



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TEMA**

**ANÁLISIS Y REDISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA LA SUB-  
ESTACIÓN PALESTINA MEDIANTE MATLAB**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de**

**INGENIERO ELÉCTRICO**

**AUTOR(ES)**

**LUIS ALFREDO ECHEVERRÍA SANTILLÁN**

**LEUY MANUEL GUAGUA MACÍAS**

**TUTOR**

**ING. JULIO MANUEL SILVA BECHERAN, MSC**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**2021**

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Luis Alfredo Echeverría Santillán con documento de identificación N° 1207237197 y Ley Manuel Guagua Macías con documento de identificación 0916652142 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo y autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación

Guayaquil, 27 de septiembre del 2021

Atentamente



-----  
Luis Alfredo Echeverría Santillán

C.I. 1207237197



-----  
Ley Manuel Guagua Macías

C.I. 0916652142

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Luis Alfredo Echeverría Santillán con número de identificación N°1207237197 y Leuy Manuel Guagua Macías con número de identificación N°0916652142, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que somos autores del : “ANÁLISIS Y REDISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA LA SUB-ESTACIÓN PALESTINA MEDIANTE MATLAB”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de INGENIERO ELÉCTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en el formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil 27 de septiembre 2021

Atentamente

-----  
Luis Alfredo Echeverría Santillán

C.I. 1207237197

-----  
Leuy Manuel Guagua Macías

C.I. 0916652142

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Julio Manuel Silva Becherán con documento de identificación N° docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ANÁLISIS Y REDISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA LA SUB-ESTACIÓN PALESTINA MEDIANTE MATLAB”, realizado por Luis Alfredo Echeverría Santillán con número de identificación N°1207237197 y Leuy Manuel Guagua Macías con número de identificación N°0916652142, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Tesis que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil 27 de septiembre de 2021

Atentamente



-----  
Ing. Julio Manuel Silva Becherán, Msc

C.I. 0959623422

## **DEDICATORIA**

A Dios por haberme acompañado en cada momento de mi vida, a mis padres Alfredo Echeverría y Narcisa Santillán que siempre fueron el apoyo y el motor fundamental para seguir luchando por ser un profesional, a mis hermanos Jeanina Echeverría y Ronny Echeverría que siempre estuvieron dándome ese empujón que necesitaba y un apoyo fundamental en la obtención del título y a mi esposa Karen Solarte e hija Aitana Echeverría que siempre me brindaron ese amor y fuerzas para seguir luchando, gracias a la gran familia que tengo he llegado a la meta por eso este triunfo se los dedico a ellos.

Luis Alfredo Echeverría Santillán

Con todo mi amor y aprecio, dedico a mi hermosa familia que siempre permaneció conmigo. A mi gran tesoro, mi hija Lía, quien es mi mayor motivación, a mis padres y hermanos.

Sin ellos no hubiera llegado hasta aquí.

A mis amigos y compañeros presentes y pasados quienes, sin esperar nada a cambio, compartieron sus conocimientos, alegrías y a todas aquellas personas que durante mi carrera estuvieron a mi lado ayudándome y forjaron que este sueño se haga realidad.

Les dedico este y todos mis sueños por cumplir, gracias.

Leuy Manuel Guagua Macías

## **AGRADECIMIENTOS**

A cada docente de la Universidad Politécnica Salesiana que ha impartido su conocimiento y experiencia, a mis padres por siempre darme ese apoyo incondicional, a mis hermanos por estar ahí cuando siempre los necesité, a mi esposa e hija por darme ese amor y a apoyo que fue parte fundamental en mi carrera profesional y la señora Yoconda Rodríguez por acogerme y hacerme sentir parte de su familia que también forma parte de estas grandes personas que conocí en este camino, gracias a todas esas personas que fueron parte de mi crecimiento para llegar a la meta

Luis Alfredo Echeverría Santillán

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme tener tan buena experiencia dentro de mi Universidad, adquirir conocimientos profesionales, experiencias, aprender a forjar mi carácter en momentos complejos, en tener fe. En dar soluciones a los problemas por permitirme convertirme en un profesional en lo que tanto me apasiona, gracias a cada uno de mis maestros que hizo parte de este proceso integral de formación. Este trabajo de tesis ha sido una gran bendición en todo sentido y le agradezco a Dios por la Sabiduría que me brindo para poder avanzar en mi tesis, agradezco a mi Mama sus consejos a mi padre y a mi hija que son los principales motores de mis sueños, gracias por confiar y creer en mí en momentos difíciles como fue vivir una pandemia y luchar ante todas las dificultades.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo, gracias a todas las personas que me apoyaron y creyeron en la realización de esta tesis.

Leuy Manuel Guagua Macías

## ÍNDICE GENERAL

|   |       |
|---|-------|
| PORTADA.....  | i     |
| DEDICATORIA.....  | v     |
| AGRADECIMIENTOS .....   | vi    |
| RESUMEN.....  | xiii  |
| ABSTRACT .....  | xiv   |
| ACRÓNIMOS.....  | xv    |
| INTRODUCCIÓN .....  | xviii |
| CAPÍTULO 1 .....  | 1     |
| MARCO TEÓRICO.....  | 1     |
| 1.1    SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.....                              | 1     |
| 1.1.1    Definición.....  | 1     |
| 1.1.2    Características de operación.....                        | 1     |
| 1.2    CLASIFICACIÓN DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.....             | 1     |
| 1.2.1    Subestación eléctrica según la función.....              | 2     |
| 1.2.2    Subestación eléctrica según la construcción .....        | 4     |
| 1.2.3    Subestación eléctrica según la movilidad.....            | 5     |
| 1.2.4    Subestación eléctrica según el tipo de aislamiento ..... | 5     |
| 1.2.5    Subestación eléctrica según su ubicación.....            | 6     |
| 1.2.6    Subestación eléctrica según el nivel de tensión .....    | 6     |
| 1.2.7    Subestación eléctrica según la transformación.....       | 7     |
| 1.3    COMPONENTES DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA .....              | 7     |
| 1.3.1    Barras .....   | 8     |
| 1.3.2    Conmutadores de puesta a tierra .....                    | 8     |
| 1.3.3    Descargador de sobretensiones .....                      | 8     |
| 1.3.4    Desconectores.....                                       | 8     |
| 1.3.5    Edificio de operaciones .....                            | 8     |
| 1.3.6    Interruptores de circuito .....                          | 8     |
| 1.3.7    Pararrayos.....  | 9     |
| 1.3.8    Portal .....   | 9     |
| 1.3.9    Transformadores.....                                     | 9     |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.4    | PUESTA A TIERRA.....   | 9  |
| 1.4.1  | Definición y características .....                           | 9  |
| 1.4.2  | Clasificación.....   | 10 |
| 1.5    | MALLA DE TIERRA .....  | 10 |
| 1.5.1  | Electrodos de puesta a tierra.....                           | 11 |
| 1.5.2  | Conductores de tierra .....                                  | 11 |
| 1.5.3  | Conductores de protección .....                              | 12 |
| 1.5.4  | Conductores de servicio .....                                | 12 |
| 1.5.5  | Conexiones .....   | 13 |
| 1.6    | CORRIENTE ELÉCTRICA Y VOLTAJE TOLERABLE.....                 | 13 |
| 1.6.1  | Efectos directos .....                                       | 13 |
| 1.6.2  | Efectos indirectos .....                                     | 14 |
| 1.6.3  | Aumento de potencial máximo de malla GPR.....                | 14 |
| 1.6.4  | Tensión de contacto.....                                     | 14 |
| 1.6.5  | Tensión de paso .....  | 15 |
| 1.7    | EL SUELO .....   | 16 |
| 1.7.1  | Medio de unión a tierra .....                                | 16 |
| 1.7.2  | Gradiente del potencial y la corriente .....                 | 16 |
| 1.7.3  | Humedad, temperatura y composición química.....              | 17 |
| 1.7.4  | Capa superficial de material .....                           | 17 |
| 1.7.5  | Modelo del suelo .....                                       | 18 |
| 1.8    | RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD .....                             | 19 |
| 1.8.1  | Método de 2 puntos .....                                     | 19 |
| 1.8.2  | Método de 3 puntos .....                                     | 20 |
| 1.8.3  | Método de caída de potencial FOP .....                       | 21 |
| 1.8.4  | Método de Wenner .....                                       | 22 |
| 1.8.5  | Método de Schlumberger .....                                 | 22 |
| 1.9    | ASPECTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE LA MALLA EN SUBESTACIONES |    |
|        | 23   |    |
| 1.10   | NORMATIVA PARA PUESTA A TIERRA.....                          | 24 |
| 1.10.1 | Norma IEEE Std 81-2012 .....                                 | 24 |
| 1.10.2 | Norma IEEE Std 80-2013 .....                                 | 24 |



|  |  |    |
|--|--|----|
| 1.10.3   | Reglamento RCE.....  | 28 |
| 1.10.4   | Norma UNE-EN 50522 .....   | 29 |
| CAPÍTULO 2 .....                               |  | 30 |
| SUBESTACIÓN PALESTINA.....                     |  | 30 |
| 2.1  | GENERALIDADES .....  | 30 |
| 2.2  | SITUACIÓN ACTUAL .....   | 31 |
| 2.3  | TIPO DE SUBESTACIÓN ELÉCTRICA S/E.....                           | 32 |
| 2.4  | ANÁLISIS DE LA MALLA DE TIERRA .....                             | 33 |
| CAPÍTULO 3 .....                               |  | 35 |
| MEDICIONES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA..... |  | 35 |
| 3.1  | COMPROBADOR DE PUESTA A TIERRA.....                              | 35 |
| 3.2  | MEDICIONES DE RESISTENCIA.....                                   | 36 |
| CAPÍTULO 4 .....                               |  | 41 |
| SISTEMA DE PUESTA A TIERRA .....               |  | 41 |
| 4.1  | MALLA DE TIERRA ACTUAL .....                                     | 41 |
| 4.1.1  | Datos de campo .....   | 41 |
| 4.1.2  | Conductor de cobre duro con conexiones mecánicas a presión ..... | 42 |
| 4.1.3  | Resistencia de la malla actual.....                              | 43 |
| 4.2  | REDISEÑO DE LA MALLA A TIERRA .....                              | 44 |
| 4.2.1  | Conductor de cobre duro con soldadura exotérmica .....           | 44 |
| 4.2.2  | Voltajes tolerables .....  | 44 |
| 4.2.3  | Diseño inicial.....  | 45 |
| 4.2.4  | Resistencia.....   | 46 |
| 4.2.5  | Corriente de la malla .....                                      | 46 |
| 4.2.6  | Potencial GPR .....  | 46 |
| 4.3  | ANÁLISIS Y RESULTADOS .....                                      | 47 |
| 4.3.1  | Análisis del diseño de la malla de puesta a tierra.....          | 47 |
| 4.3.2  | Resultados obtenidos con el software Matlab .....                | 47 |
| CONCLUSIONES .....                             |  | 49 |
| RECOMENDACIONES .....                          |  | 50 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                              |  | 51 |
| ANEXOS.....                                    |  | 53 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1. Tipos de subestaciones eléctricas .....  | 2  |
| Figura 1.2. Subestación eléctrica de tipo maniobra .....   | 3  |
| Figura 1.3. Subestación eléctrica de transformación a) pura, b) maniobra y c) cambio número de fases ..... | 3  |
| Figura 1.4. Subestación eléctrica de rectificación.....  | 4  |
| Figura 1.5. Subestación eléctrica de tipo central.....   | 4  |
| Figura 1.6. Subestación eléctrica de a) intemperie y b) interior .....                                     | 5  |
| Figura 1.7. Subestación eléctrica móvil .....  | 5  |
| Figura 1.8. Subestación eléctrica aisladas a) AIS, b) GIS y c) híbridas AIS/GIS.....                       | 6  |
| Figura 1.9. Subestaciones eléctricas según la ubicación .....  | 6  |
| Figura 1.10. Componentes de una subestación eléctrica AT a la intemperie.....                              | 7  |
| Figura 1.11. Circuito equivalente de un transformador .....  | 9  |
| Figura 1.12. Componentes de la malla de tierra.....  | 11 |
| Figura 1.13. Formas de instalación de electrodos .....   | 11 |
| Figura 1.14. Conectores eléctricos a la soldadura exotérmica .....   | 13 |
| Figura 1.15. Exposición al voltaje de contacto .....   | 15 |
| Figura 1.16. Circuito Thévenin del voltaje de contacto .....   | 15 |
| Figura 1.17. Exposición a la tensión de paso .....   | 16 |
| Figura 1.18. Modelo del suelo.....   | 16 |
| Figura 1.19. Parámetros ambientales y químicos en base a la resistividad.....                              | 17 |
| Figura 1.20. Método Sunde .....  | 18 |
| Figura 1.21. Método de dos puntos .....  | 20 |
| Figura 1.22. Método de los tres puntos .....   | 21 |
| Figura 1.23. Método de caída de potencial .....  | 21 |
| Figura 1.24. Método de Wenner.....   | 22 |
| Figura 1.25. Método de Schlumberger .....  | 23 |
| Figura 1.26. Puesta a tierra IEEE80-2013.....  | 24 |
| Figura 2.1. Cabecera cantonal Palestina.....   | 30 |
| Figura 2.2. Subestación Palestina.....   | 31 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.3. Tableros de control .....  | 32 |
| Figura 2.4. Transformadores .....  | 32 |
| Figura 2.5. S/E Palestina según el tipo de función.....                      | 32 |
| Figura 2.6. S/E Palestina según el tipo de construcción.....                 | 33 |
| Figura 2.7. S/E Palestina según el tipo de aislamiento.....                  | 33 |
| Figura 2.8. Malla actual a tierra Subestación Palestina.....                 | 34 |
| Figura 2.9. Conductor de protección existente.....                           | 34 |
| Figura 3.1. Comprobador de puesta a tierra Fluke 1625-2.....                 | 35 |
| Figura 3.2. Método Wenner mediante el Fluke 1625-2 .....                     | 36 |
| Figura 3.3. Método Wenner sobre el eje X .....                               | 37 |
| Figura 3.4. Método Wenner sobre el eje Y .....                               | 37 |
| Figura 3.5. Resistencia medida a 1 metro de separación sobre el eje X .....  | 38 |
| Figura 3.6. Resistencia medida a 2 metros de separación sobre el eje X.....  | 38 |
| Figura 3.7. Resistencia medida a 3 metros de separación sobre el eje X.....  | 39 |
| Figura 3.8. Resistencia medida a 6 metros de separación sobre el eje X.....  | 39 |
| Figura 3.9. Resistencia medida a 1 metro de separación sobre el eje Y .....  | 39 |
| Figura 3.10. Resistencia medida a 3 metros de separación sobre el eje Y..... | 40 |
| Figura 3.11. Resistencia medida a 6 metros de separación sobre el eje Y..... | 40 |
| Figura 4.1. Diseño de la nueva malla a tierra.....                           | 45 |
| Figura 4.2. Diseño realizado de la nueva malla a tierra .....                | 47 |
| Figura 4.3. Resultado del diseño de la malla nueva a tierra.....             | 48 |
| Figura 4.4. Diseño de la nueva malla a tierra mediante Matlab.....           | 48 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1. Subestación eléctrica en Ecuador acorde al nivel de tensión ..... | 7  |
| Tabla 1.2. Calibres de conductores de cobre para mallas de tierra .....      | 12 |
| Tabla 1.3. Sección nominal para cables protectores en la instalación .....   | 12 |
| Tabla 1.4. Sección nominal para cables de servicio.....                      | 12 |
| Tabla 1.5. Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano .....       | 13 |
| Tabla 1.6. Efectos fisiológicos indirectos .....                             | 14 |
| Tabla 1.7. Resistencia máxima de puesta a tierra .....                       | 24 |
| Tabla 1.8. Constantes de materiales del conductor .....                      | 25 |
| Tabla 1.9. Valores típicos de $D_f$ y $t_f$ .....                            | 26 |
| Tabla 1.10. Factores de ponderación $K_{ii}$ .....                           | 27 |
| Tabla 3.1. Características Fluke 1625-2 GEO con el método de 4 hilos .....   | 36 |
| Tabla 3.2. Resistencia medida por medio del Método de Wenner.....            | 37 |
| Tabla 4.1. Cálculo de la resistividad por cada medición.....                 | 41 |
| Tabla 4.2. Impedancias en el transformador .....                             | 42 |
| Tabla 4.3. Corriente de cortocircuito del sistema actual .....               | 43 |

## RESUMEN

El presente trabajo consiste en el análisis y rediseño del sistema de puesta tierra para la Subestación Palestina que abastece de energía eléctrica al cantón Palestina ubicado a 80 kilómetros de Guayaquil. Primero, es importante conocer los componentes de la subestación, aspectos básicos de la malla de tierra, modelo del suelo, efectos fisiológicos ante el paso de la corriente y voltaje permisible en el cuerpo humano, la resistencia obtenida mediante la norma IEEE 81-2012 y el diseño de la malla en base a la norma IEEE 80-2013. En segunda instancia, se realiza un diagnóstico de la situación actual de la Subestación Palestina, definiendo el área del terreno, el tipo de subestación, condición de tomas a tierra y valores de resistencia permitida por la normativa. Como tercer punto, se realizan las mediciones con el método de Wenner, a fin de obtener los valores de resistencia actuales. Como conclusión se realiza el rediseño del sistema de puesta a tierra utilizando un modelo de suelo uniforme, determinando una resistividad de 55.77 ohmios-metro. Con ello, se obtiene una malla cuadrada de 900 metros cuadrados cuyo espaciamiento entre conductores es de 5 metros. El diseño es idóneo, ya que su resistencia posee un valor menor a 1 ohmio y el potencial máximo de la malla es menor al voltaje de contacto permisible. Por último, se realiza una simulación en el software Matlab con el propósito de facilitar los cálculos de diseño y poder visualizar de forma gráfica la malla de tierra.

**Palabras clave:** malla de tierra, Matlab, Palestina, puesta a tierra, subestación

## ABSTRACT

## ACRÓNIMOS

- a: distanciamiento entre electrodos bajo el método Wenner.
- $A_{mm^2}$ ,  $A_{kcmil}$ : sección transversal del conductor expresado en milímetros al cuadrado y en MCM; respectivamente.
- A: área de la malla en metros cuadrados.
- AC “Alternating Current”: corriente alterna.
- AIS “Air Insulated substation”: subestación aislada en aire.
- ARCONEL: Agencia de Regulación y Control de Electricidad ARCONEL
- AWG “American Wire Gauge”: calibre de alambre estadounidense.
- CNEL EP: Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad.
- $C_s$ : factor de decremento de la capa superficial.
- d y  $d_{mín}$ : diámetros normal y mínimo del conductor de la malla en metros.
- D: espaciamiento de conductores paralelos de la malla en metros.
- DC “Direct current”: corriente directa o continua.
- $D_f$ : factor de disminución durante el tiempo  $t_f$ .
- $D_m$ : longitud máxima de dos puntos de la malla en metros.  
 $E_m$ : Voltaje de la malla.
- EN: Normas Europeas.
- $E_s$ : voltaje de paso real.
- $E_{step}$ : voltaje de paso tolerable para una persona que pese 50 o 70 kilogramos.
- $E_{touch}$ : voltaje de contacto tolerable para una persona que pese 50 o 70 kilogramos.
- GIS “Gas Insulated substation”: subestación aislada en gas.
- GPR “Ground Potential Rise”: aumento de potencial de tierra, este se mide en voltios.
- h: profundidad de la malla en metros.
- $h_o$ : profundidad de referencia en metros.
- $h_s$ : espesor de la capa superficial en metros.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE: es el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
- $I_G$ : corriente de falla simétrica en amperios.
- $I_o$ : corriente máxima de falla (cortocircuito) en kilo amperios.

- K: factor de reflexión.
- $K_f$ : constante del material del conductor.
- $K_h$ : factor de ponderación correctivo de la profundidad de la malla.
- $K_i$ : factor de corrección para la geometría de la malla.
- $K_m$ : factor de espaciado del voltaje de contacto.
- $K_s$ : factor de espaciado del voltaje de paso.
- $K_{ii}$ : factor de ponderación correctivo en conductores internos.
- $L_c$ : longitud total del conductor de la malla en metros.
- $L_M$ : longitud efectiva enterrada en metros.
- $L_p$ : perímetro de la malla en metros.
- $L_R$ : longitud total de las varillas de tierra en metros.
- $L_s$ : longitud efectiva del conductor para el voltaje de paso en metros.
- $L_T$ : longitud total de las varillas y conductores en metros.
- $L_x$ : longitud del conductor en la dirección “x” en metros.
- $L_y$ : longitud del conductor en la dirección “y” en metros.
- MERNNR: Ministerio de Energía y Recursos No Renovables.
- Mil Circular Mils MCM, donde mil es para los diámetros (es una milésima de pulgada) y circular mil es para las áreas del círculo del conductor.
- $n, n_a, n_b, n_c, n_d$ : número de conductores acorde a la distribución de la malla ya sea cuadrada, rectangular y en forma de L.
- $n_p$ : número total de mediciones de las resistividades.
- $\rho$ : resistividad del terreno medido en ohmios por metro.
- $\rho_s$ : resistividad de la capa superficial del terreno expresado en ohmios por metro.
- $\rho_1$  y  $\rho_2$ : resistividades medidas y expresadas en ohmios por metro; obtenidas de forma experimental bajo las distancias de separación mínima y máxima; respectivamente.
- r: radio de un círculo del área cubierta por la malla, medida en metros.
- $R_f$ : resistencia estimada de la falla expresada en ohmios.
- $R_B$ : resistencia del cuerpo humano medida en ohmios.
- $R_g$ : resistencia de la malla expresada en ohmios.
- $S_f$ : factor de división de la corriente de falla.
- $T_m$ : temperatura máxima permisible de fusión expresada en grados centígrados.



- $t_f$ : tiempo de duración de la falla medida en segundos.
- $t_s$ : tiempo de despeje de la falla medida en segundos.
- UNE: significa que es Una Norma Española.
- $V_{Th}$ : voltaje Thévenin del circuito.
- $Z_{Th}$ : impedancia Thévenin del circuito expresada en ohmios.
- $Z_1, Z_2, Z_0$ : impedancias de secuencia positiva, negativa y zero, respectivamente; expresados en ohmios.
- $Z_{1\_bt}, Z_{0\_bt}$ : impedancias positiva y zero de transferencia de alta a media tensión.

## INTRODUCCIÓN

### **Planteamiento del problema**

Por lo general, un sistema de puesta a tierra SPT se compone de una malla conductora enterrada en el suelo, la cual debe estar presente en cualquier instalación eléctrica con el propósito de minimizar o eliminar todo potencial que exista entre la estructura metálica y los componentes pertenecientes a la instalación. Además, tiene como funciones garantizar la protección integral de las personas ya sea que se encuentren a distancias cortas o en la propia instalación para que no tengan efectos secundarios provocados por la corriente eléctrica que pueda atravesar en el cuerpo humano y otro factor importante, es mejorar la calidad del servicio y disminuir el riesgo de daño en los equipos existentes en la instalación eléctrica.

Para lograr tal propósito, se debe obtener una baja resistencia en el sistema de puesta a tierra a tal punto que se disipen de forma rápida y efectiva las corrientes de cortocircuito en el suelo, así como los voltajes de paso y contacto que un ser humano pueda recibir; estas magnitudes de voltaje deben ser menores a los límites permitidos por las normativas nacionales e internacionales.

En un diagnóstico efectuado a la malla a tierra de la subestación Palestina, se pudo determinar mediante pruebas eléctricas su estado técnico, obteniendo como resultado que su resistencia estaba fuera de los parámetros normalizados de operación. Por lo anteriormente expuesto, el presente trabajo de investigación plantea el rediseño del sistema SPT de la subestación Palestina, para que pueda garantizar un óptimo desempeño en sus funciones.

### **Justificación**

Un sistema de puesta a tierra SPT es un elemento de gran importancia que forma parte de la instalación eléctrica, ya que siempre debe garantizar la operación normal y la protección necesaria a todos los equipos pertenecientes al sistema en general, por lo cual es de vital importancia que los parámetros cumplan con las normativas y así mitigar problemas de sobretensión, descargas de origen eléctrico y/o atmosféricos.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar y rediseñar el sistema de puesta a tierra para la Subestación Palestina

### **Objetivos Específicos**

- Rediseñar el sistema de puesta a tierra en la subestación Palestina.
- Determinar los valores de impedancia del suelo para el diseño de la subestación de Palestina.
- Realizar una simulación de operatividad del sistema de puesta a tierra en la subestación Palestina mediante Matlab.

### **Metodología**

En el presente proyecto se utilizará la Investigación Aplicada, ya que se ajusta en encontrar tácticas o mecanismos que ayuden a la resolución del problema actual. En este caso se busca encontrar un mecanismo que permita evidenciar las bondades que presenta el desarrollo del análisis y rediseño del sistema de puesta a tierra para la subestación palestina. De esta manera se plasmaría una posible implementación a futuro basada en los resultados obtenidos.

# **CAPÍTULO 1**

## **MARCO TEÓRICO**

### **1.1 SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

#### **1.1.1 Definición**

La subestación eléctrica es el conjunto de la aparamenta situada en un mismo lugar, capaces de realizar funciones como compensación del factor de potencia, conexión de dos o más circuitos, rectificación y transformación [1].

#### **1.1.2 Características de operación**

Las subestaciones eléctricas poseen 4 características generales que la definen, enunciadas a continuación [2]:

- Cuando la instalación se acomoda bajo condiciones diferentes se dice que posee flexibilidad.
- En cambio, es confiable cuando la subestación logra mantener el suministro de energía eléctrica ante un fallo de un componente y este sea reparada durante la operación.
- La subestación eléctrica es segura si opera de manera adecuada bajo cualquier condición y evite el daño en materiales, equipos o riesgo para las personas.
- Por último, se dice que la subestación es modular porque permite cambiar la configuración de este ante alguna necesidad o que el sistema lo requiera.

### **1.2 CLASIFICACIÓN DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

Las subestaciones eléctricas se pueden clasificar según la característica que se analice, tales como: función, construcción, movilidad, aislamiento, ubicación, nivel de tensión, transformación, visto en la Figura 1.1 [1].

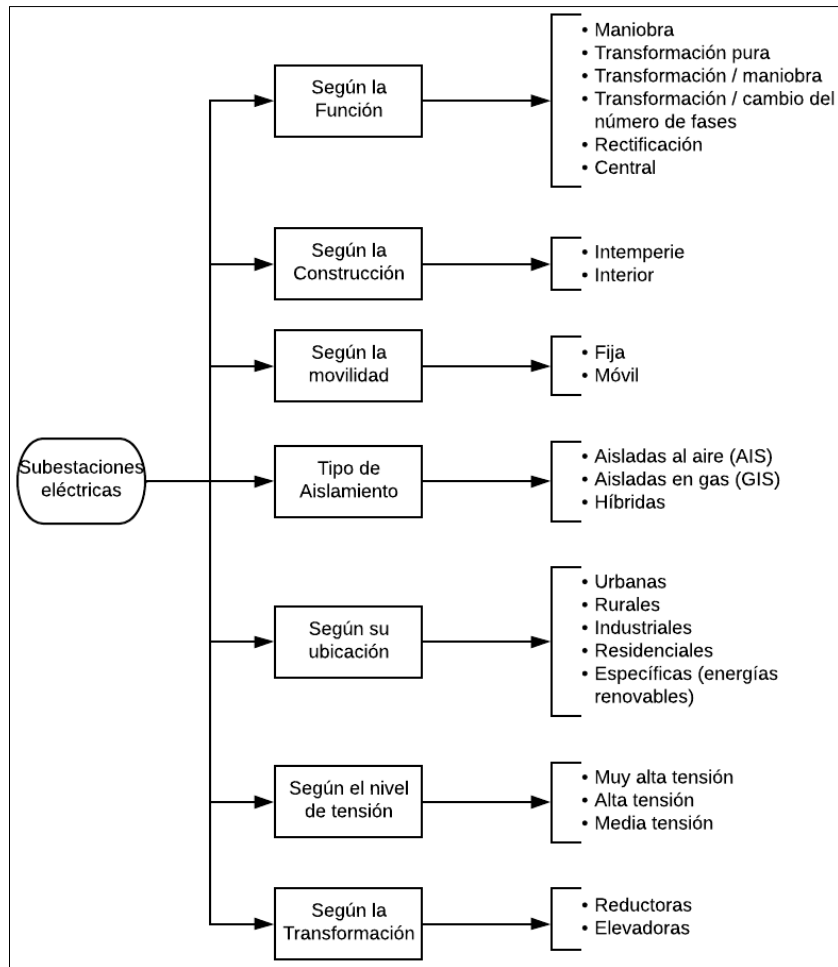


Figura 1.1. Tipos de subestaciones eléctricas

Fuente: [1]

### 1.2.1 Subestación eléctrica según la función

A continuación, se describen las subestaciones eléctricas acorde a la función:

- De maniobra: esta subestación consiste en la interconexión de 2 o más circuitos, cuyo propósito es el incremento fiable del sistema y forma nodos en una red teniendo como resultado final una misma tensión en todas las líneas concurrentes, tal como se observa en la Figura 1.2 [1].

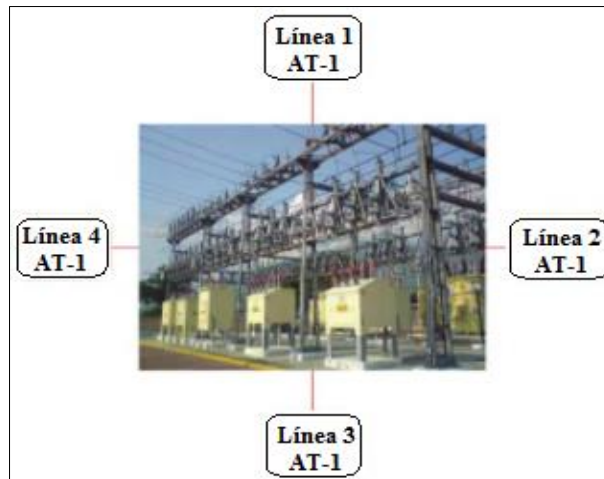


Figura 1.2. Subestación eléctrica de tipo maniobra

Fuente: [1]

- De transformación pura: esta subestación consiste en la conversión de tensión de un nivel superior a otro inferior, es decir, que reduce el nivel de tensión, tal como se muestra en la Figura 1.3.a) [1].

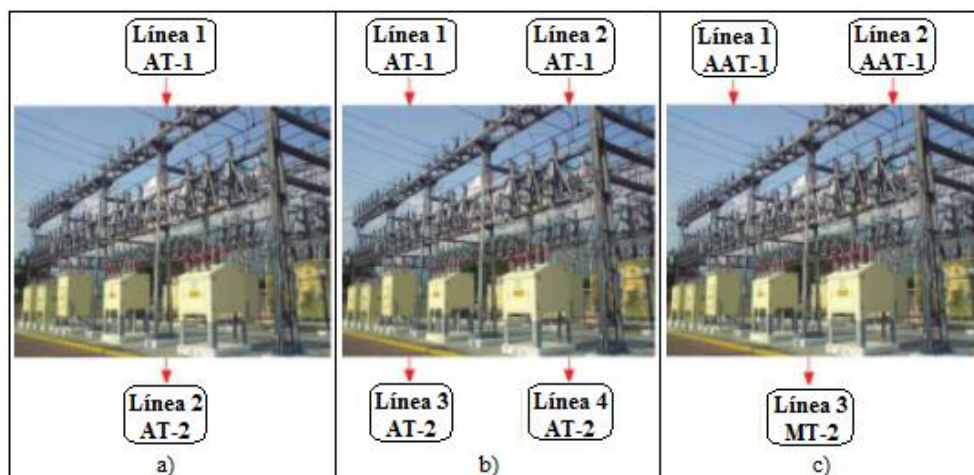


Figura 1.3. Subestación eléctrica de transformación a) pura, b) maniobra y c) cambio número de fases

Fuente: [1]

- De transformación/maniobra: esta subestación abarca la transformación de un alto a bajo voltaje y la conexión entre circuitos del mismo nivel, tal como se observa en la Figura 1.3.b) [1].
- De transformación/cambio de número de fases: esta subestación consiste en la alimentación de redes bajo distintos números de fases ya sea trifásica/hexafásica o trifásica/monofásica, visto en la Figura 1.3.c) [1].
- De rectificación: como su nombre lo indica, la rectificación implica cambiar el voltaje alterno AC a continuo DC, tal como se menciona en la Figura 1.4 [1].

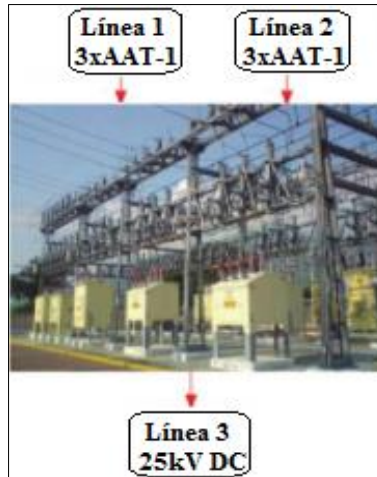


Figura 1.4. Subestación eléctrica de rectificación

Fuente: [1]

- De central: esta subestación consiste en la transformación de voltaje de un nivel inferior a otro superior, tal como se indica en la Figura 1.5 [1].

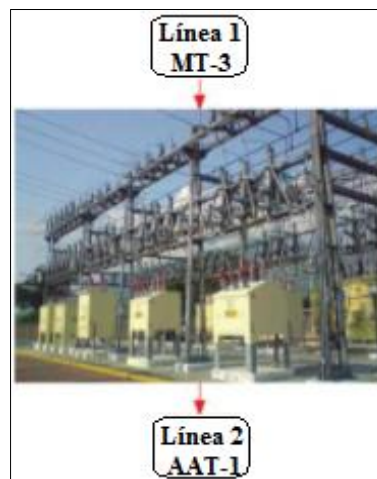


Figura 1.5. Subestación eléctrica de tipo central

Fuente: [1]

### 1.2.2 Subestación eléctrica según la construcción

Según la construcción, existen 2 subestaciones eléctricas: exterior o intemperie donde los elementos constitutivos de la subestación se instalan bajo condiciones ambientales, tal como se observa en la Figura 1.6.a). En cambio, si es una subestación interior, los elementos se instalan dentro de edificios, tal como se visualiza en la Figura 1.6.b) [2].



Figura 1.6. Subestación eléctrica de a) intemperie y b) interior

Fuente: [1]

### 1.2.3 Subestación eléctrica según la movilidad

Según la movilidad, se tiene subestaciones fijas que no cambian de posición y otras móviles que se encargan de suministrar energía eléctrica ante la ausencia parcial o total de electricidad como es el caso de la Figura 1.7, donde los elementos pertenecientes a la subestación provienen de un remolque [2].



Figura 1.7. Subestación eléctrica móvil

Fuente: [1]

### 1.2.4 Subestación eléctrica según el tipo de aislamiento

Según el tipo de aislamiento, existen subestaciones eléctricas cuyo aparellaje eléctrico está aislado en aire AIS, tal como se ha observa en la Figura 1.8.a, es decir, son subestaciones convencionales. En cambio, las que son aisladas en gas “GIS” (Figura 1.8.b) utilizan la misma aparamenta que la subestación convencional salvo que son blindadas por una envoltura de aluminio rellena cuyo propósito es asegurar el aislamiento con respecto a tierra. Por último, existen subestaciones híbridas que es la combinación AIS y GIS, tal como se indica en la Figura 1.8.c [3].



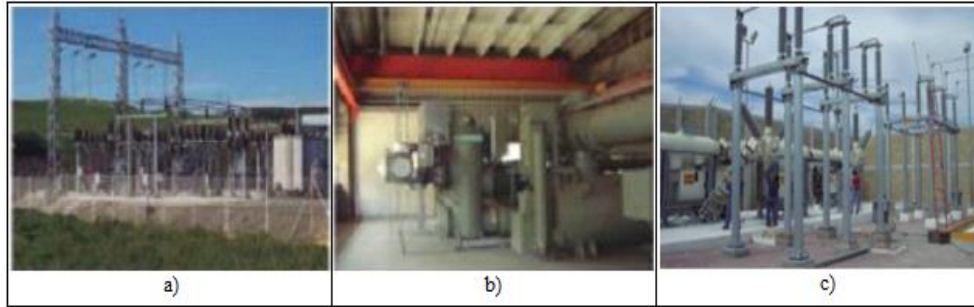


Figura 1.8. Subestación eléctrica aisladas a) AIS, b) GIS y c) híbridas AIS/GIS

Fuente: [1]

### 1.2.5 Subestación eléctrica según su ubicación

Según la ubicación, las subestaciones eléctricas pueden estar en zonas urbanas, industriales, rurales, residenciales o específicas (fotovoltaicas, eólicas, entre otras), visto en la Figura 1.9.



Figura 1.9. Subestaciones eléctricas según la ubicación

Fuente: [1]

### 1.2.6 Subestación eléctrica según el nivel de tensión

El MERNNR es el órgano rector y planificador del sector eléctrico. Además, la Agencia ARCONEL remite bajo la Tabla 1.1 los niveles de voltaje que deben presentar las Empresas Eléctricas Distribuidoras en Ecuador [4].

Tabla 1.1. Subestación eléctrica en Ecuador acorde al nivel de tensión

| Niveles de tensión alterna | Voltaje 1 | Voltaje 2 | Voltaje 3 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Muy alta tensión AAT       | 500 kV    | 230 kV    | -         |
| Alta tensión AT            | 138 kV    | 69 kV     | 46 kV     |
| Media tensión MT           | 34.5 kV   | 22 kV     | 13.8 kV   |

Fuente: [4]

### 1.2.7 Subestación eléctrica según la transformación

Según la transformación, existen subestaciones reductoras cuyo propósito es la reducción de un nivel alto a otro inferior. En cambio, las subestaciones elevadoras permiten aumentar el voltaje de un nivel bajo a otro superior [1].

### 1.3 COMPONENTES DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

Una subestación eléctrica posee diferentes componentes ya sea de origen mecánico, eléctrico y civil como excavaciones para la ubicación de equipos o edificios, vallas exteriores, cimentaciones, canalizaciones, malla de tierra, drenajes, equipos contra incendios, fuentes de energía alterna AC y continua DC, volímetros, vatímetros, contadores, entre otros [1]. En la Figura 1.10 se observa algunos de los componentes principales para una subestación eléctrica de alto voltaje estándar a la intemperie [5].

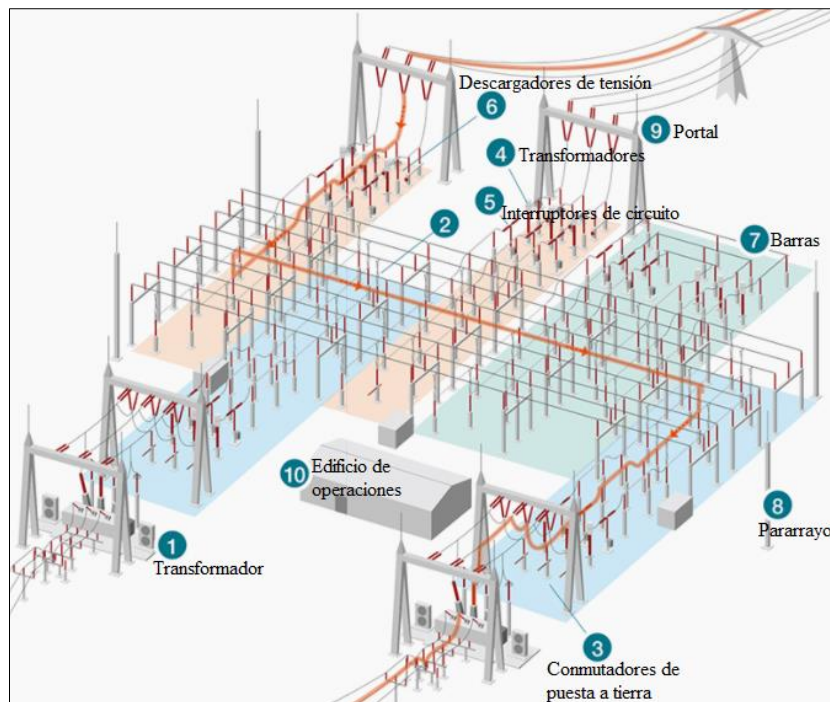


Figura 1.10. Componentes de una subestación eléctrica AT a la intemperie

Fuente: [5]

### **1.3.1 Barras**

Las barras permiten la unión de los equipos y son utilizadas para la transmisión de energía eléctrica. En una subestación posee varios arreglos de las barras como: principales, simples, seccionadas, de transferencia, interconexión, auxiliar y doble barra [6].

### **1.3.2 Conmutadores de puesta a tierra**

Estos conmutadores tienen como propósito prevenir cualquier peligro a la hora del proceso de carga, por lo tanto, ofrecen una conexión confiable y segura en la desactivación de los componentes del sistema [5].

### **1.3.3 Descargador de sobretensiones**

Los descargadores suelen estar ubicados al final de cada línea y se encargan de limitar las sobretensiones, de esta manera se obtiene un nivel de voltaje controlado [5].

### **1.3.4 Desconectores**

También denominados aisladores cuyo propósito es aislar galvánicamente instalaciones eléctricas que han sido desenergizadas con anterioridad [7].

### **1.3.5 Edificio de operaciones**

Toda subestación dispone uno o varios edificios o centros donde está presente los sistemas de control y comunicaciones. Además, contiene un almacenamiento de los equipos y repuestos eléctricos [5].

### **1.3.6 Interruptores de circuito**

Los interruptores tienen como función desconectar la continuidad de un circuito eléctrico ante una falla peligrosa o para dar mantenimiento de los equipos del sistema. Además, se utilizan contactos principales y cámaras de extinción cuando se desea interrumpir elevadas corrientes de cortocircuito, a fin de mejorar y apagar el arco producido. Por último, existen contactos auxiliares que son conectados hacia los centros de control con el objetivo de verificar el correcto fin del proceso [7].

### 1.3.7 Pararrayos

El pararrayo tiene como función la protección de personas y equipos ya que desvía las altas tensiones de las descargas atmosféricas hacia tierra [7].

### 1.3.8 Portal

El portal no es más que la estructura mecánica, cuyo fin es que debe soportar los elementos y líneas de la subestación eléctrica suspendidos en el aire [5].

### 1.3.9 Transformadores

El transformador es un convertidor de energía eléctrica reductora o elevadora. Además, existen diversos tipos de transformadores utilizados en las subestaciones eléctricas como: de máquina, potencia, monofásicos, trifásicos, banco trifásico, de varios devanados, etc. [1]. El transformador puede ser representado mediante un circuito equivalente, visto en la Figura 1.11, cuya impedancia en el lado primario se representa mediante la Ecuación 1.1 [8].

$$Z_1 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 Z_2 \quad \text{Ec. (1.1)}$$

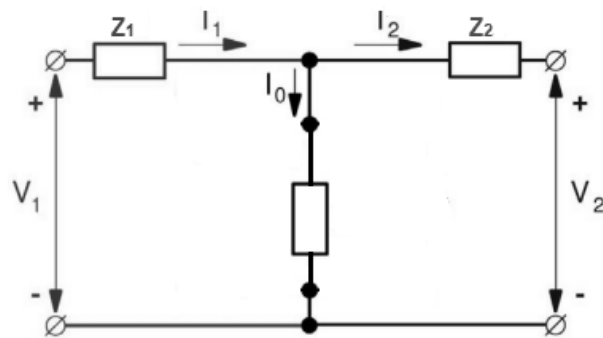


Figura 1.11. Circuito equivalente de un transformador

Fuente: [8]

## 1.4 PUESTA A TIERRA

### 1.4.1 Definición y características

Existen diversas protecciones que deben estar presentes en cualquier instalación eléctrica. Sin embargo, en este trabajo se va a exponer la importancia de una puesta a tierra; esta se define como a una instalación compuesta de cables que tienen como objetivo reducir o eliminar la diferencia de potencial peligrosa en toda la conexión metálica directa entre los componentes de una instalación [9]. Por lo general, un efectivo sistema de puesta a tierra en la subestación se

compone de conductores enterrados formando una malla, donde las conexiones van hacia varias estructuras y partes metálicas de la subestación [10].

Además, debe ser capaz de garantizar algunos factores como [6]:

- Reducción de los accidentes laborales y daño en los equipos de potencia y comunicaciones, por tanto, ofrece seguridad hacia las personas y equipos.
- Controla y disipa las sobretensiones y sobretensiones de las condiciones anormales tales como descargas atmosféricas, fallas a tierra del sistema u ondas de sobretensión.
- Aumento de la confiabilidad del sistema para disminuir las interrupciones de servicio eléctrico provocado por los transitorios, generando una alta calidad.
- Protección de las instalaciones contra algún incendio.

#### **1.4.2 Clasificación**

La puesta a tierra acorde a la aplicación se clasifica de la siguiente manera [11]:

- Para los sistemas eléctricos, tiene como fin limitar voltajes elevados provocados por contactos involuntarios con cables de voltaje superior, rayos o fenómenos de inducción. Para ello, se conecta un conductor adecuado a la corriente de falla a tierra total del sistema.
- Para los equipos eléctricos, elimina el voltaje de contacto mediante protecciones de sobrecorriente.
- En señales electrónicas, evita la contaminación con señales a diferentes frecuencias a las que normalmente se trabaja. Para ello, se colocan blindajes conectados a una tierra.
- Con referente a la protección electrónica impide el rompimiento de los elementos semiconductores ante sobrevoltajes por lo que se lleva a cabo la implementación protectora entre conductores activos y tierra.
- La puesta a tierra de protección atmosférica tiene como propósito drenar a tierra todas las corrientes producidas debido al rayo. Para ello, se coloca una malla de tierra.

#### **1.5 MALLA DE TIERRA**

La malla de tierra es un sistema compuesto por conductores, electrodos y conexiones desde el extremo de la varilla hacia los equipos del sistema eléctrico, los cuales son conectados a tierra, tal como se indica en la Figura 1.12. Además, tiene como objetivo disminuir el peligro de la

exposición a altos voltajes de contacto o paso, medidos en un lugar de operación crítica o transitada con frecuencia por las personas [12].

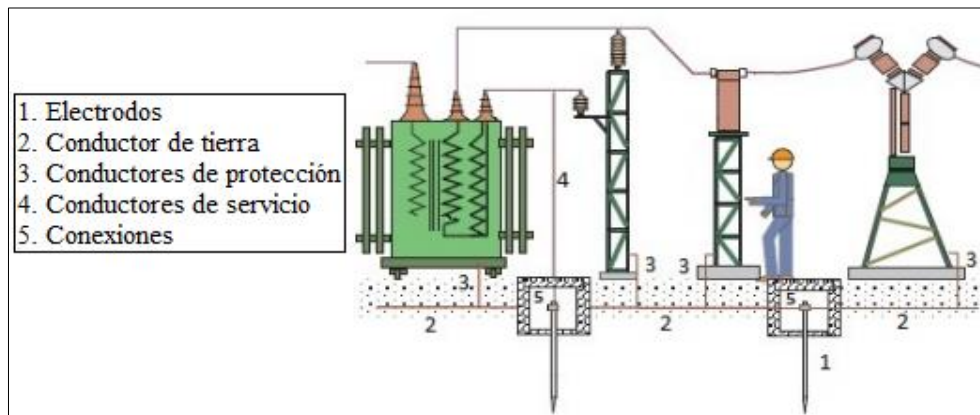


Figura 1.12. Componentes de la malla de tierra

Fuente: [13]

### 1.5.1 Electrodo de puesta a tierra

Los electrodos son materiales metálicos tales como cobre, aluminio o acero y vienen dados en forma de varilla, tubería, placas o estructura metálica subterránea. Los electrodos de varillas deben poseer una longitud mínima de 2,40 metros e instalarse por lo menos a la misma distancia de la longitud de la varilla dentro de la tierra con respecto a la horizontal del terreno. Sin embargo, si el terreno posee partes rocosas que impiden la inserción total de la varilla, puede estar a 45° o en posición horizontal, tal como se expresa en la Figura 1.13 [11].

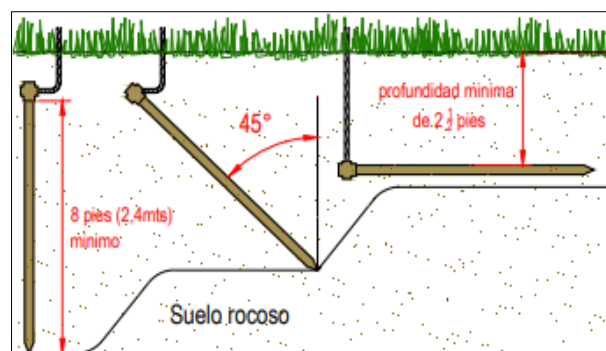


Figura 1.13. Formas de instalación de electrodos

Fuente: [11]

### 1.5.2 Conductores de tierra

El conductor de tierra o también llamado línea de enlace sirve para la conexión de los electrodos con el punto de puesta a tierra [9]. En la Tabla 1.2 se observa la relación entre el calibre del conductor de cobre AWG o MCM y la corriente  $I_f$  [6].

Tabla 1.2. Calibres de conductores de cobre para mallas de tierra

| Calibre AWG<br>o MCM | Corriente máxima de falla<br>a tierra en Amperios | Diámetro del<br>cable [mm] | Sección del<br>cable [mm <sup>2</sup> ] |
|----------------------|---|----------------------------|---|
| 10                   | -   | 2.91                       | 5.26                                    |
| 8                    | -   | 3.26                       | 8.34                                    |
| 6                    | -   | 4.11                       | 13.3                                    |
| 2                    | -   | 6.54                       | 33.6                                    |
| 1/0                  | $I_f \leq 400$                                    | 8.25                       | -                                       |
| 2/0                  | $400 < I_f \leq 5000$                             | 9.27                       | 67.4                                    |
| 3/0                  | $5000 < I_f \leq 7000$                            | 10.40                      | 85.0                                    |
| 4/0                  | $7000 < I_f \leq 8500$                            | 11.68                      | 107.2                                   |
| 250                  | $8500 < I_f \leq 10000$                           | 14.60                      | 127                                     |
| 500                  | $I_f > 10000$                                     | 20.70                      | 253                                     |

Fuente: [6]

### 1.5.3 Conductores de protección

Los conductores de protección se encargan de unir las líneas de tierra con los elementos metálicos y las masas de la instalación eléctrica. Además, deben ser de cobre aislados y la sección depende del conductor de fase tal como se indica en la Tabla 1.3 [9].

Tabla 1.3. Sección nominal para cables protectores en la instalación

| Conductores activos           | Protección mínima                                | Unidad de medida |
|-------------------------------|--|------------------|
| Sección $\leq 16$             | Sección <sub>mínima</sub> $\leq 16 \text{ mm}^2$ | mm <sup>2</sup>  |
| $16 < \text{Sección} \leq 35$ | Sección <sub>mínima</sub> = 16                   | mm <sup>2</sup>  |
| Sección $> 16$                | Sección <sub>mínima</sub> = Sección/2            | mm <sup>2</sup>  |

Fuente: [9]

Si los conductores de protección poseen el mismo material que los activos se utiliza la Tabla 1.3, caso contrario se deben colocar conductores que tengan la sección normalizada próxima superior [9].

### 1.5.4 Conductores de servicio

El conductor de servicio se encarga de la conexión del neutro a tierra por lo que necesita estar entre la instalación y la acometida a través de un punto de unión o empalme [6]. En la Tabla 1.4 se observa la sección nominal para conductores de servicio de puesta a tierra.

Tabla 1.4. Sección nominal para cables de servicio

| Acometida $S_c$         | Conductor de servicio | Unidad de medida |
|-------------------------|-----------------------|------------------|
| $S_c \leq 6$            | 4                     | mm <sup>2</sup>  |
| $10 \leq S_c \leq 25$   | 10                    | mm <sup>2</sup>  |
| $35 \leq S_c \leq 70$   | 16                    | mm <sup>2</sup>  |
| $95 \leq S_c \leq 120$  | 35                    | mm <sup>2</sup>  |
| $150 \leq S_c \leq 240$ | 50                    | mm <sup>2</sup>  |
| $300 \leq S_c \leq 400$ | 70                    | mm <sup>2</sup>  |

Fuente: [11]

### 1.5.5 Conexiones

Una de las formas de realizar conexiones eléctricas es mediante el soldado exotérmico cuyo fin es realizar un empalme eléctrico fundido en cobre. Existen diversos conectores eléctricos como abrazaderas, atornillados, sujetos con pernos, engarce o a compresión, visto en la Figura 1.14 [11].



Figura 1.14. Conectores eléctricos a la soldadura exotérmica

Fuente: [11]

## 1.6 CORRIENTE ELÉCTRICA Y VOLTAJE TOLERABLE

### 1.6.1 Efectos directos

Son lesiones provocadas ante el paso de la corriente provocando algunos efectos vistos en la Tabla 1.5 [14]:

Tabla 1.5. Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano

| Efectos producidos   | Corriente eléctrica | Causas                  |
|----------------------|---------------------|-------------------------|
| Umbral de percepción | 1 a 3 mA            | No posee peligro alguno |
| Electrización        | 3 a 10 mA           | Hormigueo               |







|                         |            |  |
|-------------------------|------------|--|
| Tetanicización          | > 10 mA    | Los músculos se bloquean impidiendo el movimiento de los brazos, músculos pectorales y manos                 |
| Paro respiratorio       | > 25 mA    | Afecta al centro nervioso respiratorio cuando la corriente eléctrica atraviesa el cerebro                    |
| Asfixia                 | 25 a 30 mA | Se da cuando la corriente circula el tórax de forma que impide el movimiento de los músculos de los pulmones |
| Fibrilación ventricular | 60 a 75 mA | Descontrol del ritmo cardiaco del corazón provocando incapacidad de bombeo de la sangre y la muerte          |

Fuente: [14]

### 1.6.2 Efectos indirectos

En la Tabla 1.6 se observa los efectos fisiológicos indirectos debido al paso de la corriente eléctrica que atraviesa el cuerpo humano provocando quemaduras y lesiones [14].

Tabla 1.6. Efectos fisiológicos indirectos

| Efectos producidos  |   | Causas                                  |
|---|---|---|
|   | Quemaduras  | Arco eléctrico                          |
|   |   | Proyección de partículas                |
|   |   | Chispas eléctricas                      |
|  | Lesiones oculares                                       | Radiaciones coligadas al arco eléctrico |
|  | Lesiones a consecuencia de explosión de gases o vapores | Ignición por arco eléctrico             |
|   |   | Ignición por chispas                    |
|   |   | Ignición por cortocircuitos             |
|  | Otras lesiones  | Caídas desde cierta altura              |
|   |   | Golpes contra objetos                   |

Fuente: [14]

### 1.6.3 Aumento de potencial máximo de malla GPR

El GPR es el valor máximo de tensión que puede alcanzar la malla con respecto a un punto de conexión de tierra lejano. Además, el cálculo es similar a la ley de Ohm ya que se determina como el producto entre la resistencia y corriente máxima de la malla [12].

### 1.6.4 Tensión de contacto

En la Figura 1.15 se muestra como una persona posee un contacto directo a una estructura conectada a tierra, por lo que se genera una diferencia de potencial entre el GPR y la superficie

donde está situada la persona. Además, la corriente de falla se descarga a través de la malla a tierra por lo que forma un circuito eléctrico con elementos resistivos tal como se expresa en la Figura 1.16 [12].

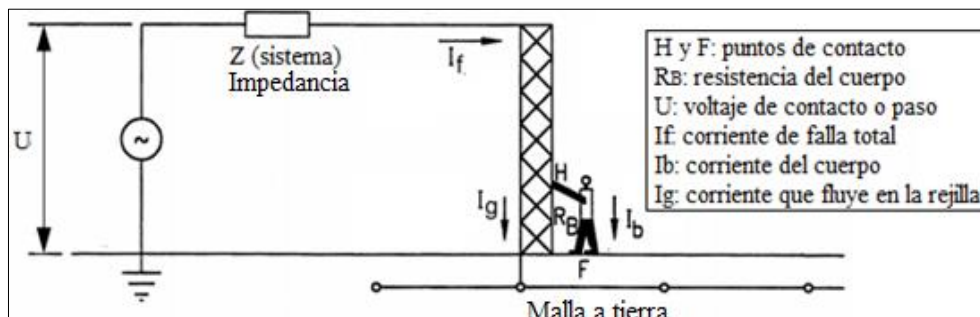


Figura 1.15. Exposición al voltaje de contacto

Fuente: [12]

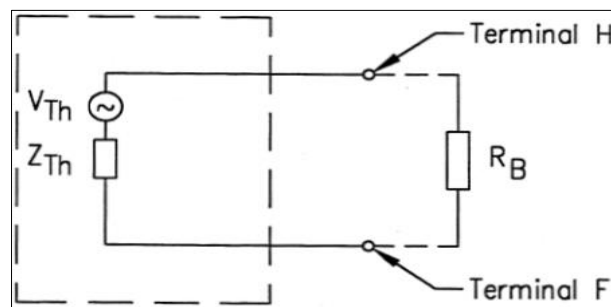


Figura 1.16. Circuito Thévenin del voltaje de contacto

Fuente: [12]

Donde la impedancia  $Z_{Th}$  es igual a la mitad de la resistencia a tierra de un pie, este es considerado como una placa circular de radio 0,08 metros. Por tal razón, la impedancia Thévenin es igual a 1,5 veces la resistividad del terreno [12].

### 1.6.5 Tensión de paso

Es el valor diferencial que percibe la persona cuando da un paso de 1 metro entre los puntos  $F1$  y  $F2$ , sin tocar algún objeto a tierra, visto en la Figura 1.17. Por último, el circuito Thévenin del voltaje de paso es similar al de contacto, salvo que se diferencia en el valor de la resistencia  $Z_{Th} = 6.0\rho$  [12].

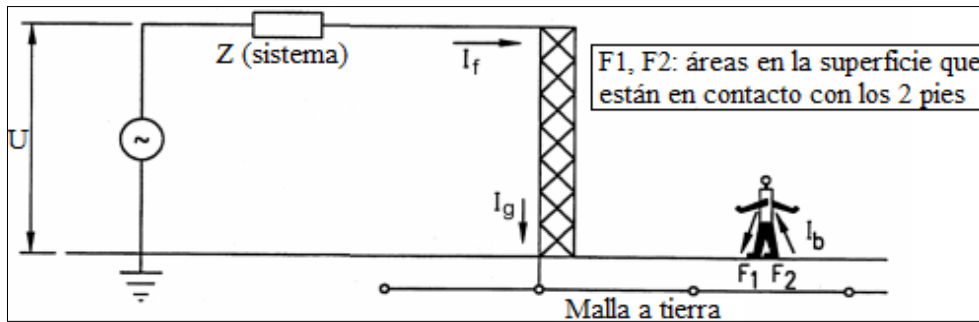


Figura 1.17. Exposición a la tensión de paso

Fuente: [12]

## 1.7 EL SUELO

### 1.7.1 Medio de unión a tierra

En su mayoría, los suelos suelen comportarse como conductores de resistencia “ $r_1, r_2, r_3, r_4$ ” y dieléctricos “ $C$ ” vistos en la Figura 1.18, donde la intensidad de corriente de carga es baja con relación a la de fuga por lo que puede representarse como una resistencia [12].

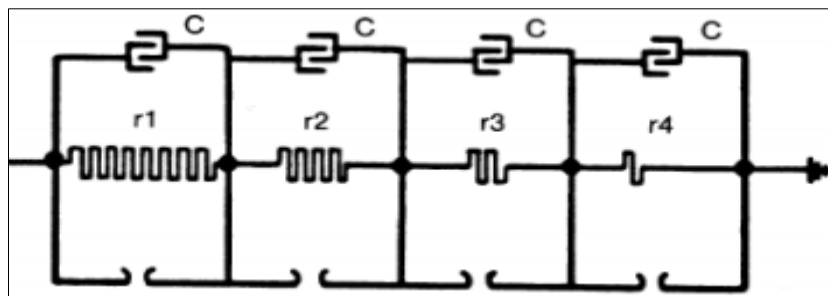


Figura 1.18. Modelo del suelo

Fuente: [12]

### 1.7.2 Gradiente del potencial y la corriente

La resistividad del suelo puede verse afectada cuando el gradiente de potencial supera un valor crítico, este suele estar en el orden de los kilovoltios por centímetro y su valor cambia dependiendo del material del suelo. Además, provocaría arcos en la superficie aumentando el tamaño efectivo del electrodo hasta que el gradiente se reduce a valores que el suelo pueda aguantar. Por lo general, los diseños de puestas a tierra en subestaciones cumplen criterios más estrictos que los límites de voltaje de contacto y paso, por tanto, el valor del gradiente de voltaje suele estar por debajo del rango crítico. En cambio, el efecto que se tiene cuando a la corriente circula por medio de los electrodos a tierra afecta directamente a la resistividad del suelo. Tanto las características térmicas como el contenido de humedad establecen si la corriente posee un secado significativo [12].

### 1.7.3 Humedad, temperatura y composición química

Cuando el contenido de humedad posee un valor menor al 15% del peso del suelo, provoca una elevación en la resistividad del terreno ya que, por lo general, el suelo posee una conducción electrolítica. Por lo tanto, la humedad depende de ciertos factores como la compacidad, el tamaño de grano y variabilidad de este. En la Figura 1.19 se observa que a valores superiores al 22% de humedad su resistividad presenta una pequeña variación. La curva 3 indica una variación común de un suelo franco arenoso al 15,2 % de humedad en peso [12].

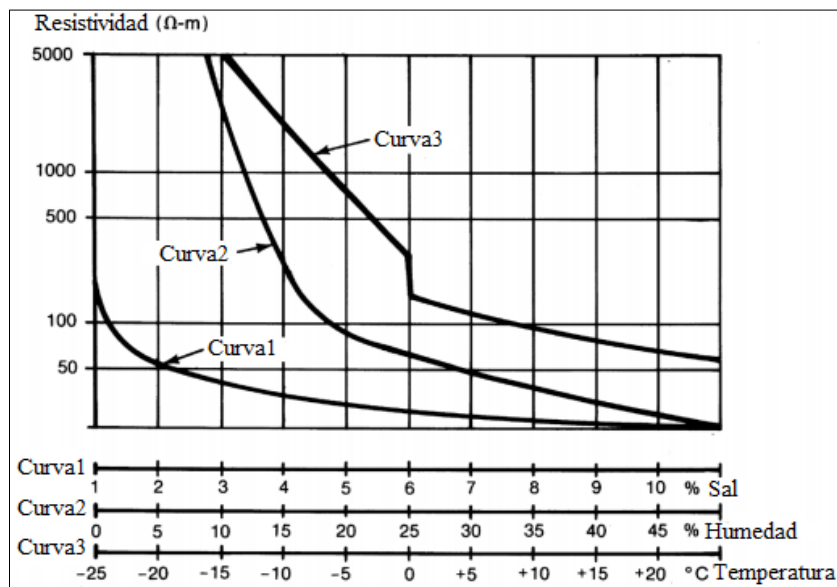


Figura 1.19. Parámetros ambientales y químicos en base a la resistividad

Fuente: [12]

En cambio, la temperatura provoca un cambio mínimo en la resistividad del suelo cuando sus valores son superiores a 0 °C para cualquiera de las tres curvas vistas en la Figura 1.19. Por último, se tiene que la composición química ya sean sales o ácidos afecta la resistividad del suelo. Un caso típico de la sal presenta al 30% de humedad en peso es tal como se indica en la curva 1 [12].

### 1.7.4 Capa superficial de material

Los recubrimientos de material o grava tienen como objetivo limitar el secado de la capa superficial del suelo, sobre todo si se emplea durante periodos largos de clima seco. Este recubrimiento es empleado para la disminución de las corrientes de choque, por tanto, el valor de la resistividad para la capa superficial de material depende de los tipos, estados (fino o

limpia) y tamaño de la piedra, cantidad y contenido de humedad, contaminación atmosférica, entre otros [12].

### 1.7.5 Modelo del suelo

Este modelo representa un acercamiento a las condiciones del suelo real y los más demandados disponibles son de dos capas y suelo uniforme. El primero posee una capa superior de suelo con profundidad finita, pero encima de la capa inferior cuya profundidad es infinita. Además, ocupa técnicas de análisis informático de Blattner y Dawalibi, Endrenyi, entre otros; pero también pueden ser determinados de forma manual, por medio del método Sunde, tal como se indica en la Figura 1.20 [12].

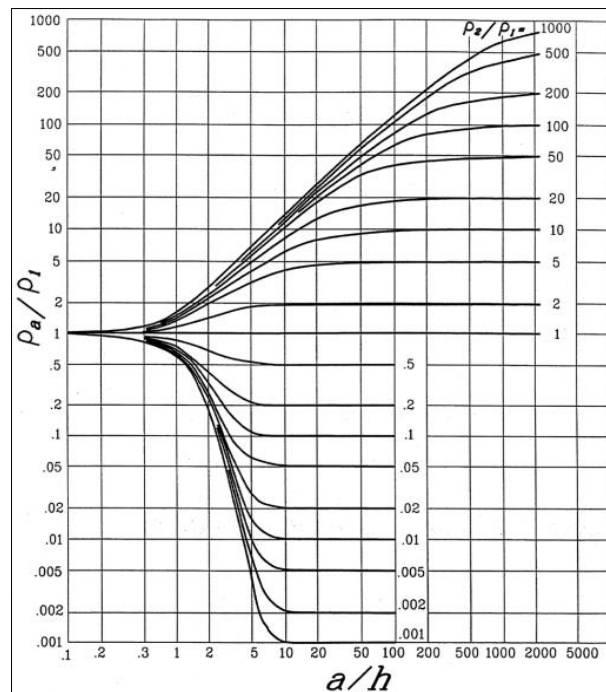


Figura 1.20. Método Sunde

Fuente: [12]

El método gráfico Sunde se utiliza para determinar la profundidad de la malla, de la siguiente manera [12]:

- **Paso 1:** con los valores de resistividad y espaciado de las puntas realizar una gráfica.
- **Paso 2:** dicho gráfico debe ser ampliado tomando como referencia las distancias mínima y máxima de la separación realizada en la parte experimental.
- **Paso 3:** calcular la razón  $\rho_2/\rho_1$  y escoger una curva del gráfico Sunde que se aproxime.

- **Paso 4:** seleccionar el valor  $(\rho_a = \rho)/\rho_1$ , este debe estar dentro de la región de la relación  $\rho_2/\rho_1$  determinada.
- **Paso 5:** calcular la profundidad de la malla mediante la gráfica Sunde.

El método de suelo uniforme se utiliza cuando el método de dos capas no puede ser empleado o debido a una variación moderada de la resistividad, donde su valor se determina mediante la Ecuación 1.2 [12].

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_n}{n_p} \quad \text{Ec. (1.2)}$$

Por medio de la Ecuación 1.3 se calcula el factor K cuyo resultado puede ser positivo o negativo, este último puede significar que la capa superior es más resistente a la inferior y que los voltajes de contacto y paso sean inferiores a las del sistema de puesta a tierra; en caso de que su valor sea positivo ocurre lo contrario [12].

$$K = \frac{\rho_s - \rho_1}{\rho_s + \rho_1} \quad \text{Ec. (1.3)}$$

## 1.8 RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD

Por lo general, en las subestaciones de distribución la impedancia suele ser resistiva y medida en los electrodos de puesta a tierra. Por medio de la norma IEEE Std 81-2012 se establecen varios métodos para la medición de la resistencia de tierra y resistividad del terreno [10].

### 1.8.1 Método de 2 puntos

La medición de la resistencia se realiza entre el electrodo principal y auxiliar que es una tubería metálica, tal como se observa en la Figura 1.21. Además, dicha resistencia de la tierra auxiliar es extremadamente baja con el electrodo principal por lo que la magnitud medida es de la puesta a tierra. El método de 2 puntos es usado en las instalaciones residenciales [11].

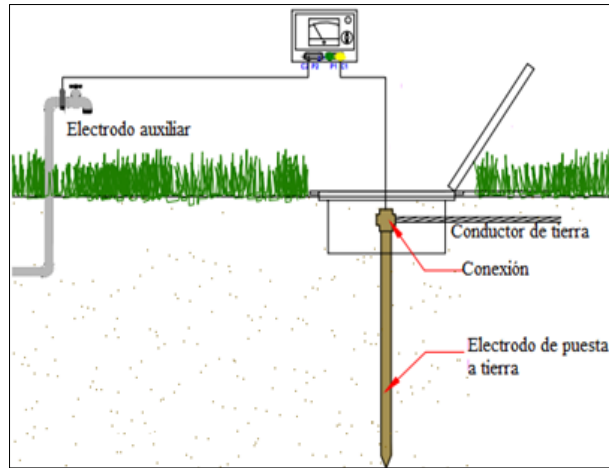


Figura 1.21. Método de dos puntos

Fuente: [11]

### 1.8.2 Método de 3 puntos

El método de tres puntos utiliza dos electrodos auxiliares con sus resistencias  $r_2$  y  $r_3$  y la principal o sujeto de prueba se denomina como  $r_1$ . La medición se realiza entre cada par de electrodos  $r_{12}$ ,  $r_{13}$  y  $r_{23}$ , por lo tanto, la resistencia  $r_1$  se calcula mediante la Ecuación 1.4. Además, los electrodos deben estar espaciados a una gran distancia a fin de reducir la resistencia mutua entre sí [10].

$$r_1 = \frac{r_{12} - r_{23} + r_{13}}{2} \quad \text{Ec. (1.4)}$$

Para medir la resistencia de tierra, los electrodos deben estar separados a una distancia mínima de tres veces la profundidad de la varilla, es decir que la distancia entre  $r_1$  y  $r_3$  debe ser mayor a 15 metros, tal como se indica en la Figura 1.22 [10].

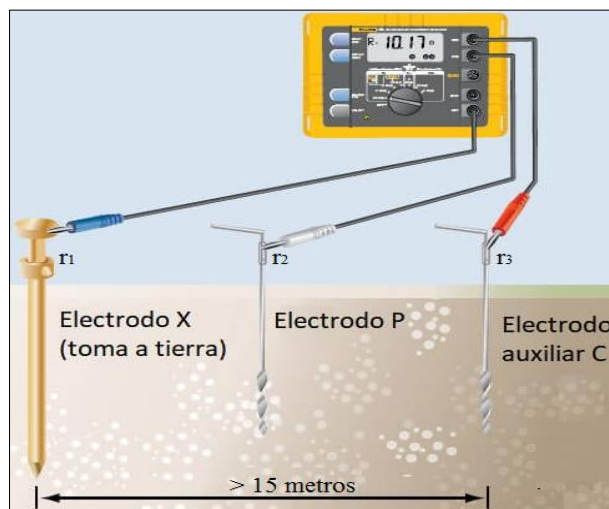


Figura 1.22. Método de los tres puntos

Fuente: [15]

Se realiza varias mediciones de tierra en reciprocidad al aumento de la profundidad de la varilla con el objeto de exigir más corriente de prueba a través del suelo. Además, refleja la resistividad aparente en base al valor de la resistencia medida para cada profundidad de la varilla de cobre, ésta presenta dos ventajas y una desventaja enunciadas a continuación [10]:

- Posee una buena precisión del valor teórico de la resistencia de la varilla de tierra.
- La profundidad se puede determinar mediante la conducción de barras de tierra.
- El único inconveniente del uso de este método radica en la vibración al impulso de la varilla, provocando un mal contacto con el suelo y se dificulta determinar la resistividad aparente verdadera.

Este método provee información de la naturaleza del suelo a proximidades de la varilla de tierra. En caso de que se amplie el espacio en donde va a realizarse el estudio de la resistividad, es preferible emplear el método de 4 puntos [10].

### 1.8.3 Método de caída de potencial FOP

El método FOP consiste en pasar corriente desde la sonda de corriente “CP” hasta el electrodo de tierra “G”, luego medir el potencial entre la sonda de voltaje “PP” y el electrodo G, tal como se observa en la Figura 1.23. Para ello, la sonda de corriente debe estar a una distancia “D” con respecto al electrodo de tierra y la sonda de voltaje tener una distancia del 62 % que la sonda de corriente. Cabe mencionar que la sonda de voltaje puede estar colocado en la misma dirección de la sonda de corriente o en sentido opuesto [10].

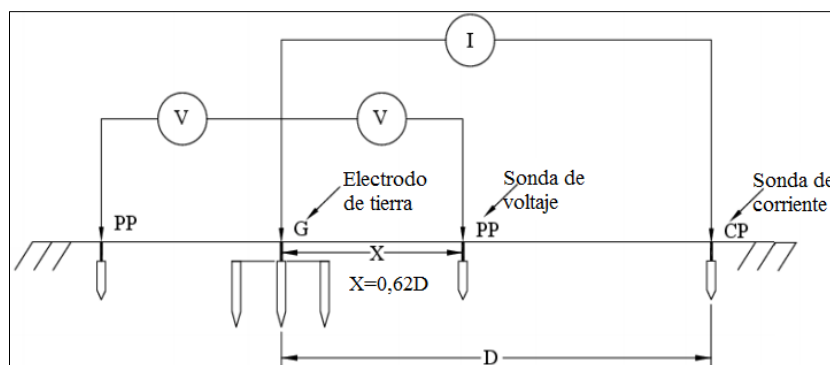


Figura 1.23. Método de caída de potencial

Fuente: [10]



### 1.8.4 Método de Wenner

Es un método de 4 puntos, donde las sondas de voltaje y corriente poseen una distribución uniforme entre ellas, tal como se indica en la Figura 1.24. Por lo tanto, la resistividad “ $\rho$ ” se calcula en base a las longitudes “ $a$ ” y “ $b$ ” indicado en la Ecuación 1.5. Si en la práctica, los electrodos se colocan en línea recta con una profundidad no mayor a la décima parte entre la separación del par de electrodos se asume que la distancia “ $b$ ” es cero, obteniendo una expresión indicada en la Ecuación 1.6. Una desventaja del uso de este método radica en la disminución del potencial cuando el espaciado entre sondas es relativamente alto [10].

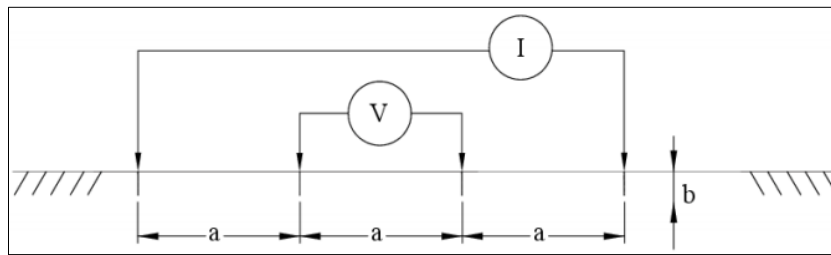


Figura 1.24. Método de Wenner

Fuente: [10]

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad \text{Ec. (1.5)}$$

$$\rho = 2\pi a R; \quad R [\Omega] = V/I \quad \text{Ec. (1.6)}$$

### 1.8.5 Método de Schlumberger

Este método es una variación del Wenner ya que utiliza cuatro electrodos, pero con una diferente distribución de las sondas, tal como se indica en la Figura 1.25. Las sondas internas poseen una distancia menor a las externas, donde la distancia “ $c$ ” debe ser mayor a 2 veces la distancia “ $d$ ”. Por lo tanto, este método se aplica para grandes distancias o acelerar la prueba de múltiples ubicaciones de sondas de corriente. Por último, se obtiene el valor de la resistividad del terreno mediante la Ecuación 1.7 [10].

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d}; \quad c > 2d \quad \text{Ec. (1.7)}$$

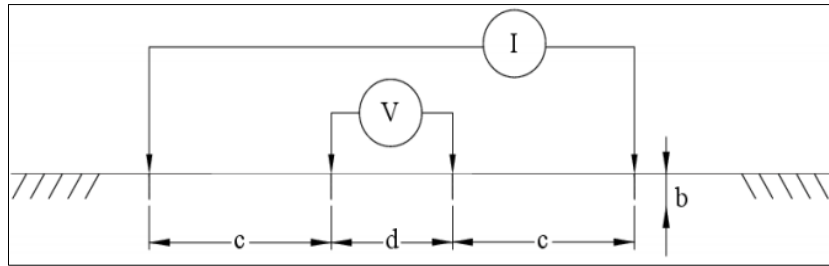


Figura 1.25. Método de Schlumberger

Fuente: [10]

## 1.9 ASPECTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE LA MALLA EN SUBESTACIONES

Por lo general, en una subestación eléctrica abarca un conjunto de equipos pesados y estructuras. A continuación, se detallan un grupo de ideas básicas pero esenciales en el diseño de la malla a tierra [12]:

- Mediante un lazo de bucle cubrir lo máximo posible el perímetro de la superficie, este lazo ayuda a evitar altos gradientes de potencial y corrientes elevadas.
- Se colocan en líneas paralelas a los conductores en el bucle, también en los equipos y estructuras a fin de establecer conexiones a tierras cortas.
- Puede incluir conductores de cobre desnudo con calibre 4/0 AWG.
- La malla debe estar enterrada a una profundidad de 0.3 a 0.5 metros y espaciados entre 3 a 7 metros.
- Las tomas de tierra pueden estar ubicadas en los siguientes puntos:
  - Esquinas y puntos de conexión de la malla.
  - Instaladas en los equipos pesados, más que todo en aquellos que posean protección contra sobrevoltajes.
- Se utiliza varillas de tierra cuando el modelo de suelo es de varias capas o presenta una alta resistencia óhmica.
- El área de la malla de tierra suele extenderse sobre toda la estación incluyendo la cerca metálica, en algunos casos, se puede extender aún en caso de ser necesario.

## 1.10 NORMATIVA PARA PUESTA A TIERRA

### 1.10.1 Norma IEEE Std 81-2012

La norma IEEE Std 81-2012 provee los métodos de medición para la resistencia de tierra y resistividad del terreno, tal como se mencionó en el Apartado 1.8.

### 1.10.2 Norma IEEE Std 80-2013

En la Tabla 1.7 se expone las resistencias máximas que debe tener una puesta a tierra bajo la norma IEEE Std 80-2013.

Tabla 1.7. Resistencia máxima de puesta a tierra

| Descripción                               |                         | Resistencia [ $\Omega$ ] |
|---|-------------------------|--------------------------|
| Subestaciones                             | Alta o muy alta tensión | 1                        |
|   | Media tensión           | 10                       |
| Neutro de acometida                       | Baja tensión            | 25                       |
| Descargas electrostáticas                 |                         |                          |
| Protección contra rayos                   |                         | 4                        |
| Alta sensibilidad de equipos electrónicos |                         | 5                        |

Fuente: [12]

Mediante la Figura 1.26 se observa un diagrama de los pasos necesarios para elaborar un buen sistema de puesta a tierra en base a la norma IEEE80-2013.

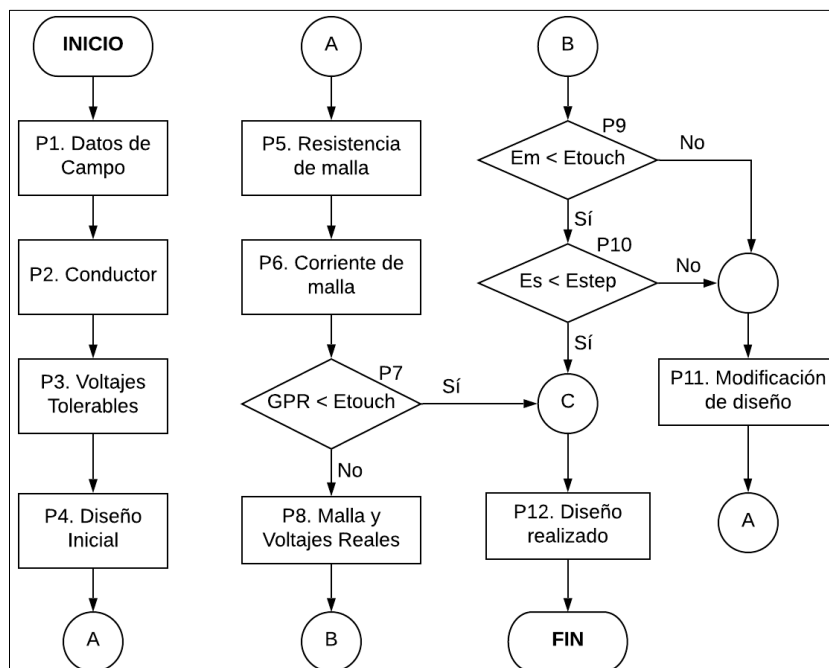


Figura 1.26. Puesta a tierra IEEE80-2013

Fuente: [12]

- **Paso 1.** Establecer la resistividad del terreno, para ello se recurre a los métodos empleados de la norma IEEE 81-2012, visto en el Apartador 1.8.
- **Paso 2.** En la Tabla 1.8 se expone los diferentes valores de las constantes  $T_m$  y  $K_f$  del conductor a una temperatura ambiente de  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , con estos valores se determina la sección transversal del conductor, visto en la Ecuación 1.8.

$$\begin{cases} A_{\text{kcmil}} = I_o * K_f * \sqrt{t_f} \\ A_{\text{mm}^2} = 0.5067 * A_{\text{kcmil}} = \frac{\pi d^2}{4} \end{cases} \quad \text{Ec. (1.8)}$$

Tabla 1.8. Constantes de materiales del conductor

| Materiales       |             |          | Conexiones          | $T_m\text{ }^\circ\text{C}$ | $K_f$ |
|------------------|-------------|----------|---------------------|-----------------------------|-------|
| Principal        | Resistencia | Capas    |                     |                             |       |
| Cobre            | Blando      | -        | -                   | 1083                        | 7     |
|                  | Duro        |          | Soldado exotérmico  | 1084                        | 7,06  |
|                  |             |          | Mecánicas a presión | 250                         | 11,78 |
| Alambre de acero |             | Cobre    | -                   | 1084                        | 10,45 |
|                  |             | Aluminio |                     | 657                         | 17,26 |
| Varilla de acero |             | Cobre    |                     | 1084                        | 14,64 |
|                  |             | Zinc     |                     | 419                         | 28,96 |

Fuente: [12]

- **Paso 3.** Por medio de la Ecuación 1.9 se determina el voltaje de paso para una persona de 50 kg o 70 kg; en cambio, en la Ecuación 1.10 se expresa el voltaje de contacto. Si la capa superficial no es grava, entonces  $\rho_s = \rho$ .

$$\begin{cases} E_{\text{step50kg}} = \frac{0.116(1000 + 6C_s * \rho_s)}{\sqrt{t_s}} \\ E_{\text{step70kg}} = \frac{0.157(1000 + 6C_s * \rho_s)}{\sqrt{t_s}} \end{cases} \quad \text{Ec. (1.9)}$$

$$\begin{cases} E_{\text{touch50kg}} = \frac{0.116(1000 + 1.5C_s * \rho_s)}{\sqrt{t_s}} \\ E_{\text{touch70kg}} = \frac{0.157(1000 + 1.5C_s * \rho_s)}{\sqrt{t_s}} \end{cases} \quad \text{Ec. (1.10)}$$

El factor de decremento  $C_s$  se determina mediante la Ecuación 1.11.

$$C_g = 1 - \frac{0.09(1 - \rho/\rho_s)}{2h_g + 0.09} \quad \text{Ec. (1.11)}$$

- **Paso 4.** Una vez obtenido los valores medidos y calculados en los pasos anteriores, se procede con el diseño inicial, donde se coloca el número, longitud y área de la malla de tierra.
- **Paso 5.** Por medio de la Ecuación 1.12 se determina la resistencia de la malla para un terreno uniforme.

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad \text{Ec. (1.12)}$$

- **Paso 6.** Las corrientes de malla y falla se calculan bajo las Ecuaciones 1.13 y 1.14, respectivamente.

$$I_G = D_f * I_g = D_f * S_f * I_o \quad \text{Ec. (1.13)}$$

$$I_o = \frac{3}{\sqrt{3}} \left( \frac{V_{Th}}{|Z_{Th} + R_B|} \right) = \frac{E}{3R_f + R_0 + R_1 + R_2 + i(X_0 + X_1 + X_2)} \quad \text{Ec. (1.14)}$$

Por medio de la Tabla 1.9 se puede determinar el factor  $D_f$  y tiempo  $t_f$ .

Tabla 1.9. Valores típicos de  $D_f$  y  $t_f$

| Duración $t_f$ |                | Factor $D_f$ |        |        |        |
|----------------|----------------|--------------|--------|--------|--------|
| Segundos       | Ciclos a 60 Hz | X/R=10       | X/R=20 | X/R=30 | X/R=40 |
| 0.00833        | 0.5            | 1.576        | 1.648  | 1.675  | 1.688  |
| 0.05           | 3              | 1.232        | 1.378  | 1.462  | 1.515  |
| 0.10           | 6              | 1.125        | 1.232  | 1.316  | 1.378  |
| 0.20           | 12             | 1.064        | 1.125  | 1.181  | 1.232  |
| 0.30           | 18             | 1.043        | 1.085  | 1.125  | 1.163  |
| 0.40           | 24             | 1.033        | 1.064  | 1.095  | 1.125  |
| 0.50           | 30             | 1.026        | 1.052  | 1.077  | 1.101  |
| 0.75           | 45             | 1.018        | 1.035  | 1.052  | 1.068  |
| 1.00           | 60             | 1.013        | 1.026  | 1.039  | 1.052  |

Fuente: [12]

- **Paso 7.** El potencial GPR se calcula mediante la Ecuación 1.15, este valor es comparado con el voltaje de contacto tolerable, como se indicó en la Figura 1.26. En caso de que GPR

sea menor a  $E_{touch}$  se coloca a tierra los equipos (paso 12); caso contrario se procede con el paso 8.

$$GPR = I_G * R_g \quad \text{Ec. (1.15)}$$

- **Paso 8.** Se calcula los voltajes de paso y contacto reales mediante las Ecuaciones 1.16 y 1.17.

$$E_s = \frac{\rho * K_s * K_i * I_G}{L_s} = \frac{\rho * K_s * K_i * I_G}{0.75L_C + 0.85L_R} \quad \text{Ec. (1.16)}$$

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_G}{L_M} \quad \text{Ec. (1.17)}$$

Los factores  $K_s$ ,  $K_i$  y  $K_m$  se determinan, tal como se indica en la Ecuación 1.18.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1-0.5^{(n-2)}}{D} \right] \\ K_i = 0.644 + 0.148n \\ K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \\ K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd_{\min}} + \frac{(2hD)^2}{8d_{\min}D} - \frac{h}{4d_{\min}} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \end{array} \right. \quad \text{Ec. (1.18)}$$

En la Tabla 1.10 se observa el valor de  $K_{ii}$  con/sin varillas de aterrizaje.

Tabla 1.10. Factores de ponderación  $K_{ii}$

| Factor de ponderación  | Condición                                 |
|------------------------|---|
| 1                      | Con varillas de aterrizaje                |
| $\frac{1}{(2n)^{2/n}}$ | Con pocas o ninguna varilla de aterrizaje |

Fuente: [12]

Por medio de la Ecuación 1.19 se calcula la cantidad de conductores paralelos de la malla.

$$\left\{ \begin{array}{l} n = n_a * n_b * n_c * n_d \\ n_a = \frac{2L_C}{L_p}; n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}; n_c = \left( \frac{L_x L_y}{A} \right)^{0.7A/L_x L_y}; n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \end{array} \right. \quad \text{Ec. (1.19)}$$

Si es una malla cuadrada, entonces  $n_b = n_c = n_d = 1$  quedando el número efectivo de conductores como indica la Ecuación 1.20.

$$n = \frac{2L_C}{L_p} \quad \text{Ec. (1.20)}$$

Si es una malla rectangular, entonces  $n_c = n_d = 1$  quedando el número efectivo de conductores como indica en la Ecuación 1.21.

$$n = \frac{2L_C}{\sqrt{4L_p\sqrt{A}}} \quad \text{Ec. (1.21)}$$

Si es una malla en forma de L, entonces  $n_d = 1$  quedando el número efectivo de conductores como indica la Ecuación 1.22.

$$n = \left( \frac{2L_C}{\sqrt{4L_p\sqrt{A}}} \right) \left( \frac{L_x L_y}{A} \right)^{0.7A/L_x L_y} \quad \text{Ec. (1.22)}$$

Por último, la longitud  $L_M$  se calcula mediante la Ecuación 2.23.

$$L_M = L_C + L_R \quad \text{Ec. (1.23)}$$

- **Paso 9.** Se evalúa la condición entre los voltajes donde si el de malla es inferior al tolerable se procede con el paso 10; caso contrario, seguir el paso 11.
- **Paso 10.** Si el voltaje de paso real es inferior al tolerable, implica que la malla a tierra cumple con la normativa (Paso 12). En caso de ser un valor superior, seguir el paso 11.
- **Paso 11.** Cuando los valores reales son mayores a los calculados, se debe modificar el diseño inicial y volver al paso 5.
- **Paso 12.** Se establece finalizado el diseño de puesta a tierra.

### 1.10.3 Reglamento RCE

El reglamento RCE está dedicado a las instalaciones de centrales eléctricas y transformación o subestaciones donde el voltaje nominal eficaz es mayor a un 1 kilo voltio entre dos conductores a frecuencias de red menores a 100 Hz. Además, se aplica en todo ámbito referente a la

producción y transformación de energía eléctrica. Los pasos para una puesta a tierra son similares a la norma IEEE 80-2013, por lo que en este apartado se va a exponer algunas consideraciones referentes a las subestaciones [16]:

- Si existen centros de transformación instalados en las subestaciones, no deben estar presentes las líneas de baja tensión salvo que posean una protección de tierra común con la línea de alta a fin de obtener una equipotencialidad de tierras o si la alimentación se emplee con transformadores de aislamiento.
- Las varillas de cobre deben ser de un diámetro igual o superior a los 14 milímetros y una sección mínima de 50 mm<sup>2</sup>.
- La resistencia de tierra del electrodo presente en una malla eléctrica se calcula bajo la Ecuación 1.24.

$$R = \rho \left( \frac{1}{4r} - \frac{1}{L_c} \right) \quad \text{Ec. (1.24)}$$

#### **1.10.4 Norma UNE-EN 50522**

Cuando en alguna instalación eléctrica se trabaja con corriente alterna y el voltaje es superior a 1 kV, se aplica la norma española UNE-EN 50522 cuyo procedimiento es similar a la IEEE80-2013. A continuación, se detallan las medidas para evitar los voltajes transferidos desde el sistema de alta a baja tensión [17]:

- Se puede realizar una interconexión o distanciamiento de la puesta a tierra cuando los sistemas de alta y baja tensión están cercanos uno del otro. Además, en el sistema de baja tensión puede utilizar un valor proporcional del potencial GPR del sistema de alta tensión.
- Si una instalación auxiliar de baja tensión está ubicada dentro del sistema de alta tensión, la puesta a tierra debe estar interconectada.



## CAPÍTULO 2

### SUBESTACIÓN PALESTINA

#### 2.1 GENERALIDADES

La Empresa CNEL EP Unidad de Negocio Guayas los Ríos cuenta con un área de prestación de servicios de energía eléctrica del 65 y 27% a las provincias del Guayas y Los Ríos, respectivamente; y lo restante a poblaciones vecinas de Cotopaxi, Manabí y Santo Domingo de los Tsáchilas. Además, cuenta con 34 subestaciones, 11 líneas de subtransmisión de 69 kV y aproximadamente 7845 km de redes de media tensión. Entre ellas se encuentra la subestación Palestina cuyo propósito es el abastecimiento de energía eléctrica al cantón Palestina (ver Figura 2.1) ubicado a 80 km de Guayaquil, es decir, que se encuentra en el centro-norte de la provincia [18].

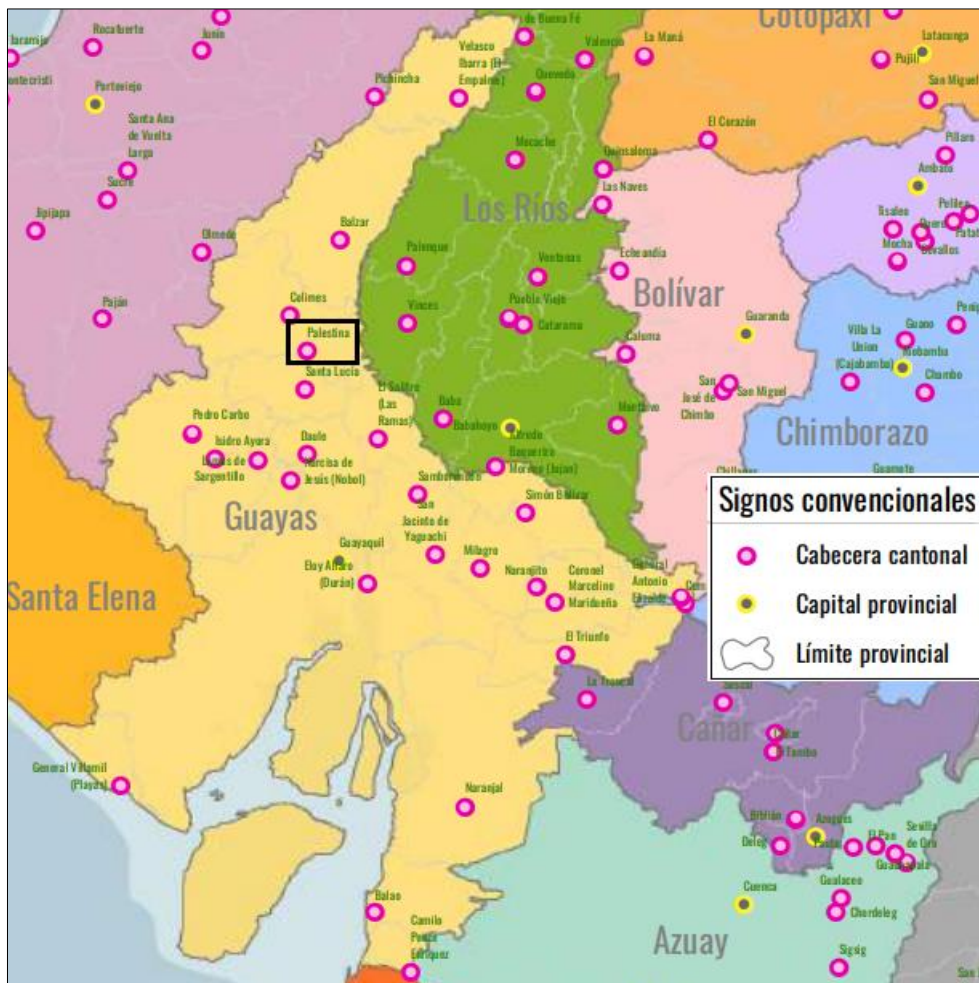


Figura 2.1. Cabecera cantonal Palestina

Fuente: [18]

## 2.2 SITUACIÓN ACTUAL

La Subestación Palestina cuenta con un área total de 1985 m<sup>2</sup> visto en la Figura 2.2; el cual dispone de varias estancias como [19]:

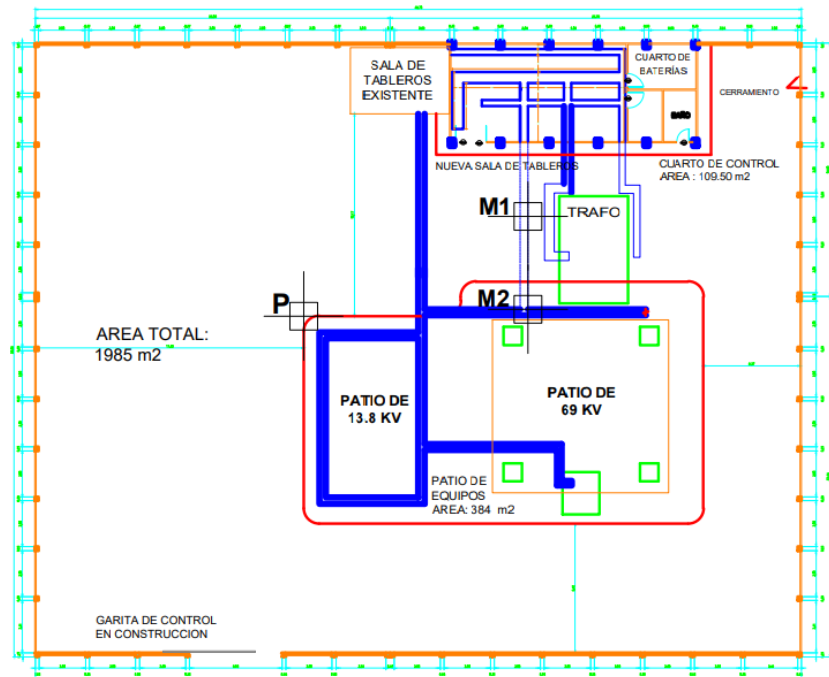


Figura 2.2. Subestación Palestina

Fuente: [19]

- 2 patios de seccionamiento cuyos voltajes son de 69 y 13.8 kV, cuyas capacidades son de 10/12 y 5 MVA, respectivamente.
- 1 cuarto donde se encuentran los tableros de control, visto en la Figura 2.3.



Figura 2.3. Tableros de control

Fuente: Autores

- 2 transformadores mostrados en la Figura 2.4.



Figura 2.4. Transformadores

Fuente: Autores

### 2.3 TIPO DE SUBESTACIÓN ELÉCTRICA S/E

A continuación, se detalla la clasificación de la S/E Palestina en base a lo detallado en el Apartado 1.2:

- S/E según la función:
  - De maniobra, visto en la Figura 2.5.a).
  - De transformación pura, visto en la Figura 2.5.b).



Figura 2.5. S/E Palestina según el tipo de función

Fuente: Autores

- En la Figura 2.16 se muestra que la construcción de la subestación es de tipo exterior.



Figura 2.6. S/E Palestina según el tipo de construcción

Fuente: Autores

- La S/E Palestina es una subestación fija ya que no cambian de posición (ver Figura 2.6).
- Posee un aislamiento en aire AIS (ver Figura 2.7).
- La S/E Palestina se encuentra en una zona rural (ver Figura 2.6).
- En la Figura 2.2 se observa los niveles de tensión que existen en la S/E Palestina, tales que posee una alta tensión “AT-2” de 69 kV y una media tensión “MT-3” de 13.8 kV.
- Como se ha mencionado anteriormente, la S/E Palestina posee una subestación reductora.



Figura 2.7. S/E Palestina según el tipo de aislamiento

Fuente: Autores

## 2.4 ANÁLISIS DE LA MALLA DE TIERRA

En el Apartado 4 se realiza el cálculo de la resistencia de la malla actual de puesta a tierra, tal como se indica en la Figura 2.8. Además, la subestación Palestina cuenta con los siguientes parámetros:

- Malla cuadrada  $A=625 \text{ m}^2$ , enterrada a una profundidad  $h=0.80 \text{ m}$ .

- Se utiliza 7 varillas de aterrizaje de 1.80 metros enterradas a 3 m de profundidad.
- 5 metros en el espaciamiento entre conductores, unidos con grapas tipo C (mecánicas a presión).
- Cable 2/0 AWG de la malla.

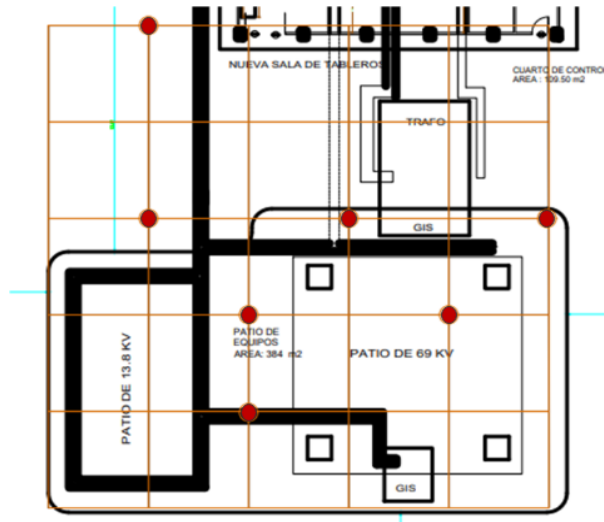


Figura 2.8. Malla actual a tierra Subestación Palestina

Fuente: [19]

Como se tiene que los conductores de malla y protección son 2/0 AWG y mediante las Tablas 1.2 y 1.3 se necesita de un conductor de protección mínima de 2 AWG que en este caso cumple el cometido. Sin embargo, se encuentran sueltos y no se encuentran bien aterrizados, mostrado en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Conductor de protección existente

Fuente: Autores

## CAPÍTULO 3

### MEDICIONES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

#### 3.1 COMPROBADOR DE PUESTA A TIERRA

Se dispone de un equipo Fluke 1625-2 GEO (Figura 3.1) que posee una protección IP56, lo cual ayuda al uso en exteriores. Además, tiene la capacidad de almacenar hasta un máximo de 1500 datos y ser descargados mediante el puerto USB. Por consiguiente, el equipo es de fácil uso y permite medir resistencias por medio de los métodos detallados a continuación [20]:



Figura 3.1. Comprobador de puesta a tierra Fluke 1625-2

Fuente: [20]

- Caída de potencial de 3 y 4 puntos usando picas (electrodos).
- Comprobación sin picas y 2 pinzas; este método consiste en inducir un voltaje por una de las pinzas, mientras que la otra mide corriente a fin de determinar la resistencia de la varilla de puesta a tierra.
- Comprobación selectiva por medio de una pinza y varias picas.
- Por último, se tiene la comprobación de resistividad usando picas y el método de cuatro puntos.

El Fluke 1625-2 GEO tiene la capacidad de indicar al usuario qué pinzas o picas se deben conectar y posee otras características técnicas que están detalladas en la Tabla 3.1 [20].

Tabla 3.1. Características Fluke 1625-2 GEO con el método de 4 hilos

| Características                      | Valor             | Medida             |
|--------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Voltaje de seguridad máxima a tierra | 50                | V                  |
| Fuente de alimentación auxiliar      | 9                 | V                  |
| Voltaje de medición                  | 20                | V                  |
| Corriente de cortocircuito           | 250               | mA                 |
| Resistencia                          | 0.02 a 300        | k $\Omega$         |
| Resolución (múltiplos de 10)         | 0.001 a 100       | $\Omega$           |
| Precisión y error de la lectura      | $\pm 2$ y $\pm 5$ | %                  |
| Temperatura de trabajo               | -10 a 50          | $^{\circ}\text{C}$ |

Fuente: [20]

### 3.2 MEDICIONES DE RESISTENCIA

Se aplica el método Wenner (ver Apartado 1.8.3) para establecer el valor de resistencia de puesta a tierra. Para ello, se debe colocar la perilla giratoria en la posición 4 polos, visto en la Figura 3.2.a) y, por consiguiente, se conectan y se colocan los 4 electrodos tal como se indica en la Figura 3.2.b) [20].

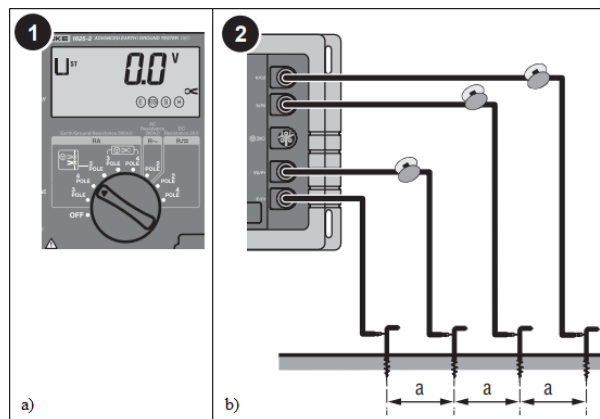


Figura 3.2. Método Wenner mediante el Fluke 1625-2

Fuente: [20]

Del área total de la subestación, se ha escogido como punto céntrico el punto P para las pruebas experimentales de la Figura 2.2 y se ha tomado como referencias el eje horizontal “X” y vertical “Y”, tal como se indica en las Figuras 3.3 y 3.4.

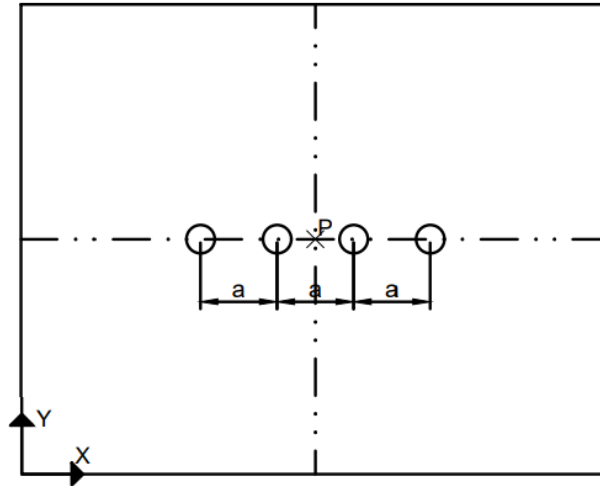


Figura 3.3. Método Wenner sobre el eje X

Fuente: Autores

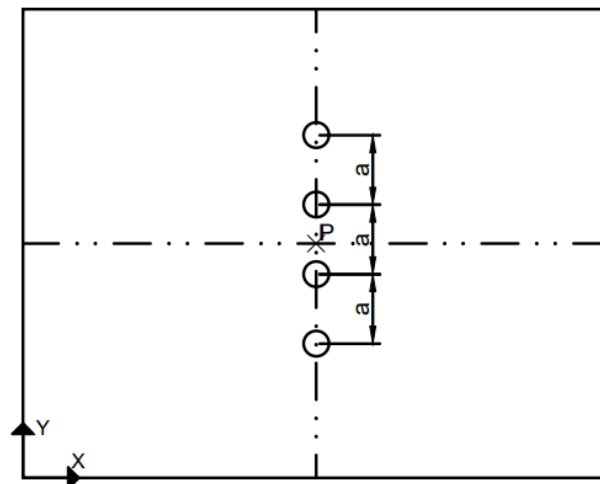


Figura 3.4. Método Wenner sobre el eje Y

Fuente: Autores

Además, en las Figuras 3.5 a la 3.11 y Tabla 3.2 se detallan los valores de resistencia medidos sobre los ejes mencionados.

Tabla 3.2. Resistencia medida por medio del Método de Wenner

| Ejes | Separación |        | Resistencia |          |
|------|------------|--------|-------------|----------|
|      | a          | Medida | R           | Medida   |
| X    | 1          | metro  | 20.84       | $\Omega$ |
| X    | 2          | metros | 3.95        | $\Omega$ |
| X    | 3          | metros | 0.90        | $\Omega$ |
| X    | 6          | metros | 0.32        | $\Omega$ |
| Y    | 1          | metro  | 13.5        | $\Omega$ |
| Y    | 3          | metro  | 2.11        | $\Omega$ |
| Y    | 6          | metro  | 1.49        | $\Omega$ |



Fuente: Autores

La resistencia presenta un valor de  $20.84 \Omega$  cuando la separación entre los electrodos es de 1 metro, en el sentido del eje X, tal como se indica en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Resistencia medida a 1 metro de separación sobre el eje X

Fuente: Autores

En la Figura 3.6 se observa que la resistencia posee una magnitud de  $3.95 \Omega$  cuando la separación entre los electrodos es de 2 metros, en el sentido del eje X.



Figura 3.6. Resistencia medida a 2 metros de separación sobre el eje X

Fuente: Autores

Cuando la separación entre los electrodos es de 3 metros y está en el sentido del eje X, presenta una resistencia igual a  $0.9 \Omega$ , tal como se indica en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Resistencia medida a 3 metros de separación sobre el eje X

Fuente: Autores

En la Figura 3.8 se observa que la resistencia es igual a  $0.32 \Omega$  cuando la separación entre los electrodos es de 6 metros, en el sentido del eje X.



Figura 3.8. Resistencia medida a 6 metros de separación sobre el eje X

Fuente: Autores

La resistencia es igual a  $13.5 \Omega$  cuando la separación entre los electrodos es de 1 metro, en el sentido del eje Y (ver Figura 3.9).



Figura 3.9. Resistencia medida a 1 metro de separación sobre el eje Y

Fuente: Autores

En la Figura 3.10 se observa que la resistencia posee un valor de  $2.11 \Omega$  cuando la separación entre los electrodos es de 3 metros, en el sentido del eje Y.



Figura 3.10. Resistencia medida a 3 metros de separación sobre el eje Y

Fuente: Autores

La resistencia presenta un valor de  $1.49 \Omega$  cuando la separación entre los electrodos es de 6 metros, en el sentido del eje Y (ver Figura 3.11).



Figura 3.11. Resistencia medida a 6 metros de separación sobre el eje Y

Fuente: Autores

## CAPÍTULO 4

### SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Acorde a lo establecido en el Apartado 1.10.2, se procede con el análisis de la malla actual y rediseño, utilizando los pasos descritos de la norma IEEE80-2013.

#### 4.1 MALLA DE TIERRA ACTUAL

Siguiendo los pasos de la normativa se evalúa que la resistencia cumpla o no con los valores establecidos de la Tabla 1.7. Existen 4 pasos previos al cálculo como los datos de campo, conductor, voltajes tolerables y diseño inicial; todos se utilizan a excepción de los voltajes tolerables para determinar el valor de la resistencia por lo que se va a obviar en este Apartado.

##### 4.1.1 Datos de campo

En la Tabla 4.1 se observa los valores de resistividad del suelo en base a los datos adquiridos en campo. Para ello, se realizan 7 mediciones bajo el método de Wenner con el comprobador de puesta a tierra Fluke 1625-2 GEO. Además, se colocaron electrodos en línea recta con una profundidad no superior a 10 centímetros; por lo que se recurre a la Ecuación 1.6 y los datos obtenidos en campo de la Tabla 3.2 para el cálculo de la resistividad.

Tabla 4.1. Cálculo de la resistividad por cada medición

| Separación |        | Resistencia |          | Resistividad |                  |            |
|------------|--------|-------------|----------|--------------|------------------|------------|
| a          | Medida | R           | Medida   | #            | $\rho = 2\pi aR$ | Medida     |
| 1          | metro  | 20.84       | $\Omega$ | $\rho_1$     | 130.94           | $\Omega m$ |
| 2          | metros | 3.95        | $\Omega$ | $\rho_2$     | 49.64            | $\Omega m$ |
| 3          | metros | 0.90        | $\Omega$ | $\rho_3$     | 16.97            | $\Omega m$ |
| 6          | metros | 0.32        | $\Omega$ | $\rho_4$     | 12.06            | $\Omega m$ |
| 1          | metro  | 13.5        | $\Omega$ | $\rho_5$     | 84.82            | $\Omega m$ |
| 3          | metro  | 2.11        | $\Omega$ | $\rho_6$     | 39.77            | $\Omega m$ |
| 6          | metro  | 1.49        | $\Omega$ | $\rho_7$     | 56.17            | $\Omega m$ |

Fuente: Autores

Se analiza por simple inspección (Anexos 1 y 3) que el suelo es bastante fértil, eso implica un grado de humedad mayor a los que poseen un suelo seco. Por consiguiente, se asume que en la Subestación Palestina posee un modelo de suelo uniforme y con ello, se procede con el cálculo de la resistividad promedio mediante la Ecuación 1.2, obteniendo un valor de 55.77  $\Omega m$ .

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5 + \rho_6 + \rho_7}{7} = 55.77 \Omega\text{m}$$

#### 4.1.2 Conductor de cobre duro con conexiones mecánicas a presión

Este tipo de conductor de la malla posee una conductividad del 97%, temperatura máxima permisible de fusión de 250°C y una constante del material  $K_f = 11.78$ , cuyas constantes provienen de la Tabla 1.8. Previamente para el cálculo del diámetro del conductor se debe encontrar primero la corriente de cortocircuito del circuito trifásico (Ecuación 1.14) en el lado de alto y medio voltaje utilizando los valores de impedancia positiva, negativa, Zero y de transferencia detallados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Impedancias en el transformador

| Símbolo                              | Valor               | Medida   |
|--------------------------------------|---------------------|----------|
| $Z_1 = R_1 + iX_1$                   | 10.0135 + 31.5022i  | $\Omega$ |
| $Z_2 = R_2 + iX_2$                   | 10.0135 + 31.5022i  | $\Omega$ |
| $Z_0 = R_0 + iX_0$                   | 26.6157 + 106.3165i | $\Omega$ |
| $Z_{2\_bt} = R_{2\_bt} + iX_{2\_bt}$ | 0.5544 + 2.8506i    | $\Omega$ |
| $Z_{1\_bt} = R_{1\_bt} + iX_{1\_bt}$ | 0.5544 + 2.8506i    | $\Omega$ |
| $Z_{0\_bt} = R_{0\_bt} + iX_{0\_bt}$ | 0.1295 + 1.5142i    | $\Omega$ |
| $R_f$                                | 0 (IEEE80-2013)     | $\Omega$ |

Fuente: Anexo 2

- Alto voltaje

$$I_o = \frac{3}{\sqrt{3}} \left( \frac{V_{Th}}{|Z_{Th} + R_B|} \right) = \frac{V_{Th}}{3R_f + R_0 + R_1 + R_2 + i(X_0 + X_1 + X_2)}$$

$$R = 3R_f + R_0 + R_1 + R_2 = 46.6427 \Omega$$

$$X = X_0 + X_1 + X_2 = 169.3209i \Omega$$

$$|Z_{Th} + R_B| = \sqrt{R^2 + X^2} = 175.6278 \Omega$$

- Medio voltaje: partiendo de la Ecuación 1.1 se obtiene la impedancia de secuencia positiva, esta a su vez es igual a la impedancia de secuencia negativa.

$$Z_{1\_r\_bt} = \left( \frac{13.8 \text{ kV}}{69 \text{ kV}} \right)^2 Z_1 + Z_{1\_bt} = (0.9549 + 4.1107i)\Omega$$

$$Z_{2_r.bt} = Z_{1_r.bt} = (0.9549 + 4.1107i)\Omega$$

$$Z_{0_r.bt} = (0.1295 + 1.5142i)\Omega$$

$$R = 2 * 0.9549 + 0.1295 = 2.0394 \Omega$$

$$X = 2 * 4.1107 + 1.5142 = 9.7356i \Omega$$

$$|Z_{Th} + R_B| = \sqrt{R^2 + X^2} = 9.95 \Omega$$

En la Tabla 4.3 se expone los valores de corriente de cortocircuito para el lado de alto y medio voltaje.

Tabla 4.3. Corriente de cortocircuito del sistema actual

| Voltaje $V_{Th}$ | Impedancia $ Z_{Th} + R_B $ | Factor $X/R$  | Corriente $I_o$ |
|------------------|-----------------------------|---------------|-----------------|
| 69 kV            | 175.63 $\Omega$             | 3.63 unidades | 0.68 kA         |
| 13.8 kV          | 9.95 $\Omega$               | 4.77 unidades | 2.403 kA        |

Fuente: Elaboración Propia

Luego se determina el diámetro "d" del conductor utilizando la Ecuación 1.8 y asumiendo que la duración del tiempo de falla  $t_f = 0.5s$ .

$$\begin{cases} A_{kcmil} = I_o * K_f * \sqrt{t_f} \\ A_{mm^2} = 0.5067 * A_{kcmil} = \frac{\pi d^2}{4} \end{cases}$$

$$d = \sqrt{\frac{2.027 * I_o * K_f * \sqrt{t_f}}{\pi}} = 3.594 \text{ mm}$$

Se tiene que el conductor debe ser mínimo 6 AWG (Tabla 1.2), por lo que cumple con lo indicado en el Apartado 2.4 (2/0 AWG).

#### 4.1.3 Resistencia de la malla actual

Tomando como referencia los valores actuales de la malla (Apartado 2.4) se tiene una longitud total  $L_T$  de 300 metros por lo que se obtiene una resistencia de puesta a tierra de 1.338  $\Omega$  cuyo valor es superior a lo indicado en la norma IEEE80-2013; por lo que se realiza un rediseño de la malla.

$$L_T = 6 * (L_x + L_y) = 300 \text{ m}$$

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] = 1.338 \Omega > 1 \Omega$$

## 4.2 REDISEÑO DE LA MALLA A TIERRA

La reducción de la resistencia de la malla se centra en colocar un tamaño cuadrado en el espacio sobrante de la subestación, tal como se indica en la Figura 4.1. Además, se conecta en paralelo con la malla existente.

### 4.2.1 Conductor de cobre duro con soldadura exotérmica

Tal como se observó en el Apartado 4.1.2 se escoge el mismo diámetro de la malla existente en la subestación que es 2/0 AWG. Sin embargo, se realiza los cálculos para verificar su validez: conductividad del 97 %, temperatura máxima permisible de fusión es de 1084 °C y la constante del material  $K_f = 7.06$ . Al igual que el caso anterior se asume que la duración del tiempo de falla es de 0.5 segundos y se calcula el diámetro del conductor con la Ecuación 1.8.

$$\begin{cases} A_{\text{kcmil}} = I_o * K_f * \sqrt{t_f} \\ A_{\text{mm}^2} = 0.5067 * A_{\text{kcmil}} = \frac{\pi d^2}{4} \end{cases}$$

$$d = \sqrt{\frac{2.027 * I_o * K_f * \sqrt{t_f}}{\pi}} = 2.78 \text{ mm}$$

Se observa que el diámetro del conductor de cobre es de 2.78 mm, eso implica que necesita mínimo cable 8 AWG, por lo que se concluye la validez del cable 2/0 AWG.

### 4.2.2 Voltajes tolerables

Antes de empezar con el cálculo de los voltajes tolerables, se toma en consideración los siguientes datos obtenidos de la norma IEEE 80-2013:

- $\rho_s = 2500 \Omega\text{m}$ , (resistividad de la roca triturada húmeda).
- $h_s = 0.102 \text{ m}$ .

Por medio de la Ecuación 1.11 se calcula el factor de decremento:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} = 0.70$$

Luego se calculan los voltajes de paso y contacto para una persona de 70 Kg a través de las Ecuaciones 1.9 y 1.10; respectivamente. Además, se asume que los tiempos de despeje y duración de falla son iguales, de tal manera que  $t_s = t_f$ .

$$E_{\text{step70kg}} = \frac{0.157(1000 + 6C_s * \rho_s)}{\sqrt{t_s}} = 2.56 \text{ kV}$$

$$E_{\text{touch70kg}} = \frac{0.157(1000 + 1.5C_s * \rho_s)}{\sqrt{t_s}} = 805.45 \text{ V}$$

### 4.2.3 Diseño inicial

La Subestación Palestina cuenta con un área de 1985 m<sup>2</sup>, por lo que se diseña una malla cuadrada definida en la Figura 4.1 de características, indicadas a continuación:

- Largo y ancho iguales a 30 metros ( $L_x = L_y$ ) y se calculan bajo mediante el área del cuadrado:

$$A = L_x * L_y = 900 \text{ m}^2$$

- Se toma en consideración algunos datos de la malla existente como los 5 metros de espaciamiento “D” entre conductores y las 7 varillas de aterrizaje de 1.8 m, enterrados a una profundidad de 1.2 m por lo que la longitud total es de 21 metros.

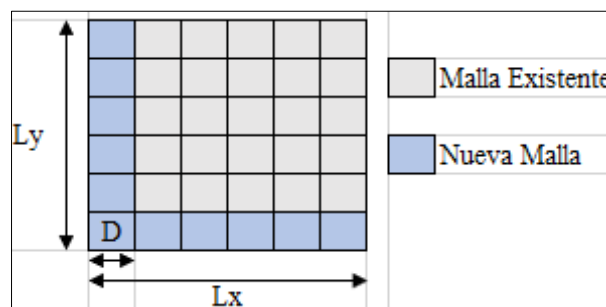


Figura 4.1. Diseño de la nueva malla a tierra



Fuente: Autores

- Para los cálculos siguientes, se toma en consideración como si se tratase de una malla total (existente + nueva), por tanto, la longitud total del conductor es de 350 metros, proveniente de la suma de hilos del largo y ancho de la malla cuadrada, visto en la Figura 4.1.

$$L_T = 7 * (L_x + L_y) = 420 \text{ m}$$

#### 4.2.4 Resistencia

Se tiene que la resistencia de la malla es de  $0.919 \Omega$  cuyo valor se determina mediante la Ecuación 1.12. Además, se toma la misma profundidad de la malla existente (0.8 metros).

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] = 0.919 \Omega$$

#### 4.2.5 Corriente de la malla

Para el cálculo de la corriente de la malla, se deben conocer los siguientes factores:

- Por medio de la Tabla 1.9, se tiene que el factor de disminución durante el tiempo de falla es de 1.026; donde se conoce que el tiempo de la falla es de 0.5 segundos y el factor X/R = 10.
- El factor de división de la corriente de falla es de 0.6 [12].
- Se tiene una corriente de cortocircuito en el lado de alta tensión de 2.403 kA, determinado en el Apartado 4.1.2.

$$I_G = D_f * S_f * I_o = 0.419 \text{ kA}$$

#### 4.2.6 Potencial GPR

Por medio de la Ecuación 1.15 se calcula el potencial GPR, obteniendo un valor de 382.095 V.

$$GPR = I_G * R_g = 385.32 \text{ V}$$

## 4.3 ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 4.3.1 Análisis del diseño de la malla de puesta a tierra

Partiendo del procedimiento de puesta a tierra se evalúa el diseño descrito en el Apartado 4.1, donde se obtiene que el GPR tiene un voltaje de 382.32 V; este valor resulta ser menor que el voltaje de contacto tolerable (805.45 V). Por tal razón, el diseño queda realizado ya que cumple con la norma IEEE 80-2013, tal como se indica en la Figura 4.2.

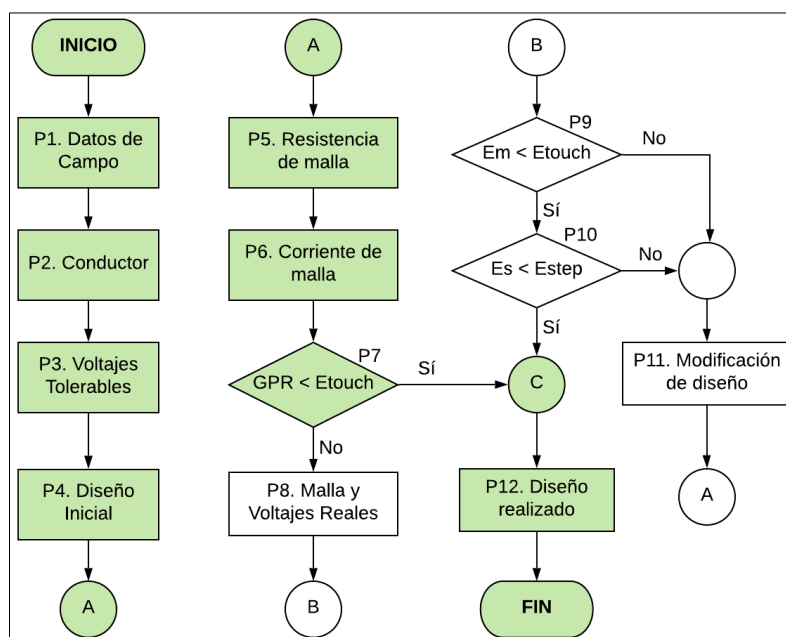


Figura 4.2. Diseño realizado de la nueva malla a tierra

Fuente: Autores

### 4.3.2 Resultados obtenidos con el software Matlab

Los valores de diseño fueron ingresados al Script de Matlab (Anexo 4) a fin de obtener la malla de puesta a tierra con su respectiva lógica de programación, vistos en la Figura 4.3 y 4.4.

```
El factor X/R es:3.6302
La corriente trifasica de corto circuito en el lado de alto voltaje del transformador es:0.68048_kA
El factor X/R es:4.7738
La corriente trifasica de corto circuito en el lado de bajo voltaje del transformador es:2.403_kA
El diámetro del conductor es:2.782_mm
El diámetro del conductor es:0.002782_m
El factor de reflexión es:-0.95636
El factor de reducción:0.70071
El voltaje de paso admisible es:2555.7148-volts
El voltaje de toque admisible es:805.4523-volts
La resistencia de puesta a tierra es:0.91983-ohms
La corriente maxima (Ig) en la puesta a tierra es:0.4189-kA
El potencial GRP de la puesta a tierra es:385.32-volts
La puesta a tierra cumple con el voltaje de paso admitido
El factor geometrico km es:0.72831
El potencial Em de la malla es:64.8166-volts
La puesta a tierra cumple con el voltaje de toque admitido
```

Figura 4.3. Resultado del diseño de la malla nueva a tierra

Fuente: Autores

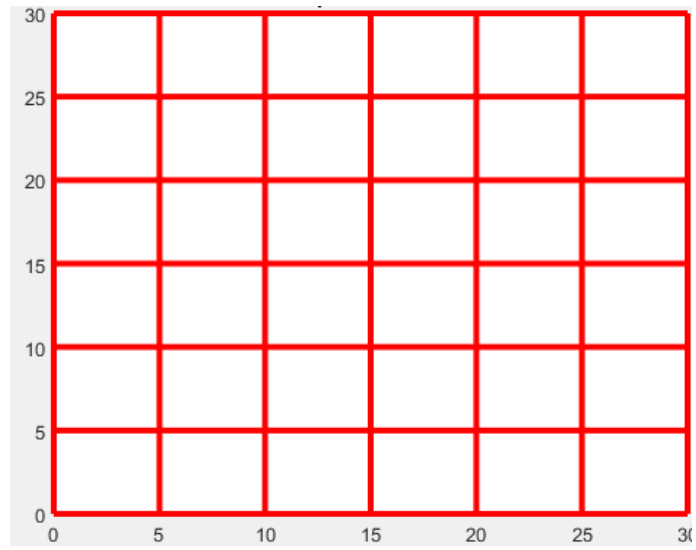


Figura 4.4. Diseño de la nueva malla a tierra mediante Matlab

Fuente: Autores

## CONCLUSIONES

- Bajo el método de la caída de potencial se ha determinado una resistencia de la malla con un valor de  $1.338 \Omega$  del transformador de la Subestación Palestina, dando como resultado un valor superior al permitido por la norma IEEE80-2013; por tanto, se recurre al rediseño del sistema de puesta a tierra a fin de que el valor de la resistencia sea inferior a 1 ohmio.
- Se utiliza el método de Wenner o 4 puntos para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra en la subestación de Palestina, donde se realizan 7 mediciones cuyos valores oscilan entre 0.32 a 20.84 ohmios. Además, se concluye por simple inspección que el suelo es bastante fértil por lo que el cálculo de la resistividad emplea el modelo de suelo uniforme, obteniendo un valor de  $55.77 \Omega\text{m}$ .
- Una vez obtenidos los datos de campo (resistividad del terreno), dimensiones y características del conductor de cobre duro con soldadura exotérmica, cálculo de voltajes permisibles de paso y contacto para una persona de 70 Kg, se establece el nuevo diseño de la malla a tierra. Posteriormente, se establece una malla cuadrada de  $900 \text{ m}^2$  cuyo espaciamiento entre conductores es de 5 metros para obtener una resistencia de  $0.919 \Omega$ . Luego, se evalúan las condiciones de diseño acorde a la norma IEEE 80-2013, determinando que el diseño concluye cuando el potencial GPR ( $385.32 \text{ V}$ ) es menor al voltaje de contacto real ( $805.45 \text{ V}$ ). Cabe mencionar que los cálculos de operación de la puesta a tierra son ingresados al software Matlab a fin de observar la operatividad del sistema.

## **RECOMENDACIONES**

- Si se realiza un reemplazo total de la malla antigua en la Subestación Palestina, se recomienda utilizar cable 4/0 AWG en la nueva malla y que estén enterrados entre 0.3 a 0.5 metros, tal como sugiere la norma IEEE 80-2013.
- Se recomienda utilizar mínimo una versión de Matlab 2019a para visualizar la operatividad de la nueva malla del sistema de puesta a tierra de la Subestación Palestina.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Trahorras, Subestaciones eléctricas, Madrid: Paraninfo, 2015.
- [2] J. Botero, «Conceptos básicos de Subestaciones Eléctricas,» 2013. [En línea]. Available: [http://www.javierbotero.com/Javier\\_Botero/SUBESTACIONES.html](http://www.javierbotero.com/Javier_Botero/SUBESTACIONES.html). [Último acceso: 17 noviembre 2020].
- [3] J. López, «"Diseño Técnico-Económico de una Subestación Eléctrica GIS en entorno Urbano",» Madrid, 2012.
- [4] MERNNR, «Plan de Expansión de la Transmisión,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/5.-PLAN-DE-EXPANSION-DE-LA-TRANSMISION.pdf>. [Último acceso: 17 noviembre 2020].
- [5] Comuval, «Instalaciones eléctricas,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.comuval.com/index.html>.
- [6] E. Harper, Elementos de diseño de Subestaciones, México D.F.: Limusa, 2005.
- [7] W. Brokering, R. Palma y L. Vargas, Ñom Lufke o Los Sistemas Eléctricos de Potencia, Santiago de Chile: Prentice Hall, 2008.
- [8] S. Chapman, Máquinas Eléctricas, México D.F.: McGraw Hill, 2012.
- [9] J. Gudel y P. González, Instalaciones eléctricas interiores, Barcelona: Marcombo, 2012.
- [10] IEEE81, «IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System,» IEEE, New York, 2012.
- [11] G. Rojas, «Manual de Sistemas de Puesta a Tierra,» Gedisa, Cochabamba, 2010.
- [12] IEEE80, «Guía para la Seguridad de puesta a tierra en Subestaciones de C.A.,» IEEE, New York, 2013.
- [13] J. Bustamante, «"Evaluación y Diagnóstico de la Malla de Puesta a Tierra de la Subestación Obrapía con niveles de tensión de 69KV y 13.8KV perteneciente a la E.E.R.S.S.A, para cumplir con los parámetros establecidos por la Norma IEEE STD.80-2000",» Cuenca, 2011.

- [14] AECIM, «Efectos fisiológicos directos e indirectos provocados por el paso de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.aecim.org/efectos-fisiologicos-directos-e-indirectos-provocados-por-el-paso-de-la-corriente-electrica-a-traves-del-cuerpo-humano/>. [Último acceso: 18 noviembre 2020].
- [15] Sistemamid, «Medición de las resistencias de tomas a tierra,» 2020. [En línea]. Available: <https://sistemamid.com/medicion-de-las-resistencias-de-tomas-a-tierra/>. [Último acceso: 19 noviembre 2020].
- [16] RCE, «Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación,» 2002. [En línea]. Available: <http://www.proteccioncivil.net/Documentos%20pdf/Reglamento%20sobre%20centrales%20el%C3%A9ctricas,subestaciones%20y%20centros%20de%20transformaci%C3%B3n.pdf>. [Último acceso: 07 diciembre 2020].
- [17] UNE-EN-50522, «Puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 kV en corriente alterna,» AENOR, Madrid, 2012.
- [18] RegulacionElectrica, «Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2018,» ARCONEL, Quito, 2018.
- [19] V. Hungría, «Planos de la Subestación Palestina,» CNEL EP, Guayaquil, 2015.
- [20] Fluke, «Comprobador de puesta a tierra 1625-2 GEO de Fluke,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-ec/producto/comprobacion-electrica/conexion-a-tierra/fluke-1625-2>. [Último acceso: 03 abril 2021].

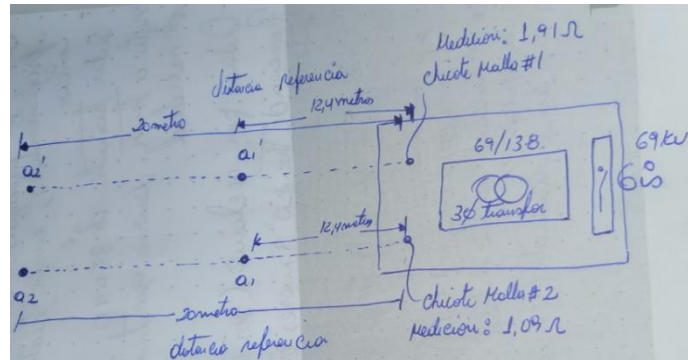
## ANEXOS

|  |    |
|--|----|
| Anexo 1. Sistema actual de la puesta a tierra de la Subestación Palestina .....      | 54 |
| Anexo 2. Datos obtenidos de la CNEL de las impedancias de corto circuito .....       | 56 |
| Anexo 3. Pasos previos a la medición de resistencia de la Subestación Palestina..... | 58 |
| Anexo 4. Sistema de puesta a tierra elaborado mediante Matlab.....                   | 60 |
| Anexo 5. Sistema de puesta a tierra existente .....                                  | 64 |
| Anexo 6. Nuevo sistema de puesta a tierra .....                                      | 65 |



## Anexo 1. Sistema actual de la puesta a tierra de la Subestación Palestina

- Método de caída de potencial



- Colocación de picas en el terreno uniforme



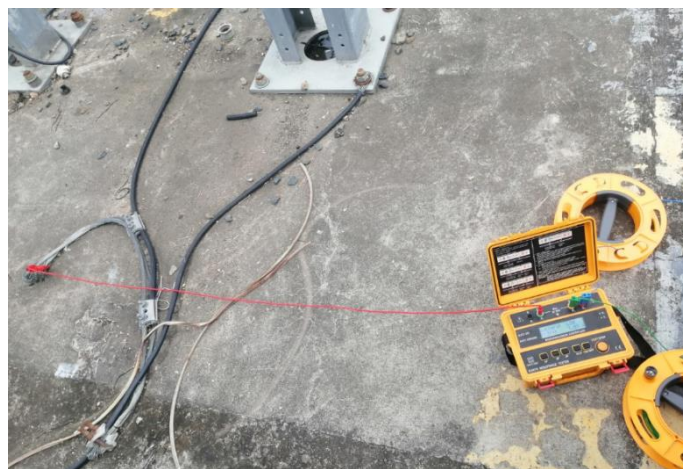
- Medición 1



- Medición 2



- Conductores de puesta a tierra





Anexo 2. Datos obtenidos de la CNEL de las impedancias de corto circuito

- Impedancias en el lado de alto voltaje

Cuadro de cortocircuito

Barra - 07. PALESTINA / BARRA 69KV

| LLL [A] | LG [A] | LL [A] | LLG [A] |
|---------|--------|--------|---------|
| 1205    | 680    | 1044   | 1083    |

| R0 [Ω]  | X0 [Ω]   | R1 [Ω]  | X1 [Ω]  | R2 [Ω]  | X2 [Ω]  |
|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| 26,6157 | 106,3165 | 10,0135 | 31,5022 | 10,0135 | 31,5022 |

F
  C
  Cc
 





 .00 .0  
 -.0 .00

- Impedancias en el lado de medio voltaje

Cuadro de cortocircuito

Barra - 07. PALESTINA / BARRA 13.8KV

| LLL [A] | LG [A] | LL [A] | LLG [A] |
|---------|--------|--------|---------|
| 2825    | 3362   | 2447   | 3293    |

| R0 [Ω] | X0 [Ω] | R1 [Ω] | X1 [Ω] | R2 [Ω] | X2 [Ω] |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,1295 | 1,5142 | 0,5544 | 2,8506 | 0,5544 | 2,8506 |

F  C  Cc       | .00 ±.0  
+.0 .00

Anexo 3. Pasos previos a la medición de resistencia de la Subestación Palestina





#### Anexo 4. Sistema de puesta a tierra elaborado mediante Matlab

- **Cálculo de la resistividad**

```
function [res] = resistividad(datos)
%Calculo de la resistividad del terreno
% Detailed explanation goes here
a= cell2mat(datos(2:end,1));
r= cell2mat(datos(2:end,2));
p = 2.*pi.*a.*r;
res = sum(p)/length(p);
end
```

- **Malla de puesta a tierra**

```
clc
clear
close all
%% Lectura de medidas, tomadas en terreno
[libro,direccion]= uigetfile('*.xlsx','Archivos de excel');
estado=waitbar(0,'Por favor espere');
dir=strcat(direccion,libro);
waitbar(0.5,estado)
lectura=readcell(dir,"Sheet","Hoja1");
waitbar(1,estado)
close(estado)
%% Cálculo de resistividad
[respuesta] = resistividad(lectura);
%% Dimensionamiento de malla de puesta
ts=0.5;%% tiempo de duracion de la falla seg
z1=10.0135+31.5022*i;%% impedancia de secuencia positiva ohms
z2=10.0135+31.5022*i;%% impedancia de secuencia negativa ohms
z0=26.6157+106.3165*i;%% impedancia de secuencia zero ohms
z1_bt=0.5544+2.8506*i; % Impedancia positiva de transferencia de atbt
z0_bt=0.1295+1.5142*i; % Impedancia zero de transferencia de at-bt
p=respuesta;%% resistividad del terreno ohm-m.
ps=2500;%% resistividad superficial del terreno ohm-m.
hs=0.102;%% espesor de la capa superficial en metros.
h=0.8;%% profundidad de la malla de puesta a tierra.
%% largo y ancho de la malla
%largo=44;%% largo de la malla en m.
%ancho=44;%% ancho de la malla en m.
largo=30;%% largo de la malla en m.
ancho=30;%% ancho de la malla en m.
volt_a=69; %% Voltaje de linea, lado de alta tensión
volt_b=13.8; %% Voltaje de linea, lado de baja tensión
rf=0;
D=5; %% distancia entre conductores para la malla
Sf=0.6; % Factor de división de corriente
ho=1;%% Profundidad de referencia
%% Factor de seguridad y factor de decremento
A=1;
Df=1.026; %% Factor de decremento 1.125
%% Dimensionamiento del conductor
%% Cálculo de corriente de corto circuito lado de alta tensión
z1_r=real(z1);
```

```

z1_im=imag(z1);
z2_r=real(z2);
z2_im=imag(z2);
z0_r=real(z0);
z0_im=imag(z0);
x=3*rf+(z1_r+z2_r+z0_r);
y=(z1_im+z2_im+z0_im);
[theta,rho] = cart2pol(x,y);
Io=3*(volt_a/sqrt(3))/rho;
disp(strcat('El factor X/R es: ',num2str(y/x)));
disp(strcat('La corriente trifasica de corto circuito en el lado de alto
voltaje del transformador es: ',num2str(Io),'_kA'));
%% Cálculo de corriente de corto circuito lado de baja tensión
z1_r_bt=(volt_b/volt_a)^2 * z1 + z1_bt;
z1_r_b=real(z1_r_bt);
z1_im_b=imag(z1_r_bt);
z2_r_b=real(z1_r_bt);
z2_im_b=imag(z1_r_bt);
z0_r_b=real(z0_bt);
z0_im_b=imag(z0_bt);
x_b=3*rf+(z1_r_b+z2_r_b+z0_r_b);
y_b=(z1_im_b+z2_im_b+z0_im_b);
[theta_b,rho_b] = cart2pol(x_b,y_b);
Io_b=3*(volt_b/sqrt(3))/rho_b;
disp(strcat('El factor X/R es: ',num2str(y_b/x_b)));
disp(strcat('La corriente trifasica de corto circuito en el lado de bajo
voltaje del transformador es: ',num2str(Io_b),'_kA'));
%% Características del conductor
T_amb=40; %% temperatura ambiente grados centigrados;
T_fus=1084; %% temperatura de fusion grados centigrados;
Kf=7.06; %% constante de conductor
%T_fus=250; %% temperatura de fusion grados centigrados;
%Kf=11.78; %% constante de conductor
%% Dimensionamiento del conductor
Akcmil = Io_b * Kf * sqrt(ts);
a_mm = (pi/4)*0.00064516 * Akcmil*1000;
d_mm = sqrt((4*a_mm)/pi);
d_m = d_mm/1000;
disp(strcat('El diámetro del conductor es: ',num2str(d_mm),'_mm'));
disp(strcat('El diámetro del conductor es: ',num2str(d_m),'_m'));
%% Diametro minimo recomendado
d_min=0.01;%% Diametro minimo recomendado IEEE
%% Cálculo de factor de reflexión
k=(p-ps)/(p+ps);
disp(strcat('El factor de reflexión es: ',num2str(k)));
%% Cálculo de factor de reducción
Cs=1-((0.09*(1-p/ps))/(2*hs+0.09));
disp(strcat('El factor de reducción: ',num2str(Cs)));
%% Cálculo de voltaje de paso admisible considerando un cuerpo de 70kg
Estep_70=((1000+6*Cs*ps)*0.157)/sqrt(ts);
disp(strcat('El voltaje de paso admisible es: ',num2str(Estep_70),'-
volts'));
%% Cálculo de voltaje de toque admisible considerando un cuerpo de 70kg
Etouch_70=((1000+1.5*Cs*ps)*0.157)/sqrt(ts);
disp(strcat('El voltaje de toque admisible es: ',num2str(Etouch_70),'-
volts'));
%% Empieza procedimiento
area=largo*ancho;%% área total de la malla.
temp=(largo+ancho)/2;

```



```

if(temp<10)
    temp=floor(temp);
    area_m=temp*temp;
else
    if(temp>=10)
        temp1=string(temp);
        C = strsplit(temp1, '.');
        letra=char(C(1));
        dim_c =str2double(C(1)) - str2double(letra(2));
        area_m=dim_c*dim_c;
    end
end
%% Diseño preliminar
xx=0:D:temp;
yy=0:D:temp;
[a,b]=meshgrid(xx,yy);
plot(a,b,a',b', 'linewidth', 3, 'color', [1 0 0]);
title('Diseño de malla de puesta a tierra de subestación')
%% Longitud total del conductor a utilizar
Lt=2*temp*length(xx);
%% Calculo de la resistencia de puesta a tierra
Rg=p*((1/Lt)+(1/sqrt(20*area_m))*(1+(1/(1+h*sqrt(20/area_m)))));
disp(strcat('La resistencia de puesta a tierra es: ',num2str(Rg),'-ohms'));
%% Calculo de la corriente maxima de la malla
Ig=Df*Sf*Io;
disp(strcat('La corriente maxima(Ig) en la puesta a tierra es: ',num2str(Ig),'-kA'));
%% Calculo de GRP
GRP=Ig*Rg*1000;
disp(strcat('El potencial GRP de la puesta a tierra es: ',num2str(GRP),'-volts'));
if(GRP<Etouch_70)
    disp(strcat('La puesta a tierra cumple con el voltaje de paso admitido'));
else
    disp(strcat('La puesta a tierra no cumple con el voltaje de paso admitido'));
end
%% Calculo de voltaje de malla km
%kii=1/((2*length(xx))^(2/length(xx)));
kii=1; %Con varillas de aterrizaje
kh=sqrt(1+(h/ho));
km=(1/(2*pi))*((log(((D^2)/(16*h*d_min))+((D+2+h)^2))/(8*D*d_min)-(h/(4*d_min))))+(kii/kh)*log(8/(pi*(2*length(xx)-1)));
disp(strcat('El factor geometrico km es: ',num2str(km)));
%% Calculo del factor ki
Lc=Lt;%% en metros
Lp=temp*4;
%Lr=0;%% debido a que no se usa barras
Lr=3*7; %debido a que usa barras
na=(2*Lc)/Lp;
nb=1;
nc=1;
nd=1;
n_ki=na*nb*nc*nd;
ki=0.644+0.148*n_ki;
%% Calculo de Em
Em=(p*Ig*km*ki)*1000/(Lc+Lr);
disp(strcat('El potencial Em de la malla es: ',num2str(Em),'-volts'));

```

```

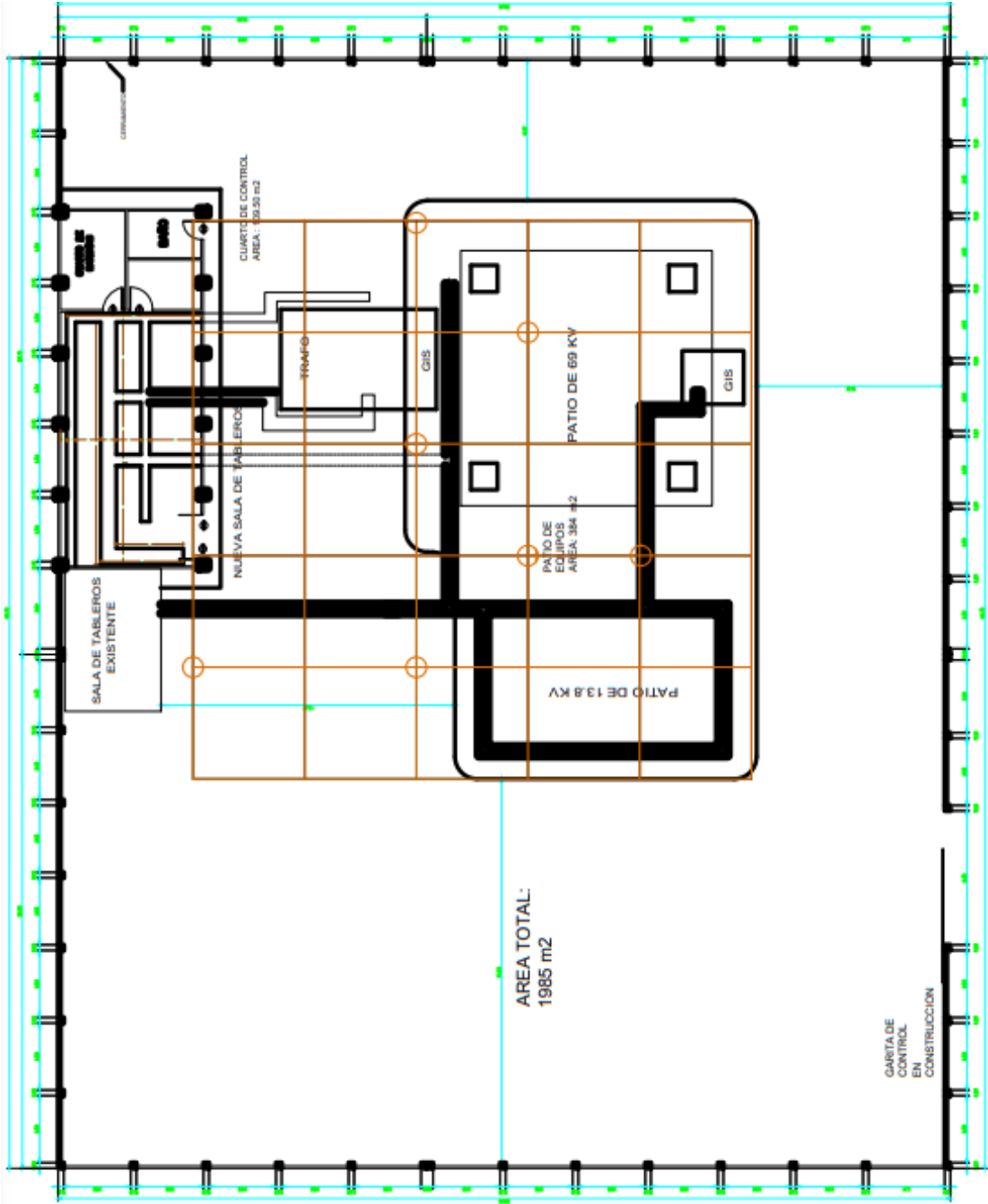
if(Em<Etouch_70)
    disp(strcat('La puesta a tierra cumple con el voltaje de toque
admitido'));
else
    disp(strcat('La puesta a tierra no cumple con el voltaje de toque
admitido'));
end

%% Calculo de Es
ks=(1/pi)*(1/(2*h)+1/(D+h)+(1-0.5^(n_ki-2))/D); %factor de espaciamento
del voltaje de toque
Es=(p*Ig*ks*ki)/(0.75*Lc+0.85*Lr);

```



Anexo 5. Sistema de puesta a tierra existente



Anexo 6. Nuevo sistema de puesta a tierra

