnudo trenzado y cable con cubierta.

Columna 1a	Columna 1b	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5a	Columna 5b
Indicación de sección norteamericana buscada		Conversión geométrica	Sección nominal métrica que cumple los requisitos eléctricos	Sección nominal métrica buscada	Magnitud norteamericana que cumple los requisitos eléctricos	
AWG	kcmil	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	AWG	kcmil
	<b>750</b>	380,03	<b>400</b>	400		800
	<b>500</b>	253,35	<b>300</b>	300		750
	450	228,02	<b>240</b>	240		500
	<b>400</b>	202,68				450
	350	177,35	<b>185</b>	185		400
	<b>300</b>	152,01				350
	<b>250</b>	126,68	<b>150</b>	150		300
<b>4/0</b>		107,22	<b>120</b>	120		250
<b>3/0</b>		85,01	<b>95</b>	95	4/0	
<b>2/0</b>		67,43	<b>70</b>	70	3/0	
<b>1/0</b>		53,49			2/0	
<b>1</b>		42,41	<b>50</b>	50	1/0	
<b>2</b>		33,62	<b>35</b>	35	1	
<b>3</b>		26,67			2	
<b>4</b>		21,15	<b>25</b>	25	3	
<b>5</b>		16,77			4	
<b>6</b>		13,30	<b>16</b>	16	5	
<b>7</b>		10,55			6	
<b>8</b>		8,37	<b>10</b>	10	7	

**Figura 41:** Sección de conductores grandes.  
Fuente: (Propia).

Columna 1a	Columna 1b	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5a	Columna 5b
Indicación de sección norteamericana buscada		Conversión geométrica	Sección nominal métrica que cumple los requisitos eléctricos	Sección nominal métrica buscada	Magnitud norteamericana que cumple los requisitos eléctricos	
AWG	kcmil	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	AWG	kcmil
9		6,63			8	
10		5,26	6	6	9	
11		4,17			10	
12		3,31	4	4	11	
13		2,62			12	
14		2,08	2,5	2,5	13	
15		1,65			14	
16		1,31	1,5	1,5	15	
17		1,04			16	
18		0,82	1	1	17	
19		0,65	0,75	0,75	18	
20		0,52			19	
21		0,41	0,5	0,5	20	
22		0,33	0,34	0,34	21	
23		0,26			22	
24		0,20	0,25	0,25	23	
25		0,16			24	
26		0,13	0,14	0,14	25	

**Figura 42:** Sección de conductores Pequeño.  
Fuente: (Propia).



**Figura 43:** Esquema de Secciones de Conductores.  
Fuente: (Propia).



### Anexo 3: Datos de la Subestación.

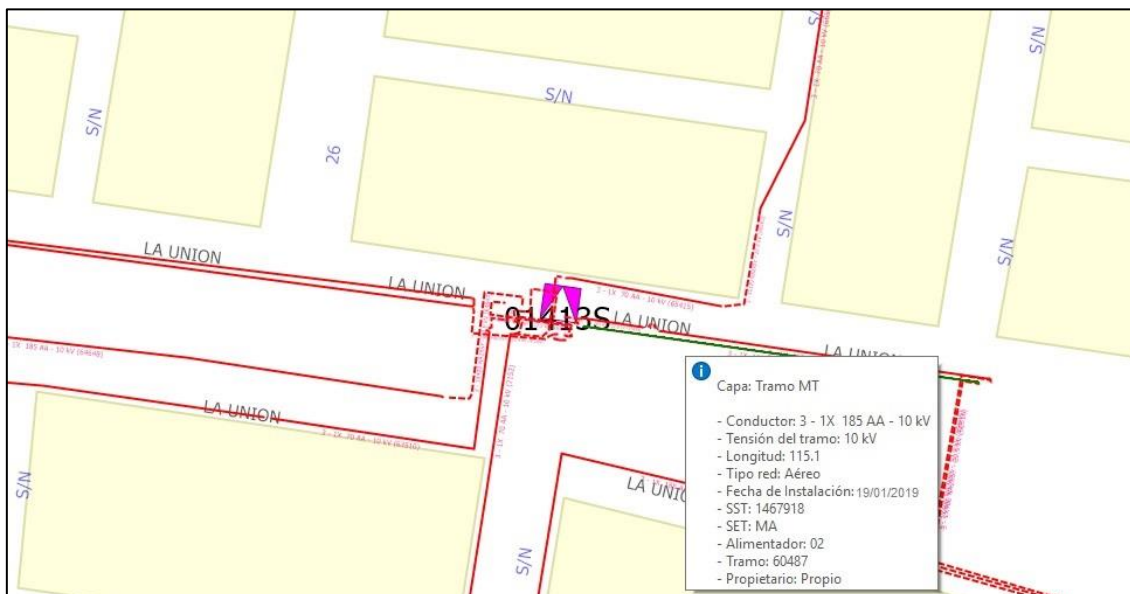
Tipo SED :	CONVENCIONAL	N° de Sed :	01413		
Modulo :	4562	Región :	2586	Cuadrante :	4662
Coordenada :	3719	Coord. Norte :	8662200	Coord. Este :	296375
Dirección :	AH HUERTOS DE MANCHAY		Distrito :	PACHACAMAC	

SubTipo de SED :	DE SUPERFICIE	Tipo de Carga :	MEDIA DENSIDAD
Estado :	EN SERVICIO	Tipo de Acceso :	NORMAL
SET :	MA	Codigo Zona :	ZS
Alimentador :	02	Fecha Puesta en Servicio :	22/12/1999
Tensión de Alimentación :	10 KV	Tipo de Uso :	REDUCTORA
Tensión de Salida 1 :		Area Total :	0.00
Tensión de Salida 2 :		Area Construida :	0.00
Tensión de Salida 3 :			

Cancelar

**Figura 44:** Datos de Subestación.  
Fuente: (Propia).



**Figura 45:** Datos de tramo de la subestación.  
Fuente: (Propia).