



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

<p>DISEÑO Y MODELADO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO PARA LA ESTACIÓN COTOPAXI DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR</p>

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingenieros Eléctricos
en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autores:

Abril Chafla Leonardo Manuel

Azogue Aguaiza Freddy Germán

Tutor Académico:

Ing. Luis Rolando Cruz Panchi MSc.

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto - 2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **ABRIL CHAFLA LEONARDO MANUEL** y **AZOGUE AGUAIZA FREDDY GERMAN** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “**DISEÑO Y MODELADO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO PARA LA ESTACIÓN COTOPAXI DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR**”, siendo el Ing. **LUIS ROLANDO CRUZ PANCHI** el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

.....
Abril Chafra Leonardo Manuel
C.C. 1804478016

.....
Azogue Aguaiza Fredy Germán
C.C. 1723088132

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“DISEÑO Y MODELADO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO PARA LA ESTACIÓN COTOPAXI DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR” de **ABRIL CHAFLA LEONARDO MANUEL** y **AZOGUE AGUAIZA FREDDY GERMAN** de la carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, agosto 2021

El Tutor



Ing. Luis Rolando Cruz Panchi

C.C. 0502595176

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes **ABRIL CHAFLA LEONARDO MANUEL** y **AZOGUE AGUAIZA FREDDY GERMAN** con el título de Proyecto de titulación “**DISEÑO Y MODELADO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO PARA LA ESTACIÓN COTOPAXI DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

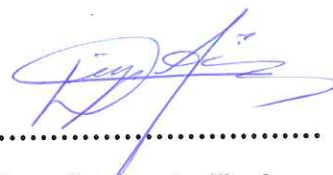
Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, agosto 2021

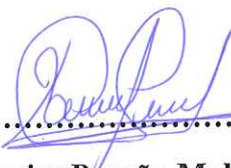
Para constancia firman:



.....
Ing. Wilian Guamán Cuenca
C.C. 0603578956



.....
Ing. Diego Leonardo Jiménez
C.C. 0503493702



.....
Ing. Xavier Proaño Maldonado
C.C. 0502656424

AGRADECIMIENTO

Con la finalización de este proyecto de titulación en Ingeniería Eléctrica, con satisfacción expreso mis sentimientos de agradecimientos muy sinceros a mis padres, hermanos y compañeros.

De la misma forma a la Universidad Técnica de Cotopaxi que como ente de educación superior hizo posible desarrollar mis estudios de tercer nivel, mis sentimientos de gratitud a la Carrera de Ingeniería Eléctrica mención Sistemas Eléctricos de Potencia y los docentes que me han formado profesionalmente.

Un agradecimiento especial al Ing. Luis Cruz e Ing. Nicolay Ramón por colaborar y guiar este trabajo en todo momento confiando en el desarrollo del mismo.

Leonardo Abril

AGRADECIMIENTO

Al concluir este proyecto de titulación con satisfacción, expreso mis sentimientos de agradecimiento a mi madre María Aguaiza quién me ha enseñado el valor del trabajo duro a no rendirme y a seguir siempre adelante a pesar de las dificultades. A mi padre Alonso Azogue, por su gran sacrificio para hacer de mi ser un hombre de bien y con valores, quien me ha acompañado todo este trayecto con su cariño incondicional y ha sabido guiarme por el camino correcto, gracias por ser los apoyos fundamentales en mi vida.

Mi agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi que me abrió las puertas para emprender mis estudios de tercer nivel, mis sentimientos de gratitud a la Carrera de Ingeniería Eléctrica mención Sistemas Eléctricos de Potencia y los docentes que me han formado profesionalmente y con valores.

Al Ing. Luis Cruz e Ing. Nicolay Ramón por acompañarnos con su disponibilidad, experiencia e interés a colaborar durante el desarrollo de este proyecto y en todo momento.

Un agradecimiento especial a todos mis compañeros que juntos supimos llegar hasta el final.

Freddy Azogue.

DEDICATORIA

Dedico todo el esfuerzo empleado a mis padres porque en base a su sacrificio son los que me apoyaron en toda adversidad para culminar esta etapa de progreso personal y profesional.

Leonardo Abril.

DEDICATORIA

En todas las adversidades y problemas que se presentan en la vida, siempre es importante contar con la ayuda de las personas que nos aman, por esta razón con este trabajo que representa todo el sacrificio que he realizado a lo largo de la carrera universitaria se las dedico a mis padres María y Alonso quienes siempre han estado conmigo y me han demostrado su amor y apoyo incondicional.

Freddy Azogue.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INFORMACIÓN GENERAL	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1.	El Problema	2
2.1.1.	Situación problemática	2
2.1.2.	Formulación del problema	2
2.2.	Objeto Y Campo De Acción.....	2
2.3.	Beneficiarios	3
2.3.1.	Beneficiarios directos	3
2.3.2.	Beneficiarios indirectos	3
2.4.	Justificación	3
2.5.	Hipótesis	4
2.6.	Objetivos.....	4
2.6.1.	Objetivo general.....	4
2.6.2.	Objetivos específicos	4
2.7.	Sistema De Tareas	5
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
3.1.	Antecedentes.....	6
3.2.	Sistema De Puesta A Tierra	7
3.2.1.	Elementos de los sistemas de puesta a tierra	7
3.2.2.	Vida útil de los electrodos del SPT.....	10
3.2.3.	Tratamiento del Terreno.	12
3.3.	Compatibilidad Electromagnética Emc.	13
3.4.	Métodos de evaluación para obtener la resistencia del sistema de puesta a tierra.....	14
3.4.1.	Medición de resistividad del terreno.....	18
3.4.2.	Modelos para el análisis de la resistividad del suelo.	19

3.5.	Diseño del sistema de puesta a tierra	23
3.5.1.	Corriente de cortocircuito simétrica trifásica	23
3.5.2.	Selección Del Tamaño Del Conductor	26
3.5.3.	Tensiones de toque y paso tolerables.....	27
3.5.4.	Cálculo de la resistencia de puesta a tierra	28
3.5.5.	Determina la corriente máxima de malla.....	28
3.5.6.	Cálculo del potencial máximo de la malla.....	29
3.5.7.	Determinación de la tensión máxima de malla.....	29
3.6.	Elementos Finitos	31
3.6.1.	Sistemas discretos	31
3.6.2.	Método de elementos finitos (FEM).....	31
3.6.3.	Secuencia General del Método de elementos finitos (FEM).....	32
3.7.	Apantallamiento.....	33
3.7.1.	El Rayo	33
3.7.2.	Pararrayos	35
3.7.3.	Niveles de protección contra el rayo (NPR).....	38
3.7.4.	Factor de riesgo.....	40
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
4.1.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	42
4.2.	MATERIALES E INSTRUMENTOS.....	42
4.2.1.	Normativas.....	42
4.2.2.	Software.....	44
4.4.	Diagnóstico De La Malla De Puesta A Tierra	45
4.3.1.	Métodos de medición de la resistencia de puesta a tierra.....	46
4.5.	Diseño De La Malla.....	50
4.1.1.	Medición de la resistividad del terreno.....	51
4.1.2.	Modelado del terreno	52

4.1.3.	Cálculo de cortocircuito.....	58
4.1.4.	Resultados del nuevo SPT.	60
4.6.	Modelamiento Y Validación Del Spt.	61
4.5.1.	Modelamiento en el software mediante la metodología IEEE.	61
4.5.2.	Modelamiento en el software mediante FEM.....	64
4.7.	Apantallamiento.....	67
4.7.1.	Método electrogeométrico	67
4.7.2.	Método de la esfera rodante.....	67
4.7.3.	Factor de riesgo.....	68
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	73
5.1.	diagnóstico.....	73
5.2.	Diseño de la malla	74
5.2.1.	Modelamiento de suelo.....	74
5.2.2.	Resultados del diseño de la malla.....	75
5.3.	Apantallamiento.....	77
5.3.1	Factor de riesgo.	77
5.3.1	Método electrogeométrico.....	79
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
6.1.	Conclusiones.....	81
6.2.	Recomendaciones	82
7.	BIBLIOGRAFÍA	84
8.	ANEXOS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1. Planchuela de equipotencialización.	8
Figura 3. 2. Inductancia relativa de conductores planos y redondos [6].	8
Figura 3. 3. Conductor de conexión a tierra de cobre 4/0 AWG.	9
Figura 3. 4. Conexión de un cable apantallado a la envolvente por medio prensaestopas [6].	10
Figura 3. 5. Grupos de suelo de los Estados Unidos [7].	11
Figura 3. 6. Equipotencialización de aparatos o sistemas a la red de puesta a tierra [6].	13
Figura 3. 7. Método de la pendiente para determinar la resistencia del piso [11].	15
Figura 3. 8. Método de intersección de curvas [3].	17
Figura 3. 9. SPT desconectado por seguridad [14].	18
Figura 3. 10. Método de Wenner cuatro electrodos [16].	19
Figura 3. 11. Método gráfico de Sunde [16].	21
Figura 3. 12. Pasos a seguir para el método de Box-Cox [17].	22
Figura 3. 13. Pasos para determinar la corriente de Cortocircuito [20].	26
Figura 3. 14. Tensiones consideradas para el diseño de un SPT [9].	28
Figura 3. 15. Sección hemisférica discretizada en elementos [4].	32
Figura 3. 16. Proceso de descarga de un rayo [22].	34
Figura 3. 17. Mapa Isocerámico del Ecuador [24].	34
Figura 3. 18. Parámetros de la corriente del rayo [22].	35
Figura 3. 19. Elementos de un sistema Franklin [27].	36
Figura 3. 20. Mallado de una estructura formando una Jaula de Faraday [27].	36
Figura 3. 21. Punta captadora que protege a un edificio [27].	37
Figura 3. 22. Normativas empleadas para la protección ante descargas atmosféricas [22]. ...	37
Figura 3. 23. Frecuencia de distribución acumulativa de los parámetros de la I_{rayo} [27].	39
Figura 3. 24. Riesgos asociados y tipos de pérdidas por exposición al rayo [27].	40
Figura 4. 1. Funcionalidades que dispone el software Etap [33].	44
Figura 4. 2 Estación Cotopaxi perteneciente al Instituto Geográfico Militar.	45
Figura 4. 3. Configuración actual del SPT.	45
Figura 4. 4. Medidor de resistencia y resistividad doble tenaza ETCR-3200 [34].	47
Figura 4. 5. Disposición de los electrodos, para aplicar el método de la pendiente.	47
Figura 4. 6. Curvas de Resultantes R vs. Xi de los datos de campo.	49

Figura 4. 7. Configuraciones propuestas para las mediciones en cada zona.....	51
Figura 4. 8. Gráfica de Sunde de la zona 1.....	53
Figura 4. 9. Curva de resistividad aparente de la zona 1.....	54
Figura 4. 10. Gráfica de Sunde de la zona 2.....	54
Figura 4. 11. Curva de resistividad aparente de la zona 2.....	55
Figura 4. 12. Gráfica de Sunde de la zona 3.....	56
Figura 4. 13. Curva de resistividad aparente de la zona 3.....	56
Figura 4. 14. Flujograma para el procesamiento de datos con metodología matemática.....	58
Figura 4. 15. Sección usada para el análisis de Corriente de Cortocircuito.	59
Figura 4.16. Modelos de estudio que dispone ETAP.	61
Figura 4.17. Malla Cuadrada importada en el software Etap.	62
Figura 4.18. Interfaz para inserción de parámetros de materiales.	62
Figura 4.19. Gráfica de la resistividad del terreno.	63
Figura 4.20. Ingreso de condiciones del sistema.	63
Figura 4.21. Tensiones de toque y de paso tolerables	64
Figura 4. 22. Metodología de Elementos finitos (FEM).	64
Figura 4. 23. SPT original y malla cuadrada unidas modelado en el software Etap.....	65
Figura 4. 24. Configuración de los materiales (conductor y electrodo).	65
Figura 4. 25. Gráfica de la resistividad del terreno en FEM.	66
Figura 4. 26. Condiciones para evaluación de la malla original.	66
Figura 4. 27. Resultado modelamiento SPT.....	66
Figura 4. 28. Evaluación inicial con valores ingresados acorde a la IEC-62305.....	71
Figura 4. 29. Factor de riesgo corregido.....	72
Figura 5. 1 Potenciales de contacto y transferido en torno a una barra de tierra [1].....	76
Figura 5. 2 Gráfica en 3D de la tensión de paso mediante la FEM.....	77
Figura 5. 3. Gráfica en 3D de la tensión de toque.	77
Figura 5. 4. Esferas rodantes aplicadas en el edificio de oficinas - Z12.	79
Figura 5. 5. Vista frontal del edificio principal de oficinas - Z12.....	80
Figura 5. 6. Vista trasera del edificio principal de oficinas - Z12.....	80
Figura 5. 7. Vista lateral izquierda del edificio principal de oficinas - Z12.....	80
Figura 5. 8. Vista lateral derecha del edificio principal de oficinas - Z12.	80
Figura 5. 9. Vista superior del edificio principal de oficinas - Z12.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Alcance de las pruebas de corrosión de la NBSC 579 [7].....	11
Tabla 3. 2. Tiempo de vida máximo electrodos de puesta a tierra [8].....	12
Tabla 3. 3. Valores máximos de resistencias de puesta a tierra permitidos[12].....	14
Tabla 3. 4. Valores de k en función de u para el método de la pendiente [11].....	16
Tabla 3. 5. Valores de potencia de cortocircuito según nivel de tensión [20].....	24
Tabla 3. 6. Valores de tensiones de Icc en relación con la potencia del transformador [20]. .	25
Tabla 3. 7. Valores de las I_{max} de cortocircuito previstas para los transformadores.....	25
Tabla 3. 8. Valores típicos de Df [3].	29
Tabla 3. 9. Valores de los parámetros del rayo acorde a los niveles de protección [27].....	38
Tabla 3. 10. Valores máximos de los parámetros del rayo [27].	39
Tabla 3. 11. Valores característicos de los parámetros del rayo [27].	39
Tabla 4. 1. Características de la malla principal del SPT	46
Tabla 4. 2. Valores de medición en 3 perfiles.	48
Tabla 4. 3. Valores de k para determinar la distancia final.	48
Tabla 4. 4. Distancia final para la ubicación de electrodos.	48
Tabla 4. 5. Valor de resistencia de la malla existente.....	48
Tabla 4. 6. Cálculo de las resistencias en función de las Xi como porcentajes de C.	49
Tabla 4. 7. Resistencias que se cruzan en la Gráfica.	50
Tabla 4. 8. Registro de medidas de la zona 1.	52
Tabla 4. 9. Registro de medidas de la zona 2.	52
Tabla 4. 10. Registro de medidas de la zona 3.	52
Tabla 4. 11. Registro de medidas zona 1 por método Box-Cox.	57
Tabla 4. 12. Registro de medidas zona 2 por método Box-Cox.	57
Tabla 4. 13. Registro de medidas zona 3 por método Box-Cox.	57
Tabla 4. 14. Radio de la esfera rodante en función de los niveles de protección [28].	67
Tabla 4. 15. Dimensiones de áreas para evaluación.	68
Tabla 4. 16. Oficinas, Edificación: características ambientales y de la estructura.....	69
Tabla 4. 17. Edificio de oficinas: Línea eléctrica	69

Tabla 4. 18. Edificio de oficinas: Línea de telecomunicaciones.	69
Tabla 4. 19. Distribución de personas en las zonas - oficina.....	70
Tabla 4. 20. Factores válidos edificio de oficinas: z2_oficinas.....	70
Tabla 4. 21 Edificio Oficinas Áreas de colección de estructura y líneas	70
Tabla 4. 22. Número anual esperado de eventos peligrosos.....	70
Tabla 5. 1. Valores obtenidos de la resistencia de puesta a tierra.	73
Tabla 5. 3. Cálculo del error entre métodos para evaluar la resistividad del terreno.	74
Tabla 5. 4. Resistencia de la malla y tensiones de toque y paso tolerables.....	75
Tabla 5. 5. Evaluación de la malla existente con la proyectada por medio de FEM.....	75
Tabla 5. 5. Resultados factor de riesgo - Estación Cotopaxi.....	78
Tabla 5. 6. Niveles de protección recomendados	78

RESUMEN:

La Estación Cotopaxi fue construida por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), entrando en operación en el año de 1954, fue destinada para controlar los satélites de manera remota desde el Ecuador, actualmente pertenece al Instituto Geográfico Militar (IGM) y su actividad es obtener datos satelitales, para mantener sus sistemas operando, cuenta con un Sistema Eléctrico de Potencia el cual se constituye de un patio de distribución interna que cuenta con transformadores reductores como elevadores que operan con los siguientes niveles de tensión 22.8 kV, 4.16 kV y 0.22 kV, los que alimentan de manera general a la antena principal Atlanta Georgia y la estación de control.

En este proyecto se realiza el diseño y modelado del sistema de puesta a tierra y apantallamiento para la Estación Cotopaxi. En primera instancia se realiza el diagnóstico del SPT existente aplicando los métodos de intersección de curvas y de la pendiente, seguidamente basado en los resultados de la evaluación en campo fue necesario realizar un nuevo diseño de malla de puesta a tierra, para este propósito se realizó un estudio de corriente de falla en el sistema y se modeló el suelo mediante el método gráfico de Sunde, Box-Cox y método matemático empleando los datos obtenidos en una medición previa de la resistividad del terreno, para el procedimiento de diseño de la malla se creó una interfaz gráfica realizado en Matlab. Finalmente se modela el diseño propuesto en el software ETAP empleando la metodología propuesta por IEEE y Elementos finitos para validar el resultado final e indicar que los valores obtenidos estén dentro de la normativa nacional e internacional.

Por otra parte, el apantallamiento de las instalaciones está evaluado en función al riesgo definidas por la IEC-62305, que marca factores importantes entre los cuales son el nivel isocerámico y el área de la edificación, empleando esta metodología se asignó niveles de protección a cada edificación y es el punto de partida para la aplicación del modelo electrogeométrico basado en esferas rodantes para finalmente localizar puntas captadoras y generar un área de protección contra descargas atmosféricas, empleando el software AutoCAD.

Palabras Clave: Diagnóstico, Sistema de Puesta a Tierra, Modelamiento, Apantallamiento,

ABSTRACT

THEME: Design and modeling of the grounding and shielding system for the Cotopaxi Station of the Military Geographical Institute.

The Cotopaxi Station was built by the National Aeronautics and Space Administration (NASA), entering into operation in 1954, was intended to control satellites remotely from Ecuador, currently belongs to the Military Geographic Institute (IGM) and its activity is to obtain satellite data, to keep their systems operating, has a Power Electrical System which consists of an internal distribution yard that has step-down transformers as elevators that operate with the following voltage levels 22.8 kV, 4.16 kV and 0.22 kV, which feed the main Atlanta Georgia antenna and the control station.

In this project, the design and modeling of the grounding and shielding system for the Cotopaxi Station is carried out. In the first instance the diagnosis of the existing SPT is performed applying the methods of intersection of curves and slope, then based on the results of the field evaluation it was necessary to perform a new grounding grid design, for this purpose a study of fault current in the system was performed and the soil was modeled using the graphic method of Sunde, Box-Cox and mathematical method using the data obtained in a previous measurement of soil resistivity, for the design procedure of the mesh was created a graphical interface made in Matlab. Finally, the proposed design is modeled in ETAP software using the methodology proposed by IEEE and Finite Elements to validate the result and indicate that the values obtained are within the national and international standards.

On the other hand, the shielding of the facilities is evaluated according to the risk defined by IEC-62305, which marks important factors among which are the isoceraunic level and the area of the building. Using this methodology, protection levels were assigned to each building and is the starting point for the application of the electrogeometric model based on rolling spheres to finally locate the capturing points and generate an area of protection against atmospheric discharges, using the AutoCAD software.

Authors:

Abril Chafra Leonardo Manuel

Azogue Aguaiza Freddy Germán



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: “**DISEÑO Y MODELADO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO PARA LA ESTACIÓN COTOPAXI DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR**”, presentado por **Abril Chafra Leonardo Manuel y Azogue Aguaiza Freddy German**, egresados de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, agosto del 2021

Atentamente.

MSc. Diana Karina Taibe Vergara

**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 1720080934**



**CENTRO
DE IDIOMAS**

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título:

Diseño y modelado del sistema de puesta a tierra y apantallamiento para la Estación Cotopaxi del Instituto Geográfico Militar.

Fecha de inicio:

05 de abril del 2021.

Fecha de finalización:

12 de agosto del 2021.

Lugar de ejecución:

El Boliche.

Facultad que auspicia:

Facultad de Ciencias de Ingeniería Aplicadas (CIYA).

Carrera que Auspicia:

Ingeniería Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Proyecto de investigación vinculado:

No aplica.

Equipo de Trabajo:

Tutor: Ing. Luis Rolando Cruz Panchi.

Estudiantes: Leonardo Manuel Abril Chafla,

Freddy German Azogue Aguaiza.

Área de conocimiento:

07 Ingeniería, Industrial y construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación:

Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sublíneas de investigación de la carrera:

Explotación y diseño de sistemas Eléctricos de Potencia.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. EL PROBLEMA

2.1.1. Situación problemática

Según la *International Electrical Testing Association* (NETA) recomienda diagnosticar el SPT cada 3 años. La Estación Cotopaxi ha realizado una evaluación en el 2008 de manera general en conjunto con un servicio privado de medición del SPT indicando resultados cualitativos, mencionando el estado del SPT como aceptable. En base a este precedente se debe llevar a cabo los estudios tomando en cuenta la problemática indicada por la Estación para determinar en forma cuantitativa el valor de la resistencia de malla y adicional a esto considerar un nuevo diseño de la malla principal a causa del efecto corrosivo en las varillas de acero recubierto de cobre originado por el tiempo de la actual instalación.

La infraestructura de la Estación Cotopaxi cuenta con la implementación de nuevos equipos electrónicos de comunicación satelital y presenta modificaciones del sistema eléctrico de potencia acorde a las necesidades requeridas a lo largo mismas que datan desde el año 1954, condiciones que generan cambios en el propósito inicial del diseño del sistema de puesta a tierra, esto fue constatado en una visita de reconocimiento la presencia de oxidación, cortes y deterioro del material, razón por la cual se propone realizar un diagnóstico y presentar una propuesta de diseño.

El estudio del Apantallamiento debería ser evaluado acorde a los parámetros de riesgo asociados a la aplicación del método electrogeométrico como determina la IEC-62305 que considera factores de pérdida de vidas humanas, servicios de energía y telecomunicaciones, económicas y ambientales entre los más importantes.

2.1.2. Formulación del problema

Requerimiento del diagnóstico y propuesta de diseño del SPT consecuencia del tiempo de instalación e implementación de nuevos equipos al sistema lo que aumenta el riesgo eléctrico al personal operativo.

2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología / 330602 Aplicaciones Eléctricas

2.3. BENEFICIARIOS

2.3.1. Beneficiarios directos

Personal técnico de la Estación Cotopaxi, estudiantes asociados al área de energía y potencia eléctrica.

2.3.2. Beneficiarios indirectos

Instituto Geográfico Militar que administra la infraestructura, empresas públicas y privadas del sector energético.

2.4. JUSTIFICACIÓN

El proyecto de investigación está justificado en base a lo requerido expresamente por la Estación Cotopaxi lo cual es conocer el valor cuantitativo de la resistencia de la malla actual y compararlo con el valor determinado por la guía de instalación de sistemas delta V, adicional a esto se toma en consideración el tiempo de implementación del SPT, mismas que datan del año 1954 que hasta la presente fecha de la realización del estudio se evidencia cambios en los sistemas eléctricos originando que la corriente de cortocircuito, factor esencial en un SPT sea diferente a la inicial de la cual no existe información registrada generando duda en cuanto a la efectividad e influencia de la malla en sus sistemas.

La modelación del SPT permite justificar los valores de voltaje de paso y choque a obtenerse en el diseño nuevo de la malla principal beneficiando directamente al personal operativo de la Estación que se encuentra bajo la administración del IGM responsable del funcionamiento del sistema basado esencialmente en la adquisición de datos satelitales.

El Estudio de Apantallamiento basado esencialmente en los factores de riesgo por edificación es necesario debido a que orienta su estudio en función de las descargas atmosféricas en la zona aplicando el método electrogeométrico para garantizar la integridad del personal operativo, administrativo y externo, así como de los equipos eléctricos y electrónicos, estructuras, líneas de energía y telecomunicaciones.

Finalmente, como estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica es un reto, pero a su vez una oportunidad el dejar un aporte en términos técnicos y comprensibles a instituciones que manejan equipos eléctricos que siempre están en constante evolución, permitiendo una apertura en cuanto a educación y generación de conocimientos entre la Universidad Técnica de Cotopaxi y el Instituto Geográfico Militar.

2.5. HIPÓTESIS

El Diseño y Modelado del SPT y Apantallamiento de la Estación Cotopaxi permitirá proteger al sistema eléctrico y electrónico ante sobre tensiones de origen interno y externo.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. Objetivo general

Realizar el diseño del sistema de puesta a tierra y apantallamiento para la Estación Cotopaxi del Instituto Geográfico Militar mediante el uso de normativa local e internacional vigente para la seguridad de las personas y de los equipos.

2.6.2. Objetivos específicos

Investigar contenido bibliográfico relacionado con el diseño de sistema de puesta a tierra para las instalaciones de la Estación Cotopaxi.

Realizar el modelamiento del suelo y estudio de cortocircuito a partir del levantamiento de datos de campo para el diseño de Sistema de Puesta a Tierra.

Desarrollar el diseño del SPT y apantallamiento utilizando la metodología IEEE, y el modelo electrogeométrico IEEE-std-998-2012.

2.7. SISTEMA DE TAREAS

Objetivos	Actividad	Resultados de la actividad	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar contenido bibliográfico relacionado con el diseño de sistema de puesta a tierra para instalaciones de la Estación Cotopaxi.	Búsqueda de información. Análisis de información y Selección de información.	Información: Normativa a aplicar, Elección del método del modelamiento del terreno. Desarrollo del Marco teórico.	Investigación bibliográfica: Libros Tesis Artículos Revistas tecnológicas. Normativas Informes Técnicos
Realizar el modelamiento del suelo y estudio de cortocircuito a partir del levantamiento de datos de campo para el diseño de Sistema de Puesta a Tierra.	Levantamiento del estado actual de las instalaciones. Medición de campo. Estudio de cortocircuito.	Registro del estado físico de las conexiones. Obtención de la resistividad aparente. Determinación de la corriente de falla.	Ficha de registro de datos. Telurómetro. Simulación de software.
Desarrollar el diseño del SPT y apantallamiento utilizando la metodología IEEE, y el modelo electrogeométrico IEEE-std-998-2012.	Aplicación de las normativas internacionales y nacionales. Estudio de apantallamiento acorde a las instalaciones de la Estación.	Informe. Plano de detalles. Gráficas.	Excel. Simulación de software. Software de dibujo CAD.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

Durante décadas, la investigación sobre sistemas de puesta a tierra ha despertado el interés de los profesionales de la energía, y se ha vuelto relevante con la seguridad personal de los usuarios y la seguridad de los equipos conectados a sistemas eléctricos, algunos sistemas como apantallamientos, subestaciones, telecomunicaciones y cualquier sistema que haga uso de los beneficios de la energía eléctrica hacen que cada vez estén directamente relacionados con el funcionamiento normal de la protección del Sistema de Puesta a Tierra.

En [1] menciona estudios sobre el apantallamiento en instalaciones analizan la protección contra descargas atmosféricas y puesta a tierra como es el caso de Helmerich y Payne, empresa que cuenta con altos estándares de seguridad del personal, por lo que es necesario e importante realizar investigaciones e implementación de sistemas de blindaje. La conexión a tierra de protección de los equipos de perforación proporciona una garantía de seguridad para los empleados y los equipos eléctricos, electrónicos y de telecomunicaciones.

A lo largo del mundo y el país existen varios proyectos en donde se realizaron los análisis correspondientes en cuanto a los procedimientos para el diseño de sistemas de puesta a tierra como es el caso que menciona [2] de la zona del nuevo aeropuerto de Quito, trabajos que fueron realizados en el año 2008 en el cual se presentaron dos casos diferentes de estudio, uno para pequeñas puestas a tierra y otro para mallas o grandes sistemas de tierra, anticipando un panorama distinto en cada panorama que se puede presentar.

En 2010, [3] indica que para el procedimiento de cálculo se identificó como base la corriente de cortocircuito acorde a los equipos instalados, seguido de la medición de la resistividad del suelo y el modelado del tipo de suelo. Se concluyó que cuando el suelo se presenta de forma uniforme se incluye un método estadístico para encontrar la resistividad utilizada para diseño del sistema de puesta a tierra, pero a su vez da opción a ver la combinación de otros métodos para verificación. Dentro del cálculo de la resistividad del terreno se indica que cuando un modelo de suelo de dos capas tiene una marcada variación referentes a valores en su resistividad puede representar que las condiciones de suelo son muy desiguales, lo que requiere el uso de técnicas de modelado de múltiples capas. El modelo multicapa puede incluir múltiples capas horizontales o múltiples capas verticales. La técnica de interpretar la resistividad del suelo altamente no uniforme requiere el uso de métodos de elementos finitos.

3.2. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Actualmente dentro del desarrollo tecnológico en el campo eléctrico y electrónico tiene la necesidad de proteger la seguridad del personal y los equipos es por eso que el sistema de puesta a tierra participa directamente en el diseño, construcción y operación de sistemas eléctricos de baja, media y alta tensión [4]. Los sistemas de puesta a tierra generalmente tienen dos funciones principales: a) proporcionar un método para disipar la corriente a tierra sin exceder los límites operativos de la red y el equipo, b) garantizar que las personas dentro y cerca de la subestación no estén expuestas a descargas eléctricas peligrosas [3].

3.2.1. Elementos de los sistemas de puesta a tierra

a. Electrodo de tierra

El electrodo de puesta a tierra es una parte integral del sistema de puesta a tierra, está en contacto directo con el suelo y, por lo tanto, proporciona una forma de rebotar o captar cualquier tipo de corriente de fuga a tierra. En el sistema de puesta a tierra, generalmente es necesario transportar una corriente de falla relativamente grande en poco tiempo, por lo que se requiere una parte lo suficientemente grande para transportar la corriente de manera segura. El electrodo debe tener suficientes características mecánicas y eléctricas para continuar respondiendo a la tensión durante un período de tiempo relativamente largo, durante el cual la prueba o inspección real es difícil. El material debe tener una buena conductividad eléctrica y no se corroerá en una amplia gama de condiciones del suelo. Los materiales utilizados incluyen cobre, acero galvanizado, acero inoxidable y hierro fundido [5].

b. Barras

Es una de las formas más comunes de electrodos a tierra porque en ocasiones su costo de instalación tiende a ser menor y pueden utilizarse para alcanzar suelos profundos con baja resistividad con excavación y de material tipo relleno. Están disponibles en una variedad de tamaños, longitudes, diámetros y materiales. La varilla está hecha de cobre puro o acero bañado en cobre. Cuando las barras de acero se incrustan mecánicamente (impacto), se utiliza el tipo de revestimiento porque el acero utilizado tiene una alta resistencia mecánica. La capa de cobre debe ser de alta pureza y utilizar electrólisis. Este último asegura que el cobre no se resbale cuando se entierra en la barra. En condiciones de suelo más agresivas, como alto contenido de sal, use barras de cobre sólidas. Las varillas de acero inoxidable son más ánodo que cobre y se utilizan para prevenir el riesgo de corrosión galvánica. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el

hecho de que el acero inoxidable tiene una menor capacidad de transporte de corriente en comparación con el cobre[6].

c. Planchuelas de equipotencialización.

Los conductores formados por láminas de metal, malla metálica o cables redondos son adecuados como superficie equipotencial. Para sistemas de altas frecuencias, son mejores las láminas metálicas o bandas trenzadas (efecto pelicular). La relación de aspecto de longitud / anchura típica de estos papeles debe ser inferior a 5. La Figura 3. 1. muestra un ejemplo de su implementación [6].



Figura 3. 1. Planchuela de equipotencialización.

Desde el punto de vista de la EMC, los cables redondos no son eficaces como placas equipotenciales al generar o procesar frecuencias superiores a 10 MHz o en sistemas que puedan verse afectados por dichas frecuencias. A altas frecuencias, un conductor redondo tiene una impedancia mayor que un conductor plano con la misma sección transversal de material, esto mostrado en la Figura 3. 2. [6].

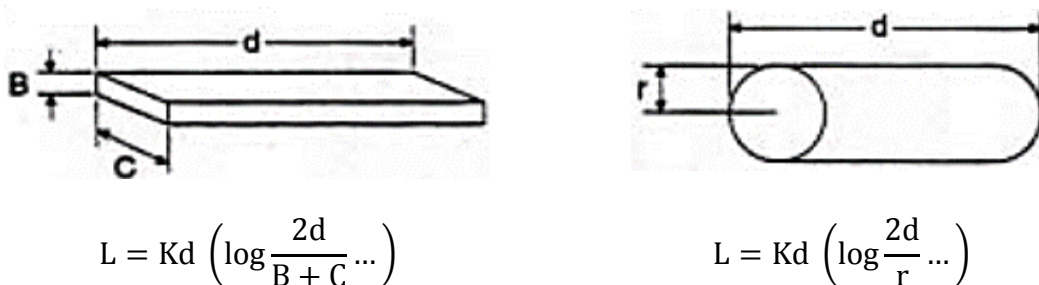


Figura 3. 2. Inductancia relativa de conductores planos y redondos [6].

Pero tenga en cuenta que a veces el efecto de usar conductores planos es mejor que los cables redondos. Se puede alcanzar todavía una menor impedancia por conexiones múltiples [6].

d. Conductores de conexión

Estos conductores dan viabilidad a que las partes conductoras expuestas (como las carcasas o gabinetes metálicos) mantengan el mismo potencial en condiciones de fallas eléctricas. Las dos formas de conectar conductores son: Los principales conductores de conexión equipotencial están conectados entre sí y puestos a tierra. Las partes conductoras expuestas generalmente no transportan corriente, pero pueden transportar corriente en condiciones de falla. A estas conexiones se conectan las tuberías metálicas expuestas de GLP y agua que proveen de servicio a la infraestructura, la estructura metálica del lugar y los servicios eléctricos generales al sistema de puesta a tierra. Para la instalación interna, estas conexiones deben tener un tamaño mínimo específico (al menos 6 mm²), y generalmente no se requieren cables de cobre de más de 25 mm² [5].



Figura 3. 3. Conductor de conexión a tierra de cobre 4/0 AWG.

e. Conductores aislados de conexión

Dependiendo de la señal existente que se transmita y las posibles fuentes de interferencia electromagnética, el blindaje del cable se conecta a la red de puesta a tierra en uno o ambos extremos. Pero en todos los casos, la solución más viable para la conexión es realizar una unión

de 360 grados alrededor del recubrimiento apantallado. Esto puede lograrse con unos prensaestopas metálico adecuado o soldarse a la entrada del armario Figura 3. 4.[6].

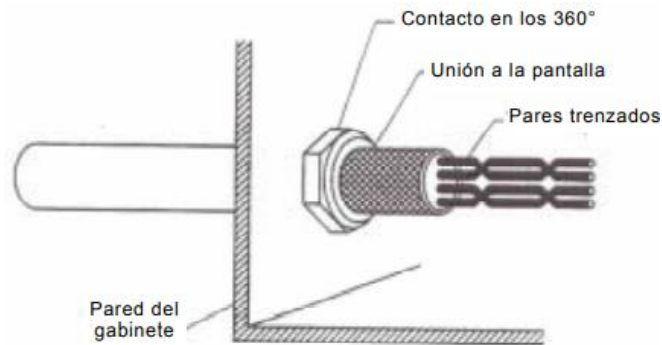


Figura 3. 4. Conexión de un cable apantallado a la envolvente por medio prensaestopas [6].

f. Conductores descendentes de terminal pararrayos.

Estos conductores forman parte de la red del sistema de puesta a tierra y son únicos por variadas razones. La amplitud y frecuencia equivalente de la corriente del rayo requieren que cada terminal de pararrayos utilice más de un conductor de bajada para disminuir la impedancia de la trayectoria, limitar la intensidad en un conductor, prever de riesgo de desconexión de los pararrayos con su respectivo conductor [6].

3.2.2. Vida útil de los electrodos del SPT.

El estándar NBSC 579 es un resumen condensado de las investigaciones sobre la corrosión de metales en suelos realizadas durante un período de 45 años. Las presentes investigaciones fueron realizadas en gran parte del territorio de los Estados Unidos de América, en la Figura 3. 5 se evidencia la variedad de tipos de suelo en donde se llevó a cabo la investigación [7].

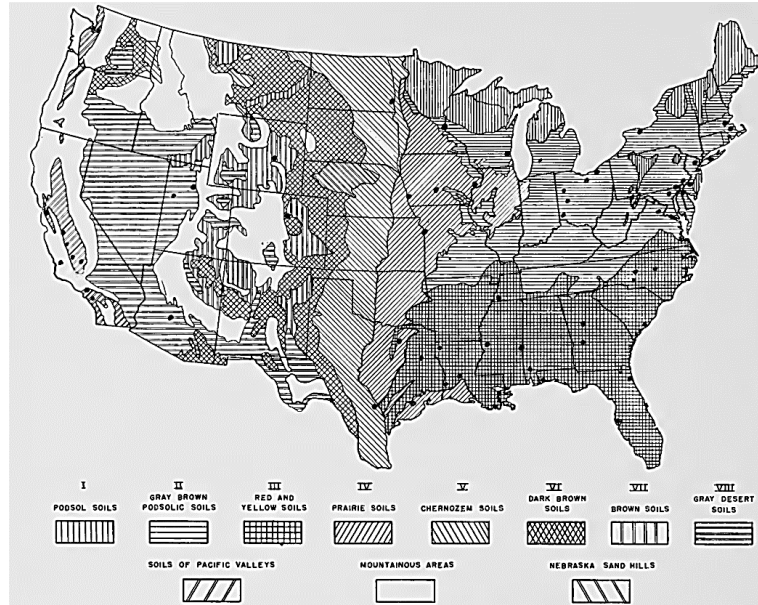


Figura 3. 5. Grupos de suelo de los Estados Unidos [7].

La magnitud del área de estudio brinda la posibilidad de plantear diversos escenarios de la vida útil de los Sistemas de Puesta a Tierra alrededor del mundo. La investigación contempló variedad de tipo de metales como se indica en la Tabla 3. 1 entre ellos los metales que están asociados a los SPT como son el cobre y aleación de cobre integrando 24 variedades y 3828 muestras de cada variedad de cobre [7].

Tabla 3. 1. Alcance de las pruebas de corrosión de la NBSC 579 [7].

Material	Número de Variaciones	Número de espaciamientos enterrados
<i>Ferroso:</i>		
Forjado liso y de baja aleación	40	8,662
Forjado de alta aleación	12	1,391
Fundición simple y de baja aleación	18	3,539
Fundición de alta aleación	2	668
<i>No ferroso:</i>		
Cobre y aleación de cobre	24	3,828
Plomo	8	1,242
Zinc	5	420
Aluminio	45	792

Con estos antecedentes [8] se basa en [7] a través del Proyecto Nacional de Investigación de Conexión a Tierra Eléctrica concluyendo que "las varillas de magnesio, aluminio, zinc, acero

dulce y acero galvanizado no tenían la resistencia a la corrosión deseada". Pero existía la preocupación de que la varilla revestida de cobre puede originar corrosión galvánica al acero dulce acoplado. La cantidad de corrosión galvánica causada por el acoplamiento de cobre y acero variará dependiendo de su relación. Dado que la proporción de acero a cobre en la mayoría de los sistemas de puesta a tierra suele ser grande, la cantidad de corrosión del acero es insignificante. Además, a menudo hay otras fuentes de cobre en el suelo, que pueden aumentar los problemas de corrosión galvánica. El revestimiento de cobre estaba prácticamente libre de corrosión, pero el núcleo de acero se había corroído en la punta hasta un punto de 2 pulgadas dentro del revestimiento en 8 años de investigación [8].

Se han examinado dos estudios que muestran claramente la diferencia de corrosión y, por lo tanto, la vida útil esperada entre varillas galvanizadas y revestidas con cobre que se indican en la Tabla 3. 2 siendo los tiempos máximos permisibles recomendados.

Tabla 3. 2. Tiempo de vida máximo electrodos de puesta a tierra [8].

Tipo de recubrimiento	Vida útil	Aplicaciones
Recubrimiento de zinc de 3.9 mm	10 años	No recomendado para conducción profunda
Recubrimiento de cobre de 10 mm	40 años	Aceptable para aplicaciones de conducción profunda
Recubrimiento de cobre de 13 mm	50 años	Recomendado para aplicaciones de conducción profunda

3.2.3. Tratamiento del Terreno.

Al medir la resistividad del terreno para un diseño de SPT a menudo es difícil obtener los valores deseados para esto los tratamientos químicos que surgen como medios de mejora para disminuir la resistividad del terreno, sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos [9].

Entre los principales tipos de tratamientos químicos para reducir la resistencia a la puesta a tierra se encuentran:

- Tratamiento con sales
- Tratamiento con geles
- Procedimientos Ledoux para la mejora de tomas de tierra

Tratamiento con gel Consiste en tratar el suelo con dos soluciones acuosas mezcladas para formar un gel.

El método de aplicación incluye la adición de electrolito en la ranura y el electrolito se aglomera en forma de gel para mejorar la conductividad del suelo y retener la humedad. De esta

manera se garantiza una efectiva reducción de la resistencia eléctrica para una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones climáticas [9].

3.3. COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EMC.

Se define como la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema para funcionar normalmente en su entorno electromagnético sin causar interferencias electromagnéticas intolerables a ningún objeto en el entorno. Obviamente, cualquier dispositivo, equipo o sistema que requiera energía eléctrica para funcionar se encuentra inmerso en un ambiente que irradia o guía energía electromagnética. El primero tiene espacio libre como medio de propagación, y el segundo requiere de un medio físico, como un sólido, material conductor hueco o materiales dieléctricos. Para cumplir con los requisitos de EMC, es necesario conocer cuáles son los límites de la energía electromagnética radiada y guiada para evitar interferencias o interferencias [10].

La equipotencialización de todas las partes metálicas expuestas del dispositivo y su conexión a la red de puesta a tierra es una forma de cumplir con los requisitos de seguridad (voltaje de contacto y voltaje de paso). La Figura 3. 6 muestra un diagrama esquemático de varios sistemas enlazados a la red del SPT en una estructura de tipología industrial. La realización de esta conexión no solo puede cumplir con los requisitos de seguridad, sino también mejorar la implementación de EMC durante la instalación [6].

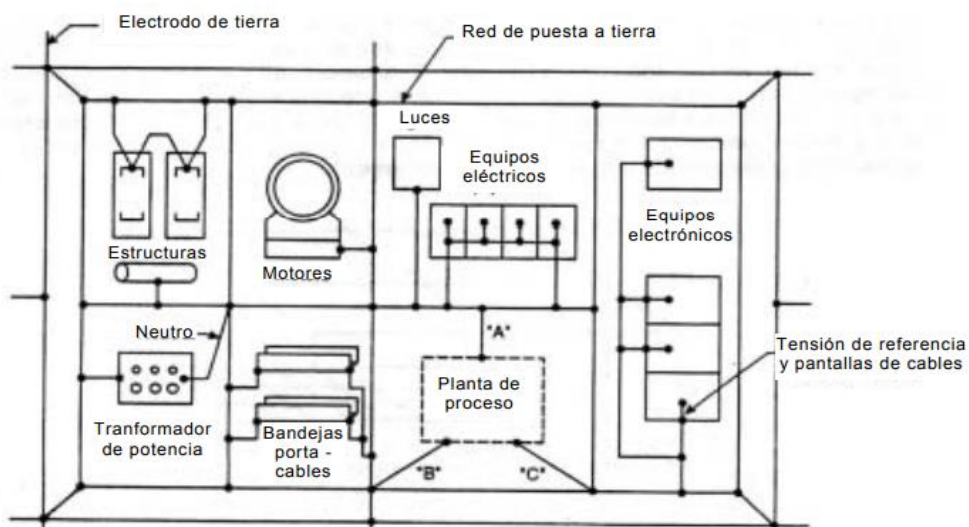


Figura 3. 6. Equipotencialización de aparatos o sistemas a la red de puesta a tierra [6].

3.4. Métodos de evaluación para obtener la resistencia del sistema de puesta a tierra.

Con el tiempo, los suelos con alto contenido de agua, alta salinidad y altas temperaturas reducirán el rendimiento de los materiales de puesta a tierra y sus conexiones. Y aunque el sistema de puesta a tierra al momento que fue instalado en su inicio tenía valores bajos de resistencia, la resistencia del sistema de puesta a tierra puede aumentar si las características de los materiales se pierden [11]. En la tabla 3.1 se muestran valores típicos de resistencias recomendadas por algunas normativas como la NEC, ANSI/IEEE.

Tabla 3. 3. Valores máximos de resistencias de puesta a tierra permitidos[12].

Aplicación	Valor máximo de resistencia de puesta a tierra Ω
Estructuras de líneas de transmisión	20 Ω
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1 Ω
Subestaciones de media tensión	10 Ω
Protección contra rayos	4 Ω
Neutro de acometida en baja tensión	10 Ω
Equipos electrónicos sensibles	5 Ω

Por lo tanto, como parte del plan de mantenimiento predictivo normal, se recomienda encarecidamente inspeccionar todos los sistemas y equipos de conexión a tierra al menos una vez al año. Durante estas inspecciones regulares, si la resistencia medida aumenta en más del 20%, el técnico debe investigar la fuente del problema y hacer correcciones para reducir la resistencia reemplazando o agregando la varilla de tierra del sistema de conexión a tierra. Para comprobar la resistencia de puestas a tierra existen varias metodologías [13]:

a. Método de la pendiente

Se utiliza para sistemas de electrodos a gran escala o situaciones en las que el centro geométrico de la rejilla se desconoce o se encuentra debajo de un edificio. También se utiliza en zonas donde el área disponible para plantar los electrodos de prueba es restringida o limitada. Se puede intentar este método si otros han sido insatisfactorios [14]. En la Figura 3. 7 se muestra la forma gráfica del método.

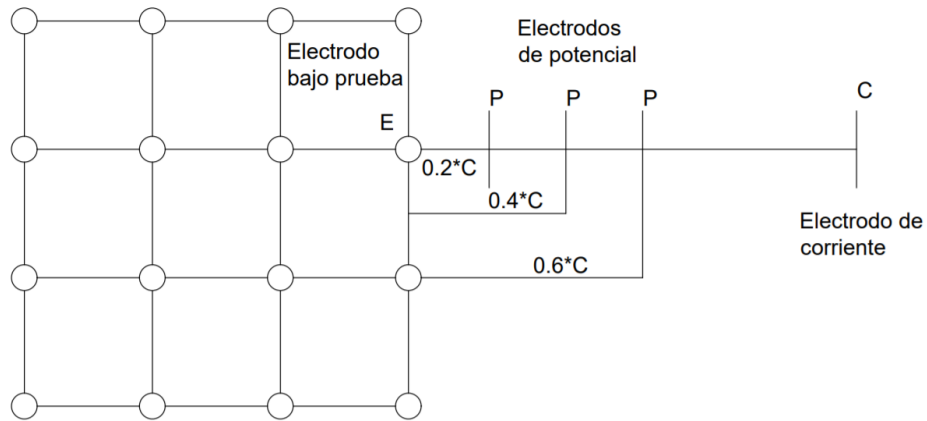


Figura 3. 7. Método de la pendiente para determinar la resistencia del piso [11].

Las mediciones realizadas permiten determinar el valor de u por medio de:

$$u = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} \quad (3.1)$$

En función del valor de u es necesario identificar el valor de k , en la Tabla 3. 4 el dato necesario para establecer una distancia final que se determina por la ecuación (3. 2) del electrodo de potencial para la medición de la resistividad misma que sería la real. Si u pasa del valor determinado la tabla es necesario incrementar la distancia del electrodo de corriente [11].

$$Mn = k * u \quad (3.2)$$

Identificado las distancias finales en donde ubicar los electrodos de potencial se realiza la medición en campo para que al final se realice un promedio de la cantidad de perfiles que se tomaron los datos [11].

Tabla 3. 4. Valores de k en función de u para el método de la pendiente [11].

u	k	u	k	u	k	u	k	u	k
0.01	0.6932	0.39	0.6446	0.77	0.5856	1.15	0.5071	1.53	0.3740
0.02	0.6921	0.40	0.6432	0.78	0.5838	1.16	0.5046	1.54	0.3688
0.03	0.6909	0.41	0.6418	0.79	0.5821	1.17	0.5020	1.55	0.3635
0.04	0.6898	0.42	0.6404	0.80	0.5803	1.18	0.4994	1.56	0.3580
0.05	0.6886	0.43	0.6390	0.81	0.5784	1.19	0.4968	1.57	0.3523
0.06	0.6874	0.44	0.6375	0.82	0.5767	1.20	0.4941	1.58	0.3465
0.07	0.6862	0.45	0.6361	0.83	0.5749	1.21	0.4914	1.59	0.3404
0.08	0.6850	0.46	0.6346	0.84	0.5731	1.22	0.4887	1.60	0.3342
0.09	0.6838	0.47	0.6331	0.85	0.5712	1.23	0.4859	1.61	0.3278
0.10	0.6826	0.48	0.6317	0.86	0.5693	1.24	0.4831	1.62	0.3211
0.11	0.6814	0.49	0.6302	0.87	0.5675	1.25	0.4802	1.63	0.3143
0.12	0.6801	0.50	0.6287	0.88	0.5656	1.26	0.4773	1.64	0.3071
0.13	0.6789	0.51	0.6272	0.89	0.5637	1.27	0.4746	1.65	0.2977
0.14	0.6777	0.52	0.6258	0.90	0.5618	1.28	0.4713	1.66	0.2920
0.15	0.6764	0.53	0.6243	0.91	0.5698	1.29	0.4683	1.67	0.2840
0.16	0.6752	0.54	0.6228	0.92	0.5579	1.30	0.4652	1.68	0.2758
0.17	0.6739	0.55	0.6212	0.93	0.5559	1.31	0.4620	1.69	0.2669
0.18	0.6727	0.56	0.6297	0.94	0.5539	1.32	0.4588	1.70	0.2578
0.19	0.6714	0.57	0.6182	0.95	0.5519	1.33	0.4656	1.71	0.2483
0.20	0.6701	0.58	0.6167	0.96	0.5499	1.34	0.4522	1.72	0.2383
0.21	0.6688	0.59	0.6151	0.97	0.5479	1.35	0.4489	1.73	0.2278
0.22	0.6675	0.60	0.6136	0.98	0.5458	1.36	0.4454	1.74	0.2167
0.23	0.6662	0.61	0.6120	0.99	0.5437	1.37	0.4419	1.75	0.2051
0.24	0.6649	0.62	0.6104	1.00	0.5416	1.38	0.4383	1.76	0.1928
0.25	0.6636	0.63	0.6088	1.01	0.5395	1.39	0.4346	1.77	0.1797
0.26	0.6623	0.64	0.6072	1.02	0.5373	1.40	0.4314	1.78	0.1658
0.27	0.6610	0.65	0.6056	1.03	0.5352	1.41	0.4271	1.79	0.1511
0.28	0.6597	0.66	0.6040	1.04	0.5330	1.42	0.4232	1.80	0.1352
0.29	0.6583	0.67	0.6024	1.05	0.5307	1.43	0.4192	1.81	0.1183
0.30	0.6570	0.68	0.6008	1.06	0.5285	1.44	0.4152	1.82	0.1000
0.31	0.6556	0.69	0.5991	1.07	0.5262	1.45	0.4111	1.83	0.0803
0.32	0.6543	0.70	0.5975	1.08	0.5239	1.46	0.4068	1.84	0.0588
0.33	0.6529	0.71	0.5958	1.09	0.5216	1.47	0.4025	1.85	0.0353
0.34	0.6516	0.72	0.5941	1.10	0.5193	1.48	0.3980		
0.35	0.6502	0.73	0.5924	1.11	0.5169	1.49	0.3935		
0.36	0.6488	0.74	0.5907	1.12	0.5144	1.50	0.3888		
0.37	0.6474	0.75	0.5890	1.13	0.5121	1.51	0.3840		

b. Método de intersección de curvas

En [3], dice que la verdadera resistencia de tierra de un sistema de electrodos se obtiene cuando la pica de potencial P está situada a una distancia del centro eléctrico del sistema, igual al 61.8% de la distancia desde el centro eléctrico hasta la pica de corriente C.

El método incluye obtener varias curvas de resistencia de puesta a tierra, colocar el electrodo de corriente C a diferentes distancias (ver Figura 3. 8), y asumir que el centro eléctrico del sistema de puesta a tierra bajo prueba está en diferentes posiciones. A partir de estas curvas se obtiene la resistencia de puesta a tierra y la posición exacta del centro de la malla [3].

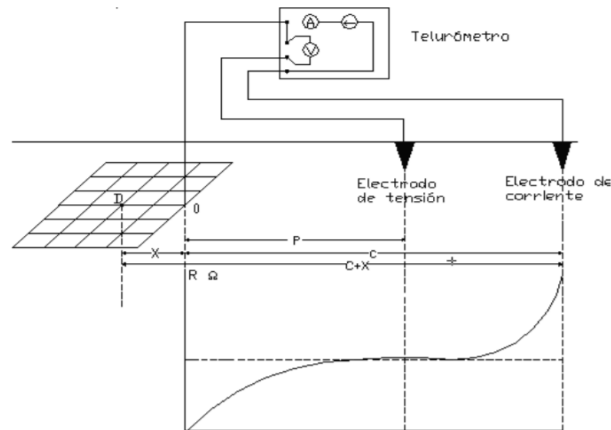


Figura 3. 8. Método de intersección de curvas [3].

Como se observa en la Figura 3. 8, se entiende que el centro eléctrico del sistema a tierra se encuentra en el punto D, y con una distancia que inicia en "O" es "X", este es el punto de conexión entre el telurómetro y la rejilla; posteriormente, la distancia desde el centro hasta el electrodo de corriente. es $C + X$, y el electrodo de potencial está lejos de D. El valor de resistencia en $.618 (C + X)$, es decir, el valor medido de D de O es $0.618 (C + X) - X$. El procedimiento de medida se presenta a continuación [3]:

- Determinar el punto O.
- En función con las medidas de la malla del SPT, determinar la distancia C para el electrodo de corriente, para cada una de las curvas que se quieren plasmar. Para un resultado fino es recomendable lograr como mínimo un número de cuatro curvas.
- Se determina la distancia X como un porcentaje de C (20%, 40%, 60%, 80%, y 100%).
- En el caso de las distancias X_i para cada una de ellas se ubica el electrodo de tensión a una distancia $P_i = 0.618(C+X) - X$.
- Se dibujan las gráficas R_i vs. X_i .

Independientemente del método empleado para evaluar el sistema de puesta a tierra, es prudente que el electrodo bajo prueba no esté en conexión con el sistema que protege, puede ser peligroso en caso de fallo.

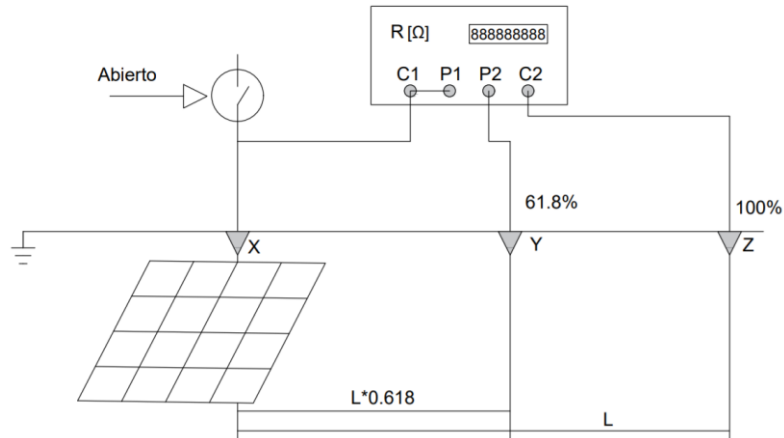


Figura 3. 9. SPT desconectado por seguridad [14].

3.4.1. Medición de resistividad del terreno

Uno de los factores más importantes que afectan la impedancia del sistema de puesta a tierra es la impedancia del medio donde se encuentra el electrodo, en otras palabras, el terreno.

Dado que la resistividad del suelo es un factor muy importante en el comportamiento de los electrodos de tierra, es necesario analizarlo con más detalle. Está representado por [ohm-metro] y esta unidad es la resistencia eléctrica que se miden en un cubo de 1 metro a cada lado de la tierra homogénea.

Existen diversos métodos de medida, los más confiables y usados son las variaciones del método de cuatro electrodos, basado en las teorías propuestas por Frank Wenner (1915) y por Conrad Schlumberger (1912), que parten del Principio de Caída de Potencial [15].

a. Método de Wenner

Consiste en instalar cuatro electrodos en línea recta en el terreno considerando una misma distancia entre ellos. En la norma IEEE -81 se describen detalladamente varias técnicas de medición. El método de cuatro pines de Wenner, como se ve en la Figura 3. 10 es la técnica más utilizada. En resumen, se instalan cuatro picas en la tierra a lo largo de una línea recta, a distancias iguales denominadas a y conducidas a una profundidad denominada b . La tensión entre los dos electrodos interiores La tensión entre los dos electrodos interiores (de potencial) se mide y se divide por la corriente entre los dos electrodos exteriores (de corriente) para obtener un valor de resistencia R [16].

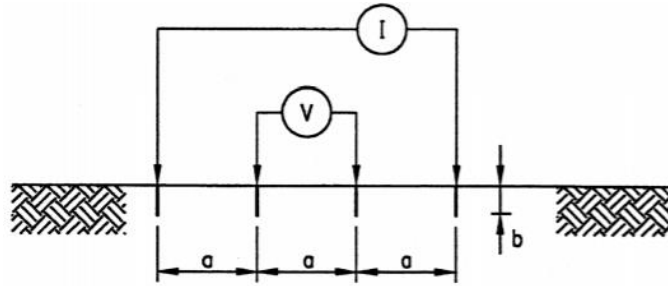


Figura 3. 10. Método de Wenner cuatro electrodos [16].

Luego mida el voltaje (o potencial) entre los dos terminales internos y divida por la corriente (o corriente) entre los dos terminales externos para obtener el valor de la resistencia R , que se muestra en el termómetro. Posteriormente aplique la siguiente fórmula:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (3.3)$$

Teóricamente, los electrodos deberían ser contactos puntuales o electrodos semiesféricos de radio b . Sin embargo, en la práctica, se suelen colocar cuatro varillas en línea recta a intervalos a , conducidas a una profundidad no superior a $0,1 a$. Entonces, el usuario puede suponer que $b = 0$ y la ecuación se convierte en [15]:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (3.4)$$

y da la resistividad aparente aproximada del suelo hasta la profundidad.

3.4.2. Modelos para el análisis de la resistividad del suelo.

a. Modelo de suelo de dos capas.

El modelo de suelo de dos capas puede usar una capa superior con una profundidad finita encima de una capa inferior con una profundidad infinita. El cambio abrupto de la resistividad en las proximidades de cada capa de suelo puede describirse por medio del factor de reflexión

K, definido como: en donde $\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en $\Omega\text{-m}$, $\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa inferior en $\Omega\text{-m}$ [3].

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (3.6)$$

Para la mayoría de casos, la representación del electrodo de tierra basada en el modelo equivalente de dos capas cumple con la exactitud para diseñar un sistema de conexión a tierra seguro. Un modelo de suelo de dos capas puede aproximarse empleando el método gráfico de Sunde [3].

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen por inspección de las medidas de resistividad. Solamente H es obtenido por el método de Sunde, como sigue:

- Dibujar el gráfico ρ_a vs. a.
- De la gráfica anterior se estiman ρ_1 y ρ_2 , extendiendo el gráfico en ambos extremos para obtener los valores de resistividad, si los datos de campo son insuficientes.
- Determinar ρ_2 / ρ_1 y seleccionar una curva del gráfico de la **Figura 3. 11**, o interpolar y dibujar una nueva curva en el gráfico.
- Seleccionar el valor de ρ_a / ρ_1 sobre el eje Y dentro de la región pendiente de la curva ρ_2 / ρ_1 apropiada.
- Leer el valor correspondiente a/h sobre el eje X.
- Calcular ρ_a multiplicando el valor seleccionado ρ_a / ρ_1 por ρ_1 .
- Leer el espaciamiento de prueba correspondiente de la gráfica de ρ_a vs. a.
- Calcular la profundidad del nivel superior H usando la separación de prueba apropiada a.

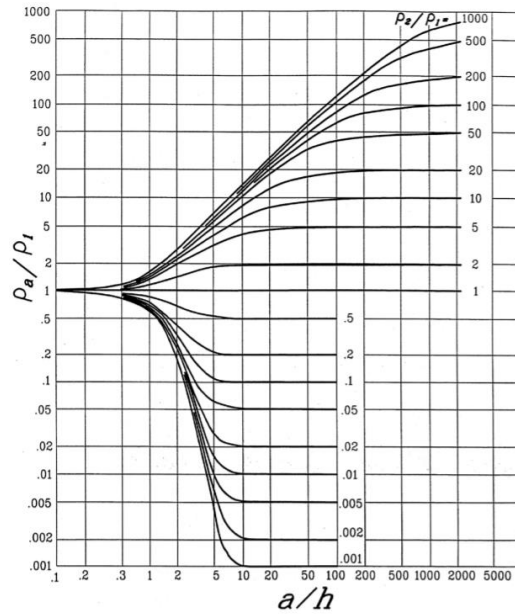


Figura 3. 11. Método gráfico de Sunde [16].

Para aplicaciones en ingeniería energética, el modelo equivalente de dos capas es lo suficientemente preciso en muchos casos sin ser demasiado complicado matemáticamente.

b. Metodología transformación Box-Cox

Para calcular el valor de resistividad del suelo que se requiere para el diseño del SPT, se puede aplicar algunos métodos los cuales determinan que el suelo es de una sola capa o n capas. Cuando la desviación de los distintos valores medidos del valor máximo no supera el 30%, se considera que el modelado homogéneo del suelo es suficiente. Al aplicar el método uniforme, se asume que el terreno es homogéneo, por lo que se requiere un solo valor de resistividad. En este caso, el método Box-Cox es adecuado porque permite calcular un solo valor de resistividad con una probabilidad del 70%.

Para el cálculo de este parámetro se emplea el método probabilístico (transformación de Box-Cox), para lo cual se tomará una probabilidad del 70% como aceptable para la asignación de la resistividad a partir del ajuste de distribución por norma [17].

A partir de los datos de resistividad obtenidos de las lecturas, se aplica el siguiente procedimiento:

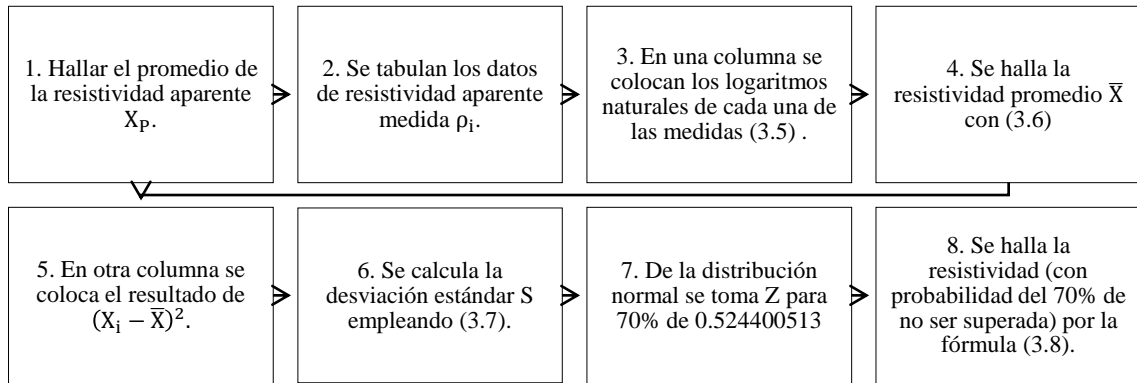


Figura 3. 12. Pasos a seguir para el método de Box-Cox [17].

$$X_i = \text{Ln}(\rho_i) \quad (3.5)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (3.6)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (3.7)$$

$$\rho = \text{AntiLn}(S * Z + \bar{X}) \quad (3.8)$$

c. Metodología Matemático

Al analizar los datos de medición de resistividad aparente obtenidos con el método Wenner, se puede establecer un modelo de suelo de dos capas y se puede realizar la recolección de datos correspondiente usando la Figura 3. 10. La figura muestra los parámetros (ρ_1 y ρ_2 , h) que componen el modelo de suelo de dos capas y la disposición geométrica del método de Wenner. Donde ρ_1 y ρ_2 corresponden a los valores de resistividad de las capas superior e inferior, respectivamente y h corresponde a la profundidad de la capa superior [18].

El proceso para establecer el modelo del suelo de dos capas se plantea como la solución de un problema de optimización no lineal con una función objetivo que se muestra en (3. 9).

$$FO = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\rho_{mj} - \rho_{aj}}{\rho_{mj}} \right)^2 \quad (3.9)$$

Entre ellos ρ_{mj} corresponde a N valores de resistividad medidos, y ρ_{aj} corresponde al valor de resistividad aparente calculado teóricamente usando **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Por tanto, la solución del problema radica en determinar el valor de (ρ_1 y ρ_2 , h) que minimiza la expresión anterior, lo que equivale al valor de resistividad obtenido mediante experimentos utilizando el método de Wenner a partir de la resistividad aparentemente estimada y profundidad de capa superior [18].

$$\rho_{aj} = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[\frac{k^n}{\left[1 + \left(2n \frac{h}{a} \right)^2 \right]^{1/2}} - \frac{k^n}{\left[4 + \left(2n \frac{h}{a} \right)^2 \right]^{1/2}} \right] \right] \quad (3.10)$$

3.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Para el diseño efectivo de un sistema de puesta a tierra, es muy importante comprender los parámetros que afectan su desempeño, como el espaciado y la disposición de los conductores de malla, el número, la ubicación y la corriente de las varillas de puesta a tierra y las fallas.

El diagrama de flujo de bloques mostrados en la Figura (Anexo G) se ilustra las secuencias de pasos recomendado según el estándar IEEE 80-2013 para el diseño de una malla de puesta a tierra y a continuación se muestran los pasos [16].

3.5.1. Corriente de cortocircuito simétrica trifásica

Las fallas más comunes en sistemas de distribución de baja potencia son las fallas simétricas por lo que a continuación se facilitan algunas indicaciones generales respecto a los parámetros típicos que caracterizan los componentes principales de una instalación. El conocimiento de los parámetros siguientes es fundamental para efectuar un análisis exhaustivo de la instalación [19].

a. Corriente de cortocircuito

Un cortocircuito es un fenómeno eléctrico que ocurre cuando dos puntos con diferencia de potencial están en contacto entre sí, y se caracteriza por una alta corriente circulante que llega al punto de falla [19].

b. Tipos de fallas por cortocircuitos en sistemas de potencia.

Cuando los conductores energizados correspondientes a diferentes fases están en contacto entre sí o puestos a tierra, se producirá un cortocircuito en el sistema de potencia. La corriente de cortocircuito suele ser muy alta, entre 5 y 20 veces la corriente de carga máxima en el punto de falla. Los cortocircuitos se pueden clasificar en simétricas (balanceadas) y asimétricas (desbalanceadas). En las fallas simétricas las corrientes de las tres fases del sistema son iguales en el instante del cortocircuito. Entre ellas tenemos [19]:

- **Cortocircuito trifásico:** Se ponen en contacto las tres fases en un mismo punto del sistema. Es el cortocircuito más severo en la mayoría de los casos.
- **Cortocircuito trifásico a tierra:** Se ponen en contacto las tres fases y tierra en un mismo punto del sistema. En las fallas asimétricas la corriente en las tres fases del sistema no es igual en el instante del cortocircuito. Entre ellas tenemos:

c. Datos necesarios para el cálculo

- **Redes de distribución**

Para calcular la corriente de cortocircuito es necesario conocer la potencia de cortocircuito de la red, en un sistema de hasta 30 kV, la potencia de cortocircuito puede oscilar entre 700 MVA y 1500 MVA. Los valores de tensión de la red de distribución MT y los valores de potencia de cortocircuito relevantes aceptados por la norma IEC 60076-5 y se describen a continuación [20].

Tabla 3. 5. Valores de potencia de cortocircuito según nivel de tensión [20].

Tensión de la red de distribución. [kV]	Potencia de cortocircuito Práctica europea actual [MVA]	Potencia aparente de cortocircuito Práctica norteamericana actual [MVA]
7.2-12-17.5-24	500	500
36	1000	1000
52-72.5	3000	3000

- **Transformador**

Un transformador MT/BT con bobinado delta (Δ) y en primario y estrella (Y) con punto conectado a tierra en secundario. Los parámetros eléctricos que suelen conocerse y que caracterizan al transformador son: potencia asignada aparente, tensión asignada del primario, tensión asignada del secundario, tensión cortocircuito en porcentaje (Valores típicos oscilan de 4% a 6%). Con estos datos, es posible determinar las corrientes asignadas del primario y el secundario y las corrientes en condiciones de cortocircuito. Los valores típicos de la tensión de cortocircuito $V_k\%$ y los valores de las máximas corrientes presuntas de cortocircuito previstas para los cálculos en relación con la potencia nominal de los transformadores se detallan en la Tabla 3. 6 y Tabla 3. 7 [20].

Tabla 3. 6. Valores de tensiones de I_{cc} en relación con la potencia del transformador [20].

Potencia nominal aparente S_n [kVA]	Tensión de cortocircuito $V_k\%$
- 630	4
630 < S_n - 1250	5
1250 < S_n - 2500	6
2500 < S_n - 6300	7
6300 < S_n - 25000	8

Tabla 3. 7. Valores de las I_{max} de cortocircuito previstas para los transformadores.

S_{rT} [kVA]	$I''_k =$ [kA]
100	3,568
200	7,074
315	11,028
400	13,899
500	17,229
630	21,458
800	21,768
1000	26,838
1250	27,876

d. Método de solución para el cálculo de cortocircuito

Existen diferentes métodos para determinar la corriente de falla en un sistema eléctrico de potencia y depende mucho del escenario que se va evaluar entre ellos se tiene los métodos de las impedancias, componentes simétricas, potencias (MVAs) y por software.

El método del MVAs sirve para calcular la ICC trifásica simétrica, donde no es necesario considerar la resistencia de los elementos que integran el sistema, se puede emplear un método sencillo para calcular la potencia de cortocircuito simétrico en MVA y a partir de este valor calcular la corriente de cortocircuito en el siguiente diagrama se muestran los pasos a seguir.

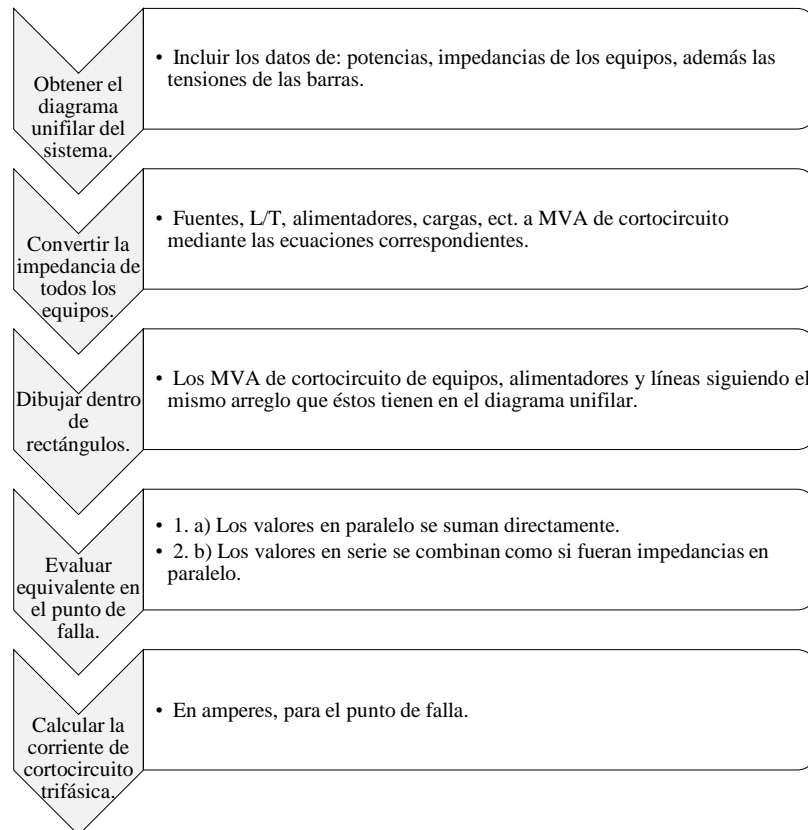


Figura 3. 13. Pasos para determinar la corriente de Cortocircuito¹ [20].

3.5.2. Selección Del Tamaño Del Conductor

La sección transversal del conductor se determina mediante la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en donde la corriente de falla debe ser la máxima corriente futura de falla esperada que puede ser conducida por cualquier conductor del sistema de tierra, y el tiempo t_c , debe reflejar el tiempo de despeje máximo posible [15].

¹ Procedimiento de solución se detalla específicamente en el cuaderno de aplicaciones técnicas n° 2, Subestaciones transformadores MT/BT: teoría y ejemplos del cálculo de cortocircuito (ABB).

$$A_{MCM} = I_F \left(\frac{197,4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \right) \quad (3.11)$$

La fórmula simplificada da una aproximación muy buena

$$A_{MCM} = I_F \cdot K_F \cdot \sqrt{t_c} \quad (3.12)$$

3.5.3. Tensiones de toque y paso tolerables

a. Tensión de Paso

Según la normativa de la IEEE 80-2013, “La tensión de paso, ver Figura 3. 14 (a), es la diferencia de potencial en la superficie terrestre que experimenta una persona a una distancia de un metro con el pie sin tener contacto con cualquier objeto aterrizado”. Y se obtiene mediante la siguiente ecuación expresada para una persona de 50kg [9].

$$E_{p_{50}} = (1000 + 6C_s \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (3.13)$$

b. Tensión de Contacto

La normativa IEEE 80-2013 define que; “La tensión de contacto, es la diferencia de potencial entre el aumento del potencial de tierra y el potencial de superficie en un punto donde una persona se encuentra de pie y al mismo tiempo tenga en contacto con una estructura aterrizada”. Y se obtiene mediante la siguiente ecuación expresada para una persona de 50kg [9].

$$E_{t_{50}} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (3.14)$$

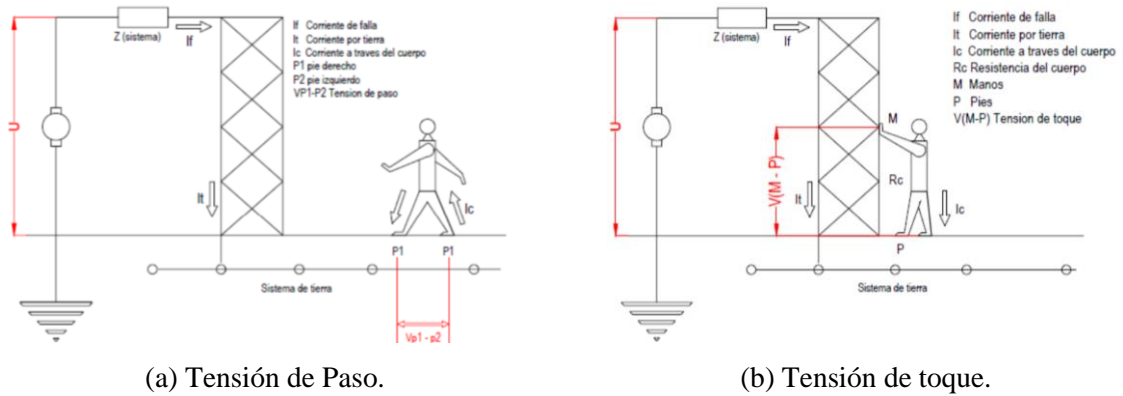


Figura 3. 14. Tensiones consideradas para el diseño de un SPT [9].

3.5.4. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

Para el cálculo de una malla de puesta a tierra, mediante cálculos simplificados la cual fue formulada por Sverak con la siguiente ecuación:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{LT} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (3. 15)$$

Donde la LT e la longitud total de conductores enterrados en m, ρ es la resistividad del terreno, A es el área ocupada por la malla de tierra en m^2 y H es la profundidad de la malla en m (3).

3.5.5. Determina la corriente máxima de malla

La corriente máxima por disipar por la malla en caso de falla está determinada mediante la ecuación, (3. 16), Para evitar que el sistema de puesta a tierra sea demasiado grande, utilice únicamente la parte de la corriente de falla que fluye a través de la rejilla de puesta a tierra y entra a tierra.

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p \quad (3. 16)$$

El factor de reducción Df se utiliza para incluir la influencia del componente de CC. Este coeficiente determina el valor rms equivalente de la onda de corriente asimétrica para una determinada duración de falla t_f , teniendo en cuenta la influencia de la componente de CC

inicial y su atenuación durante la falla. En la Tabla 3. 8 se pueden observar los valores de Df [3].

Tabla 3. 8. Valores típicos de Df [3].

Duración de la falla, tf		Factor de decremento, Df			
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

3.5.6. Cálculo del potencial máximo de la malla

Un buen sistema de puesta a tierra proporciona una resistencia baja a una tierra remota, con el fin de minimizar la elevación de potencial de tierra GPR, dada por la ecuación (3. 17).

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (3. 17)$$

3.5.7. Determinación de la tensión máxima de malla.

El valor de la tensión real de la malla se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} \quad (3. 18)$$

donde K_m , es el valor geométrico de espaciamiento de la malla, calculado mediante la ecuación 3.10, I_G es la corriente máxima de la malla evaluada anteriormente, ρ es la resistividad

del terreno, K_i es el factor de irregularidad y se define mediante la ecuación (3. 20) y L_M es la longitud efectiva enterrada como se ve en la ecuación (3. 21).

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd_c} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_c} + \frac{h}{4d_c} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (3. 19)$$

$$K_i = 0,644 + 0,148n \quad (3. 20)$$

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] L_R \quad (3. 21)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad (3. 22)$$

Para el cálculo de la tensión de paso real se utiliza la ecuación (3. 23).

$$E_p = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_S \cdot K_i}{L_S} \quad (3. 23)$$

En donde L_S , es el valor de la longitud efectiva enterrada se obtiene mediante la ecuación 3.15, K_S es el factor de espaciamiento para la tensión de paso evaluada en la ecuación (3. 25).

$$L_S = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R \quad (3. 24)$$

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{Dh} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (3. 25)$$

Los parámetros que son necesarios para determina el factor K_m se describe los siguiente L_C es la longitud total de los conductores de la malla horizontal en m, L_P es la longitud del perímetro de la malla en m, L_R es la longitud total de todas las varillas, y n representa el número de conductores paralelos de una malla rectangular equivalente esto varía dependiendo de la forma de la malla como se describe a continuación.

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (3.26)$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P}; n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{A}}}; n_b = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_x \cdot L_y}}; n_c = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 \cdot L_y^2}} \quad (3.27)$$

$n = n_a$ para mallas cuadradas

$n = n_a \cdot n_b$ para mallas rectangulares

$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c$ para mallas en forma de L

Para lo siguiente se detalla que L_x es la longitud máxima de la malla en la dirección X en m, L_y es la longitud máxima de la malla en la dirección Y, y D_m es la distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la malla todo esto en m.

K_h es un factor de corrección que tiene en cuenta los efectos de la profundidad de la malla dado en la ecuación (3.28).

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad (3.28)$$

En donde h es la profundidad que está enterrado la malla y h_o es considerado un factor por lo general $h_o = 1$ [15].

3.6. ELEMENTOS FINITOS

3.6.1. Sistemas discretos

Los sistemas discretos son un conjunto finito de elementos que interactúan entre sí. Un sistema discreto puede aproximarse a un sistema real o un sistema ideal para fines prácticos de análisis del comportamiento de sus componentes.

Un sistema discreto debe tener suficientes elementos y tomar en cuenta los principales fenómenos que gobiernan el comportamiento del sistema real para que se comporte como su par.

3.6.2. Método de elementos finitos (FEM)

FEM es el uso de sistemas discretos para estudiar sistemas reales o sistemas ideales, lo que nos permite aproximar el campo variable bajo fenómenos físicos. Este método se puede utilizar para estudiar la complejidad de un sistema que hace que su caracterización y solución como un sistema continuo sea impráctica o imposible. El método incluye dividir el cuerpo principal del sistema en un número limitado de elementos, de modo que, al analizar cada elemento, se requieran operaciones matemáticas simples para definir y resolver. La siguiente Figura 3. 15, representa la discretización de una sección hemisférica, Cada elemento está confinado entre nodos y dentro de cada elemento se asume comportamientos continuos del fenómeno en estudio [4].

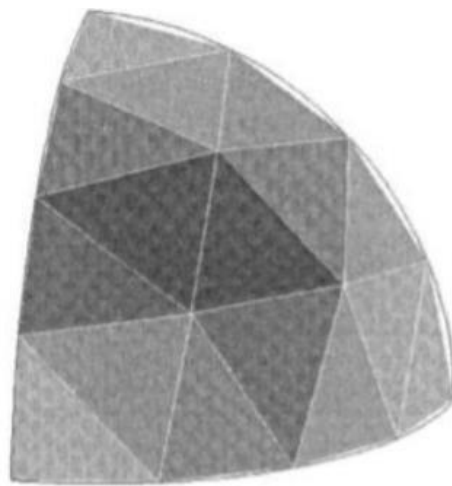


Figura 3. 15. Sección hemisférica discretizada en elementos [4].

3.6.3. Secuencia General del Método de elementos finitos (FEM)

Las soluciones analíticas de sistemas geométricos complejos son muy difíciles. Además, las condiciones de carga y borde del sistema a estudiar también pueden alcanzar un alto grado de complejidad. FEM considera los cuatro pasos del modelado del sistema, en los que se pueden programar de manera ordenada las características y condiciones del sistema de control a estudiar [4].

- a. Modelación de la geometría
- b. Mesheado (discretización)
- c. Especificación de las propiedades de los materiales
- d. Especificación de condiciones de borde y cargas.

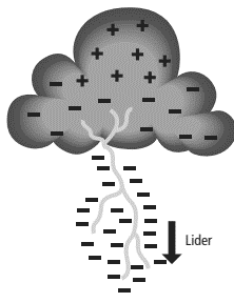
3.7. APANTALLAMIENTO

Estos sistemas tienen como objetivo proteger a las personas y edificaciones contra descargas atmosféricas, además de reducir el número de interrupciones en los sistemas eléctricos, de manera tal que, cuando éstas impacten sobre el sistema de apantallamiento se descarguen a tierra.

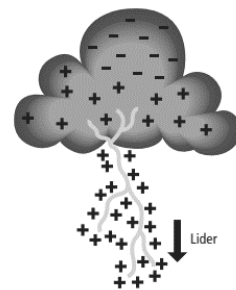
3.7.1. El Rayo

Hay un conjunto de cargas estáticas dentro de la nube, los expertos señalan que generalmente la parte central de la nube está cargada negativamente y la parte superior está cargada positivamente, y las cargas positivas a menudo se encuentran en la parte inferior de la nube.

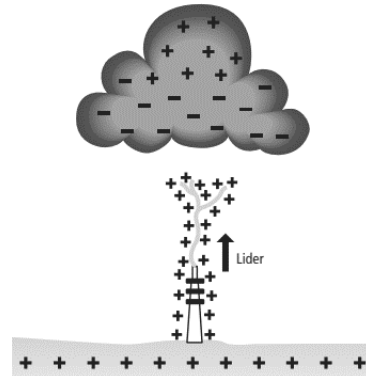
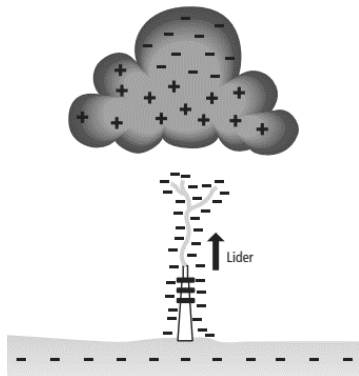
El rayo es una descarga transitoria de alta intensidad; la mitad de estos rayos aparecen en la nube y la otra mitad aparece entre la nube y el suelo. Se puede pensar en el rayo como una fuente de corriente, que puede tener una polaridad positiva o una polaridad negativa o ambas en la misma descarga, lo que se denomina onda bipolar. Se han identificado cuatro tipos de rayos entre la nube y el suelo [21].



Rayo descendente negativo nube-tierra



Rayo descendente positivo nube-tierra



Rayo ascendente negativo tierra-nube

Rayo ascendente positivo tierra-nube

Figura 3. 16. Proceso de descarga de un rayo [22].

En términos generales, se han identificado cuatro tipos de rayos entre la nube y el suelo. Las descargas negativas representan el 90% de todas las descargas que aterrizan en la tierra; menos del 10% de las descargas son positivas. También hay descargas del suelo a las nubes, pero estas descargas son relativamente raras y generalmente ocurren en áreas de gran altitud, picos de montañas o estructuras altas hechas por el hombre [21].

El nivel cerámico se define como el número de días de tormenta en los cuales se ha escuchado al menos un trueno. Anteriormente éste era medido por las personas de una determinada localidad, actualmente los institutos nacionales de Meteorología tienen sistemas de teledetección de rayos para la contabilización de las descargas atmosféricas, los datos son acumulados y procesados cada año.

Los mapas cerámicos pueden cambiar de un año a otro según el tipo de tormentas, su trayectoria e inclusive por el calentamiento global. Por este motivo es indispensable tener el registro estadístico histórico para poder comparar los datos [23].

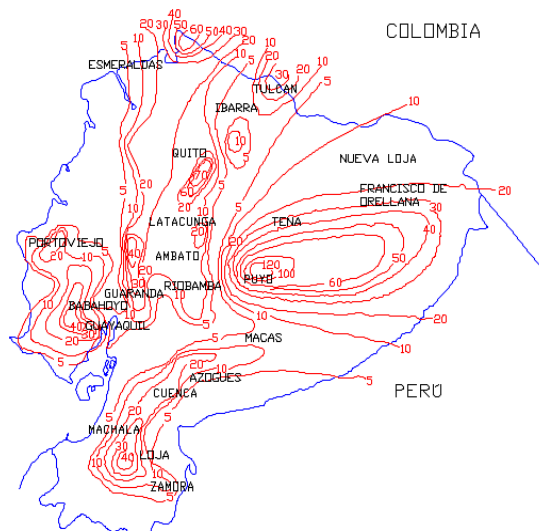


Figura 3. 17. Mapa Isocerámico del Ecuador [24].

Debido a los registros bastante inexactos de los días de tormenta observados en las estaciones meteorológicas, en lugar de niveles cerámicos, la densidad de emisiones al suelo se utiliza en todo el mundo, que se obtiene mediante medición directa utilizando registradores electrónicos.

Cuando sucede una descarga atmosférica, independientemente de su tipo, existen varios parámetros de corriente para caracterizarlo, esto se muestra en Figura 3. 12. [25].

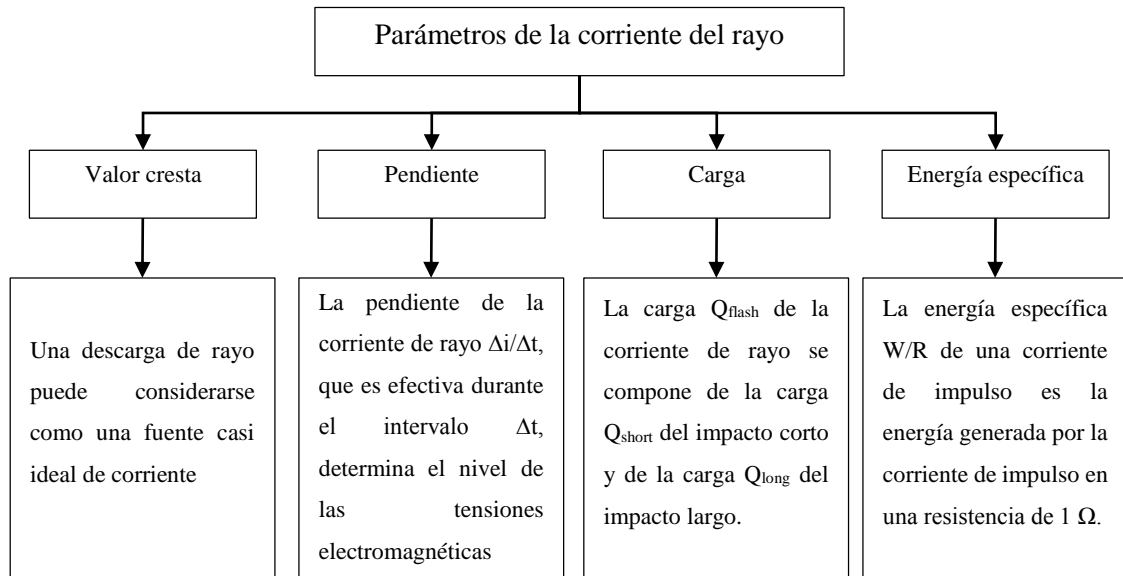


Figura 3. 18. Parámetros de la corriente del rayo [22].

3.7.2. Pararrayos

Fue inventado en 1752 por Benjamín Franklin, debido a esto el primer modelo se conoce como pararrayos Franklin. Un pararrayos es un instrumento cuyo objetivo es atraer un rayo ionizando el aire para excitar, llamar y conducir la descarga hacia tierra, de tal modo que no cause daños a las personas o construcciones, junto a una serie de materiales estos son utilizados para implementar sistemas de protección para edificaciones ante descargas atmosféricas; por mencionar algunos [26].

a) Sistema Franklin

Este es un sistema simple y antiguo que consta de terminales de antena de cobre, bronce o aluminio anodizado, son colocadas encima de las estructuras que se protegerá de las descargas atmosféricas. Este sistema es aplicado en estructuras no ordinarias por mencionar iglesias, graneros o casas de campo [26].

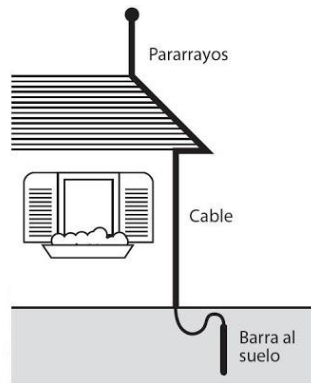


Figura 3. 19. Elementos de un sistema Franklin [27].

b) Sistema tipo Jaula Faraday

Es una modificación del sistema de puntas Franklin añadiendo a las terminales aéreas conductores que crucen sobre la estructura a proteger cómo si de una caja de Faraday se tratara limitada sobre y a los lados de la construcción, y todo este conjunto se conecta a múltiples cables de bajada, que finalmente se conecta al sistema de tierras conectado al perímetro de la edificación. Es utilizado para grandes estructuras [26].

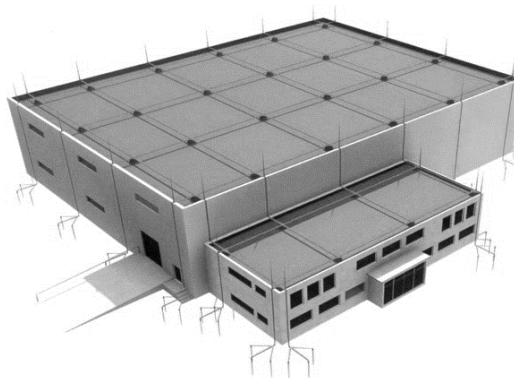


Figura 3. 20. Mallado de una estructura formando una Jaula de Faraday [27].

c) Sistema Puntas de Inicio

Son las que inician la descarga hacia arriba unos microsegundos antes de la descarga principal. Consecuencia de esto se traduce en una zona de protección de forma parabólica alrededor de la punta [26].

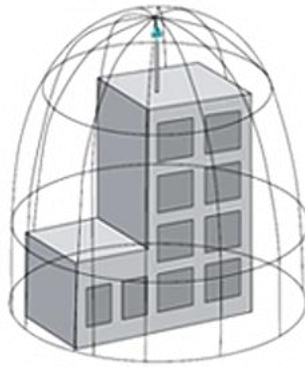


Figura 3. 21. Punta captadora que protege a un edificio [27].

a. Normativas De Protección

Existen varias normativas que sustentan los procedimientos adecuados de sistemas de protección contra descargas atmosféricas, su aplicación ha variado de acuerdo con cada país y sus circunstancias climáticas, por mencionar, en países europeos existen menos impactos de rayo a comparación de los latinoamericanos [22].

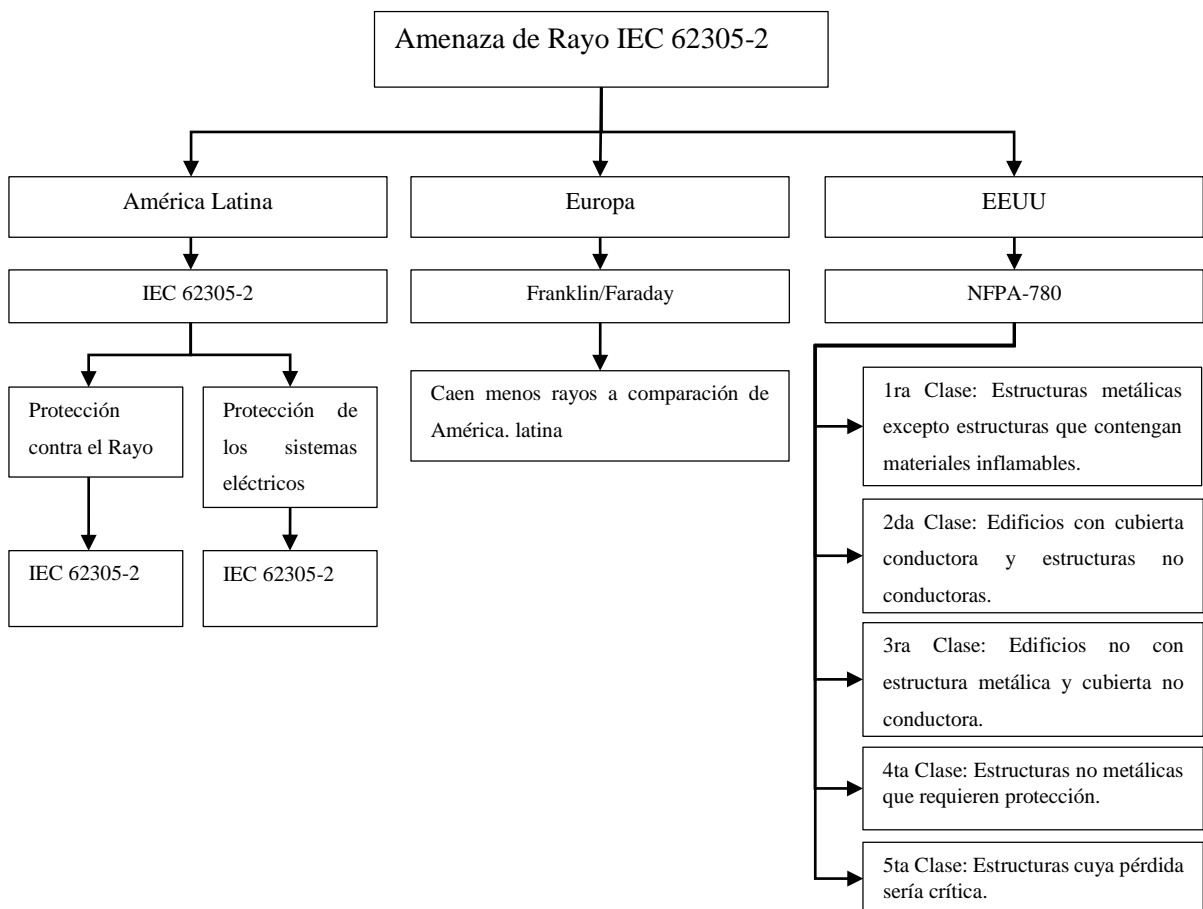


Figura 3. 22. Normativas empleadas para la protección ante descargas atmosféricas [22].

3.7.3. Niveles de protección contra el rayo (NPR)

Según [27], cada NPR considera 4 niveles de protección contra rayos (I a IV) y establece un conjunto de parámetros de corriente de rayo máxima y mínima.

Los valores máximos de los parámetros de la corriente del rayo de diferentes niveles se muestran en la Tabla x para el diseño se utiliza para diseñar componentes de protección contra rayos y definir parámetros de prueba que simulan el impacto de los rayos en estos componentes.

El valor mínimo de la corriente del rayo se utiliza en diferentes NPR para calcular el radio de la esfera virtual para definir la zona de protección ZPR que los rayos no pueden alcanzar directamente.

Tabla 3. 9. Valores de los parámetros del rayo acorde a los niveles de protección [27].

Primer impulso corto			Niveles de protección			
Parámetros de Corriente	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Valor de cresta de la corriente	I	kA	200	150	100	
Carga de impulso corto	Q_{short}	C	100	75	50	
Energía específica	W/R	MJ/ Ω	10	5,6	2,5	
Parámetros de tiempo	T_1/T_2	$\mu s/\mu s$	10/350			
Primer impulso corto			Niveles de protección			
Parámetros de Corriente	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Valor de cresta de la corriente	I	kA	50	37,5	25	
Pendiente media	di/dt	kA/ μs	200	150	100	
Parámetros de tiempo	T_1/T_2	$\mu s/\mu s$	0,25/100			
Impulso largo			Niveles de protección			
Parámetros de Corriente	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Carga del Impulso largo.	Q_{long}	C	200	150	100	
Parámetros de tiempo	T_{long}	s	0,5			
Descarga			Niveles de protección			
Parámetros de Corriente	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Carga de la descarga	Q_{flash}	C	300	225	150	

Los parámetros mínimos de la corriente del rayo relacionados con el radio de la esfera virtual se muestran en la Tabla 3. 9 se utilizan para determinar la ubicación del equipo captador y definir el área protegida.

Tabla 3. 10. Valores máximos de los parámetros del rayo [27].

Criterios de intercepción			Niveles de protección			
Parámetros de Corriente	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Carga del Impulso largo.	I	kA	3	5	10	16
Parámetros de esfera	r	m	20	30	45	60

A partir de la distribución estadística dada en la Tabla 3. 10, la probabilidad ponderada puede representar los parámetros de la corriente del rayo que son inferiores al valor máximo y respectivamente superiores al valor mínimo definido para cada nivel de protección, como se muestra en la

Tabla 3. 11.

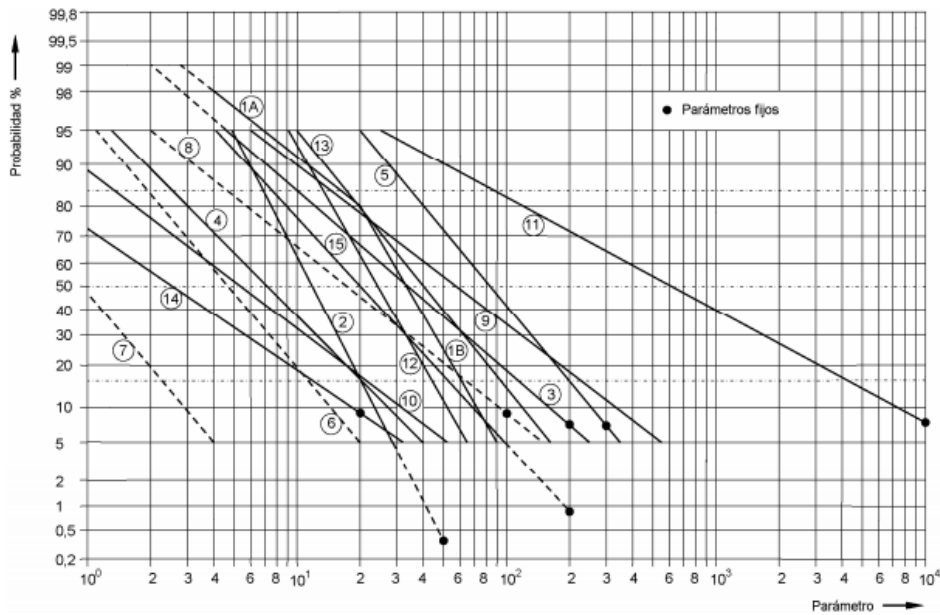


Figura 3. 23. Frecuencia de distribución acumulativa de los parámetros de la I_{rayo} [27].

Tabla 3. 11. Valores característicos de los parámetros del rayo [27].

Probabilidad para que los parámetros del rayo sean	Niveles de protección			
	I	II	III	IV
Inferiores a los valores máximos	0,99	0,98	0,97	0,97
Superiores a los valores mínimos	0,99	0,97	0,91	0,84

3.7.4. Factor de riesgo

El factor de riesgo es un punto indispensable y necesario para tratar con detenimiento porque clasifica la estructura acorde al nivel correspondiente y tiene como objetivo proporcionar un procedimiento para evaluar los riesgos declarados. Una vez que hay Al elegir un límite superior tolerable para el riesgo, el programa permite la selección de medidas de protección adecuadas para reducir el riesgo al límite o por debajo del mismo. Tolerable.

El riesgo, definido por IEC 62305 como la pérdida anual promedio que puede ser causada por un rayo en la estructura, depende de:

- La cantidad de rayos anuales que afectan la estructura.
- Posibilidad de daño causado por uno de los rayos influyentes.
- La cantidad promedio de pérdidas indirectas.

Para cada tipo de siniestro que pueda aparecer en la estructura se evaluarán los riesgos asociados [28]. El factor de riesgo en una edificación se lo mide acorde al sistema de protección contra el rayo (SPCR),

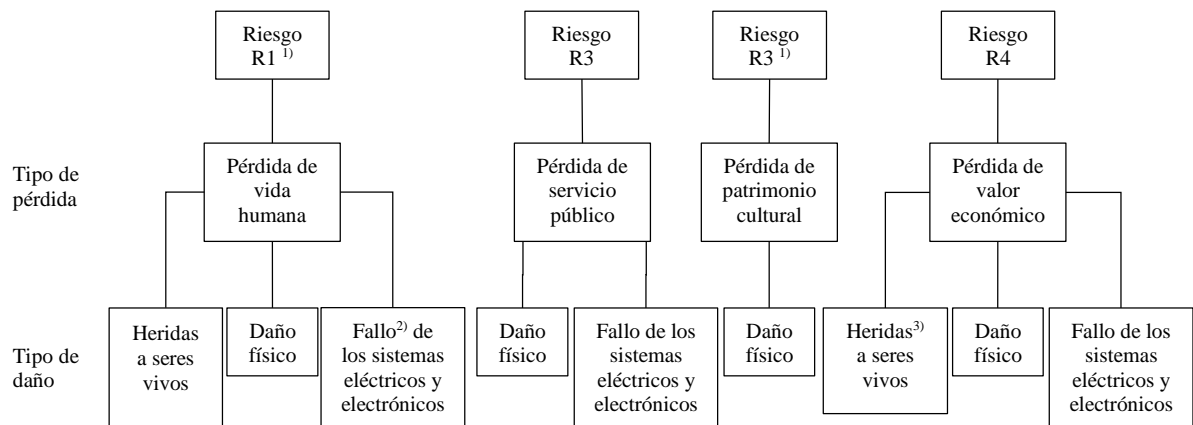


Figura 3. 24. Riesgos asociados y tipos de pérdidas por exposición al rayo [27].

El tipo de pérdida en función del tipo de daño y el riesgo correspondiente se indica en Figura 3. 24 de los cuales: 1) es solo aplicable a estructuras, 2) es solo aplicable a hospitales o estructuras similares donde las fallas del sistema interno pondrán inmediatamente en peligro la vida y finalmente 3) Solo en caso de pérdida de animales.

La necesidad de protección, los beneficios económicos de instalar las medidas de protección adecuadas y sus respectivas opciones deben determinarse en función de los riesgos de la infraestructura civil y eléctrica, y considerando los operadores de la zona [27].

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Para realizar este proyecto se requiere aplicar el método de investigación deductivo, este método se usará para el análisis de metodologías y procedimientos de diagnóstico y diseño de Sistema de Puesta a tierra, además con la ayuda del método descriptivo se realizará la recolección, tabulación y posterior proceso de los datos, a través de una investigación documental mediante el análisis de fuentes bibliográficas, se apoya teóricamente, a partir de información de fuentes secundarias, utilizando textos, normativas, guías, revistas, artículos, tesis y normativa consolidada, para la medición, cálculo, diseño y simulación de puesta a tierra y apantallamiento en la Estación Cotopaxi.

4.2. MATERIALES E INSTRUMENTOS.

4.2.1. Normativas

Las normativas se caracterizan debido al sujeto que las emite, así como de su exigencia, su cumplimiento y el ámbito de aplicación, para establecer una diferenciación entre ellas se toma en cuenta de sus características. En sí es un documento de solicitud voluntaria, que contiene especificaciones técnicas basadas en la experiencia y los resultados del desarrollo tecnológico. La estandarización ayuda a aumentar la productividad, la competitividad y el crecimiento económico.

En el presente proyecto se mencionan algunas normativas que son esenciales para llevar a cabo dentro de los parámetros establecidos por los entes reguladores nacionales e internacionales que se detallan a continuación:

b. Disposiciones Internacionales

En el ámbito internacional, es muy conocido y empleado el grupo de estándares del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers*):

IEEE / Std. 80-2013 Guía de seguridad para la puesta a tierra de subestaciones de CA. (*Guide for Safety in AC Substation Grounding*).

IEEE / Std. 81-2012 Guía para la medición de Resistencias de Tierra, Impedancias de Tierra y Potenciales de Superficie de Tierra en Sistemas de Aterramiento. (*Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*).

IEEE / Std. 998-2012 Guía para el apantallamiento directo de subestaciones contra el rayo. (*Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations*).

IEEE / Std. 242-2001 Protección y coordinación de sistemas eléctricos industriales y comerciales. (*Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*).

IEEE / Std. 142-2007 Puesta a tierra de sistemas eléctricos industriales y comerciales. (*Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*).

IEEE / Std. 1100-2005 Alimentación y conexión a tierra de equipos electrónicos. (*Powering and Grounding Electronic Equipment*).

NFPA 70, *National Electrical Code* (NEC)

IEC - 62305-1 Protección contra el rayo Parte 1: Principios generales. (*Protection against lightning Part 1: General principles.*)

IEC - 62305-2 Protección contra el rayo Parte 2: Manejo del riesgo. (*Protection against lightning Part 2: Risk management*)

IEC - 62305-3 Protección contra el rayo Parte 3: Daño físico a estructuras y riesgo humano (*Protection against lightning Part 3: Physical damage to structures and life hazard*)

IEC - 62305-4 Protección contra el rayo Parte 4: Sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras (*Protection against lightning Part 4: Electrical and electronic systems within structures*)

NTC 4552-2 Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (Rayos) Parte 2: Manejo del Riesgo.

c. Disposiciones Reglamentarias en el Ecuador

La autoridad administrativa sectorial en el área eléctrica tiene a su cargo la NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción).

- Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) CAP15.
- NEC SB IE Norma Ecuatoriana de la Construcción Instalaciones Eléctricas.
- Instalación de pararrayos; (según Norma Tecnológica de la Edificación NTE-IPP: Pararrayos).

4.2.2. Software

A partir de las ecuaciones y procedimiento expuesto en la normativa IEEE 80 se desarrollará una herramienta utilizando el editor de interfaces de usuario del software MATLAB, esta herramienta tiene integrado el módulo GUIDE el cual es un entorno de programación visual para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos [29] [30]. Mientras que para determinar el error cuadrático de las resistividades obtenidas en la medición de la resistividad del terreno se programará un código en el Software Python, este es una herramienta de uso libre y está siendo desarrollado continuamente por una gran comunidad de desarrolladores, con ese principio se puede realizar procesos matemáticos de manera libre [31].

Luego de plantear el diseño de la malla de puesta a tierra se procede a modelar con la finalidad de validar la elaboración de la interfaz gráfica y equipotencializar la malla existente con el nuevo diseño, para esto se emplea el Software ETAP. Este es una herramienta de análisis y control para el diseño, simulación y operación de sistemas de potencia eléctricos de generación. Distribución e industriales [32]. En sí es una herramienta disponen de una gran variedad de módulos como son:



Figura 4. 1. Funcionalidades que dispone el software Etap [33].

4.4. DIAGNÓSTICO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA

La Estación Cotopaxi cuenta con un sistema eléctrico cuyo nivel de tensión es 22.8 kV en el ramal principal, se alimenta con energía provista por la Empresa Eléctrica Quito y se localiza en el sector el Boliche perteneciente al cantón Machachi provincia de Pichincha.



Figura 4. 2 Estación Cotopaxi perteneciente al Instituto Geográfico Militar.

La estación ha estado funcionando de forma continua durante 67 años en los que su SPT ha estado expuesto a factores ambientales propios de la localidad, razón por la cual es importante evaluar y diagnosticar este sistema para obtener información y datos actualizados de la resistividad del terreno y la resistencia, a fin de verificar su cumplimiento con normativas y estándares vigentes, en la se muestra la disposición actual de la malla.

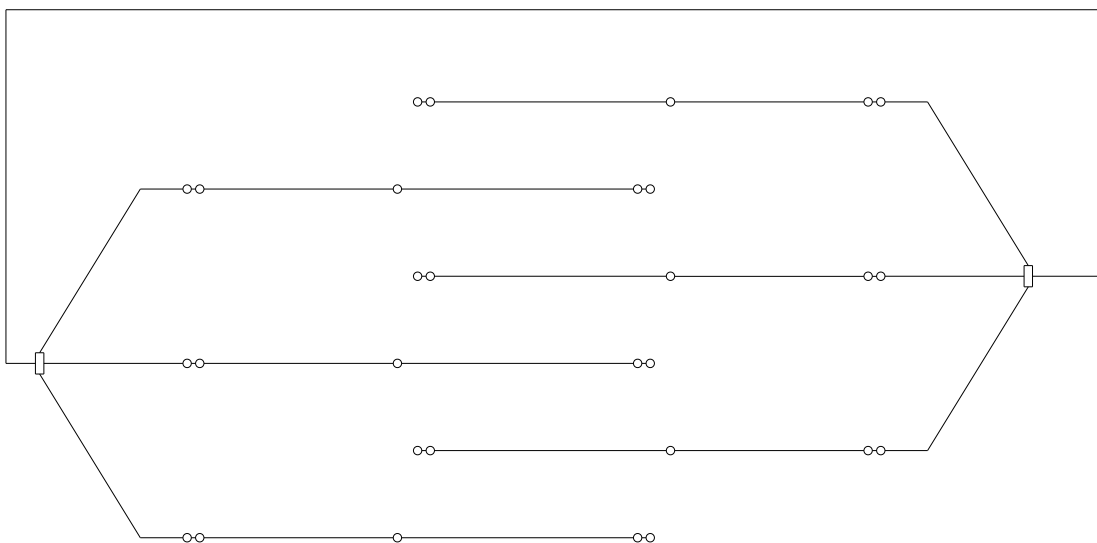


Figura 4. 3. Configuración actual del SPT.

El sistema de puesta a tierra de la estación fue realizado en el año 1954 por la Estación Aero Espacial Americana (NASA). Está compuesta por una serie de mallas interconectadas con todos los equipos y estructuras presentes en dicha Institución en donde mediante visita en campo se pudo obtener los siguientes datos.

Tabla 4. 1. Características de la malla principal del SPT

Profundidad de enterramiento	0.50 m
Conductor de tierra de señal	Cable de cobre cubierto AWG # 4/0
Conductor de protección y servicio	Cable de cobre desnudo AWG # 4/0.
Conductor de equipotencialización	Cable de cobre aislado 500 MCM
Unión entre los conductores	Soldadura exotérmica
Electrodos	Varilla de acero revestido de cobre $\frac{3}{4}$ " 330 m(MICRAS)
Tiempo de instalación al 2021	67 años

Desde que fue implementada la malla, hasta el momento se ha realizado solo una evaluación en el año 2008 donde se determina el buen estado de funcionamiento de la malla de puesta a tierra, por otra parte, solo se cuenta con los planos de diseño, en los cuales se describen la posición exacta de los conductores de tierra y el área cubierta por la malla dentro de la Estación.

Para analizar el SPT de la Estación Cotopaxi se parte de la recolección de datos, que incluye las posiciones exactas de los elementos que componen la rejilla radial, tales como conductores de protección, conductores de tierra de servicio y señal, y los correspondientes componentes.

En el Anexo A se puntualiza el plano de la ubicación de la cuadrícula de tierra y el diagrama unifilar. A continuación, se especifica el procedimiento para el diagnóstico del sistema.

4.3.1. Métodos de medición de la resistencia de puesta a tierra.

Para realizar el diagnóstico y el estudio correspondiente a la malla de tierra, se ha utilizado el instrumento medidor de resistencia y resistividad de doble tenaza con registro de datos, marca ETCR-3200, aplicando las metodologías de pendiente e intersección de curvas como se muestra en la Figura 3. 7 y Figura 3. 8 respectivamente.



Figura 4. 4. Medidor de resistencia y resistividad doble tenaza ETCR-3200 [34].

a. Método de la pendiente.

En el presente método la cantidad de cable disponible del equipo entre los electrodos de corriente y potencial es de 29 m en donde se realiza la toma de datos en tres perfiles distintos para establecer un promedio que pondere el valor de la resistividad del terreno. Acorde al sistema perteneciente a la Estación Cotopaxi, la aplicación del método se aplica de la siguiente manera:

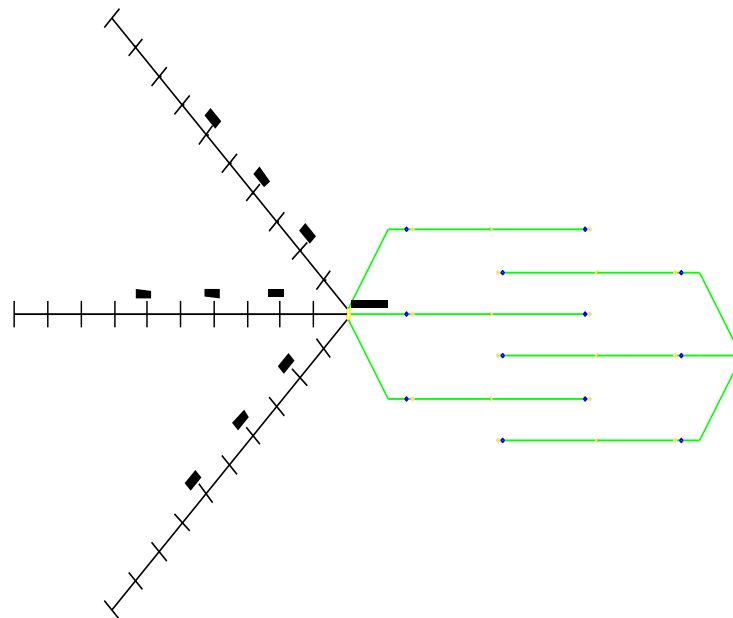


Figura 4. 5. Disposición de los electrodos, para aplicar el método de la pendiente.

Los resultados de resistencia para el cálculo de u son los siguientes:

Tabla 4. 2. Valores de medición en 3 perfiles.

	M1 N-E	M2 O-E	M3 S-E	DISTANCIA TOTAL
M1Ω	1,47	0,93	1,12	29
M2Ω	2,76	1,68	2,88	29
M3Ω	4,93	2	5,36	29

Con los datos obtenidos en la Tabla 4. 2 se obtiene los valores de u para cada perfil.

Tabla 4. 3. Valores de k para determinar la distancia final.

Cálculo del valor de u	Calculado	k
M1	1,682	0,2758
M2	0,427	0,6404
M3	1,409	0,4271

Determinado k se realiza el producto de $u \cdot k$ en donde el valor obtenido se multiplica por la distancia establecida por el electrodo de corriente con el de potencial mismo valor es de 29 m teniendo como resultado final de distancia lo siguiente:

Tabla 4. 4. Distancia final para la ubicación de electrodos.

NUEVO VALOR DE DISTANCIA	k	$u \cdot k$		
M1n	0,2758	0,463943	13,45	M
M2n	0,64	0,273237	7,92	M
M3n	0,427	0,601823	17,45	M

Finalmente realizada la medición en campo ya con las distancias establecidas se obtiene como resultado el siguiente valor de resistencia de la malla existente.

Tabla 4. 5. Valor de resistencia de la malla existente.

VALORES FINALES DE RESISTENCIA:			
R1	2,71	R_TOTAL=	3,13
R2	1,21		
R3	5,46		

b. Método de intersección de curvas.

Para calcular la resistencia del sistema de puesta a tierra actual de la Estación Cotopaxi, se toma los valores para C; 28, 30, 26 y 24m y siguiendo el método de la intersección de curvas se toman las medidas consignadas en la Tabla 4. 6 con Xi como 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100% de cada valor de C.

Tabla 4. 6. Cálculo de las resistencias en función de las Xi como porcentajes de C.

Porcentaje %	Distancia X en % de C				Electrodo de Tensión a distancia $P_i=0,618(C+X)-X$				Resistencias a las diferentes distancias Xi			
	X _{IA}	X _{IB}	X _{IC}	X _{ID}	P _{IA} [m]	P _{IB} [m]	P _{IC} [m]	P _{ID} [m]	R _A	R _B	R _C	R _D
10%	2,80	3,00	2,60	2,40	16,23	17,39	15,07	13,92	3,29	4,06	5,86	6,10
20%	5,60	6,00	5,20	4,80	15,16	16,25	14,08	13,00	2,73	3,67	5,11	4,98
30%	8,40	9,00	7,80	7,20	14,10	15,10	13,09	12,08	2,55	3,24	4,50	3,95
40%	11,20	12,00	10,40	9,60	13,03	13,96	12,10	11,16	2,50	2,86	3,89	3,13
50%	14,00	15,00	13,00	12,00	11,96	12,81	11,10	10,25	2,40	2,60	3,39	2,32
60%	16,80	18,00	15,60	14,40	10,89	11,66	10,11	9,33	2,29	2,36	2,94	1,74
70%	19,60	21,00	18,20	16,80	9,82	10,52	9,12	8,41	2,16	2,09	2,51	1,57
80%	22,40	24,00	20,80	19,20	8,75	9,37	8,12	7,50	1,93	1,82	2,08	1,47
90%	25,20	27,00	23,40	21,60	7,68	8,23	7,13	6,58	1,69	1,54	1,65	1,36
100%	28,00	30,00	26,00	24,00	6,61	7,08	6,14	5,66	1,51	1,18	1,33	1,20

La Figura 4. 6 se obtiene graficando los datos obtenidos en los 4 grupos de medida con relación a Xi.

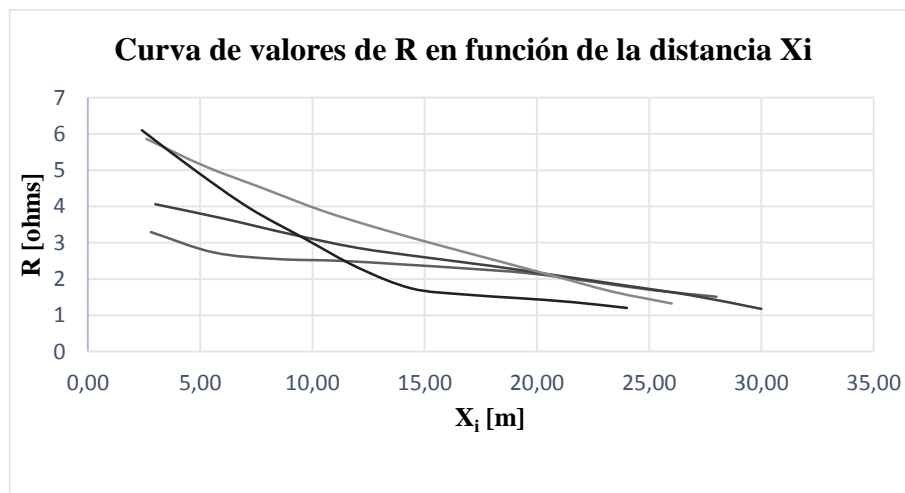


Figura 4. 6. Curvas de Resultantes R vs. Xi de los datos de campo.

En la gráfica de la Figura 4. 6, se registran 5 intersecciones y de acuerdo con el método teórico expuesto, se debería presentar una sola intersección para todas las curvas, que corresponde al valor de la resistencia de puesta a tierra que se está midiendo.

En este caso vamos a tomar un promedio de los cinco valores de resistencias correspondientes a cada intersección así:

Tabla 4. 7. Resistencias que se cruzan en la Gráfica.

Ord.	R [Ω]	Descripción
R1	5,65	Corresponde a la intersección de la curva C-D
R2	3,10	Corresponde a la intersección de la curva B-D
R3	2,45	Corresponde a la intersección de la curva D-A
R4	2,02	Corresponde a la intersección de la curva C-B-A
R5	1,60	Corresponde a la intersección de la curva B-A

El valor promedio es:

$$R_{\text{Puesta_Tierra}} = \frac{5.65 + 3.10 + 2.45 + 2.02 + 1.60}{5} = 3.71 \Omega$$

En razón a que la resistencia de puesta a tierra es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial y controla las tensiones transferidas, puede tomarse el valor calculado (3.71 Ω) como aceptable pero no cumple con el requerimiento de la Estación que indica un valor de 3 Ω como máximo haciendo referencia a lo mencionado en [35] en lo que respecta a la resistencia de malla sumado a lo expresado por el estándar NBSC 579 en referencia al tiempo de instalación.

4.5. DISEÑO DE LA MALLA

Al aplicar la norma IEEE-80-2013 los primeros parámetros a determinar son el área (A) y la resistividad (ρ_a) de del terreno para lo cual considerando que esta norma cuenta con los criterios de diseño adecuados para este escenario debido a que en estas instalaciones se tiene en el interior 4 transformadores para alimentar a diferentes sectores se puede asumir que son subestaciones en baja potencia de distribución, para los cual según la norma detalla 3 tipos de mallas que se puede aplicar como son del tipo Cuadrada, Rectangular y en L.

Y mediante la disposición por parte de la Estación Cotopaxi se designan espacios disponibles para la implementación las mismas se muestra en el Anexo A contando con un área de $40 \cdot 40 = 1600\text{m}^2$, por la norma y por el área designada para este diseño se elige el tipo cuadrado y la resistividad se realiza a continuación.

4.1.1. Medición de la resistividad del terreno

Con la finalidad de usarse el SPT diseñado en un futuro como respaldo a implementarse como apoyo al sistema actual, brindando confiabilidad, seguridad y protección a las instalaciones y al personal de la Estación, la selección de las zonas para medición de la resistividad se las realiza tomando en cuenta lo siguiente: **zona 1:** Esta medición se realiza a 70 m de la malla actualmente instalada con visión a poder acoplarse de manera paralela y ayudar a mejorar sus condiciones de despeje de fallas en caso sobretensiones, **zona 2:** Esta medición de la realiza en un espacio vacío con la finalidad de realizar nuevo diseño considerando la cercanía de las instalaciones y equipos a proteger, **zona 3:** Esta medición de la realiza en un espacio para realizar nuevo diseño considerando la cercanía al ingreso de la acometida Principal.

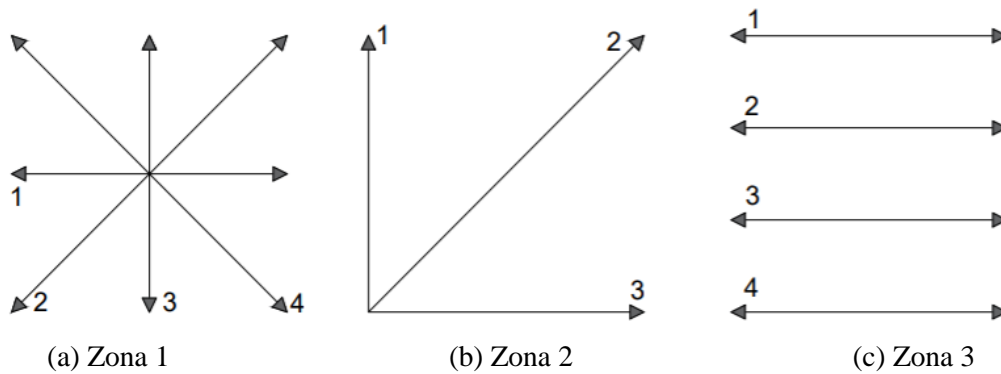


Figura 4. 7. Configuraciones propuestas para las mediciones en cada zona.

La medición de la resistividad del terreno se realiza en las diferentes zonas con diferentes configuraciones a varios perfiles alrededor del área de interés aplicando el método de Wenner con una separación de picas 0.5m, 1m, 2m, 3m, 4m, y 5m con la finalidad de obtener un perfil representativo del suelo seleccionado (1600m^2) y para detectar cambios laterales en la resistividad del suelo, así como para determinar cualquier posible efecto de interferencia en las medidas debido a objetos conductores cercanos.

Los datos de la medición de campo se muestran en el Anexo E, donde se obtienen las resistencias y mediante la ecuación (3. 3) se calcula la resistividad aparente. En las siguientes Tablas se observan las mediciones de las resistencias y resistividad del terreno de las zonas 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 4. 8. Registro de medidas de la zona 1.

Distancias [m]	Dirección 1		Dirección 2		Dirección 3		Dirección 4		Resistividad Promedio [Ω-m]
	R ₁ [Ω]	ρ ₁ [Ω-m]	R ₂ [Ω]	ρ ₂ [Ω-m]	R ₃ [Ω]	ρ ₃ [Ω-m]	R ₄ [Ω]	ρ ₄ [Ω-m]	
0,5	99,47	333,08	117,6	393,79	112,7	377,38	117,6	393,79	374,51
1	73,01	466,64	81,34	519,88	69,58	444,72	85,75	548,07	494,83
2	53	674,10	52,92	667,91	54,39	686,46	52,43	661,73	672,55
3	37,24	703,32	42,63	805,12	41,65	786,61	40,18	758,85	763,47
4	30,38	764,37	33,32	838,34	31,85	801,35	34,79	875,32	819,85
5	25,48	801,04	26,95	847,25	26,95	847,25	27,44	862,66	839,55

Tabla 4. 9. Registro de medidas de la zona 2.

Distancias [m]	Dirección 1		Dirección 2		Dirección 3		Dirección 4		Resistividad Promedio [Ω-m]
	R ₁ [Ω]	ρ ₁ [Ω-m]	R ₂ [Ω]	ρ ₂ [Ω-m]	R ₃ [Ω]	ρ ₃ [Ω-m]	R ₄ [Ω]	ρ ₄ [Ω-m]	
0,5	69,58	232,99	72,52	242,84	74,97	251,04	-	-	242,29
1	63,7	407,13	66,64	425,93	67,62	432,19	-	-	421,75
2	58	729,75	53,41	674,10	60,27	760,68	-	-	721,51
3	46,55	879,15	44,1	832,88	48,02	906,91	-	-	872,98
4	35,77	899,98	37,24	936,97	44,59	1121,89	-	-	986,28
5	25,48	801,04	31,85	1001,30	38,71	1216,96	-	-	1006,43

Tabla 4. 10. Registro de medidas de la zona 3.

Distancias [m]	Dirección 1		Dirección 2		Dirección 3		Dirección 4		Resistividad Promedio [Ω-m]
	R ₁ [Ω]	ρ ₁ [Ω-m]	R ₂ [Ω]	ρ ₂ [Ω-m]	R ₃ [Ω]	ρ ₃ [Ω-m]	R ₄ [Ω]	ρ ₄ [Ω-m]	
0,5	143,2	479,44	129,95	435,14	119,36	399,70	145,5	487,32	450,40
1	78,55	502,03	87,367	558,40	96,138	614,46	99,67	637,01	577,97
2	58,85	742,74	56,644	714,91	59,878	755,73	69,58	878,18	772,89
3	45,28	855,09	45,227	854,16	45,815	865,27	46,6	880,08	863,65
4	36,26	912,31	34,79	875,32	37,779	950,53	39,15	985,05	930,80
5	26,85	844,17	25,333	796,42	28,224	887,30	28,81	905,79	858,42

Como se puede observar en la resistividad promedio de las diferentes configuraciones la variación de la resistividad es grande, siendo así que no se puede considerar terreno homogéneo y por ende se procede a realizar el modelado del terreno.

4.1.2. Modelado del terreno

En esta etapa del trabajo se realiza el modelamiento del terreno para obtener una resistividad aparente usando el método gráfico de Sunde, Método estadístico Box cox y Metodología

matemática descrito en el punto 3.4.2, **Medición de resistividad del terreno**, el procedimiento de cada método se detalla a continuación:

4.1.2.1. Modelo de suelo por el método gráfico de Sunde

A. Modelamiento para el terreno de la zona 1.

- En la Figura 4. 10 se presenta la curva de la resistividad aparente ρ_a vs a de la zona 1.
- De la curva se estiman los valores de ρ_1 y $\rho_2 = 374,51[\Omega\text{-m}]$ y $819,85 [\Omega\text{-m}]$ respectivamente.
- $\rho_2/\rho_1 = 2,18 \approx 2$
- $\rho_a/\rho_1 = 1,6$
- $a/h = 2$ como se muestra en la Figura 4. 9.

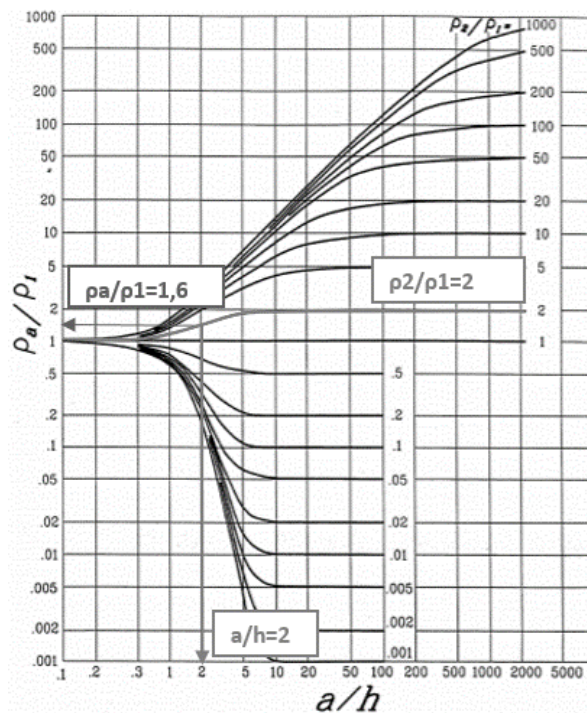


Figura 4. 8. Gráfica de Sunde de la zona 1.

- Se calcula mediante $\rho_a = \left(\frac{\rho_a}{\rho_1}\right) \cdot (\rho_1) = 1,6 \cdot 374,51 = 599,22 [\Omega\text{-m}]$
- Se selecciona el valor de separación $a = 1,49$ m de la curva de la

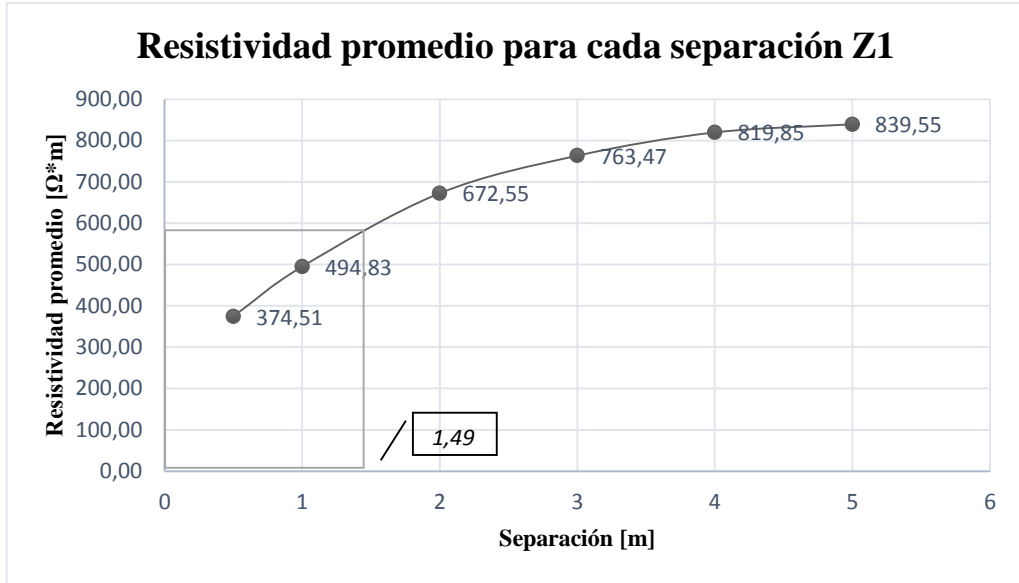


Figura 4. 9. Curva de resistividad aparente de la zona 1.

- Se calcula mediante $H = (a/h)/(a) = 1,49/2 = 0,75$ m

B. Modelamiento para el terreno de la zona 2.

- En la Figura 4. 12 se presenta la curva de la resistividad aparente ρ_a vs a de la zona 2.
- De la curva se estiman los valores de ρ_1 y $\rho_2 = 242,29$ [Ω·m] y $986,28$ [Ω·m] respectivamente.
- $\rho_2/\rho_1 = 4,071 \approx 5$
- $\rho_a/\rho_1 = 2$
- $a/h = 2,35$ como se muestra en la Figura 4. 11.

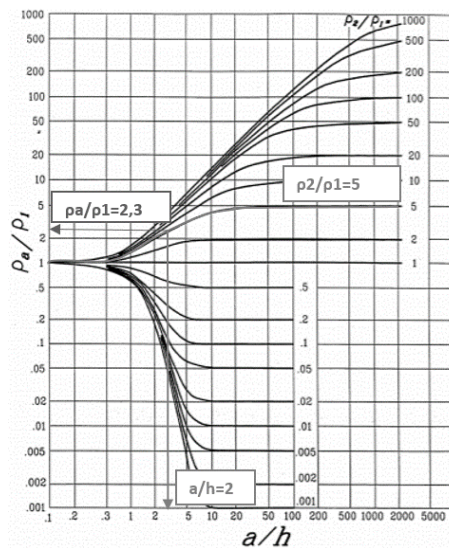


Figura 4. 10. Gráfica de Sunde de la zona 2.

- Se calcula mediante $\rho_a = \left(\frac{\rho_a}{\rho_1}\right) \cdot (\rho_1) = 2 \cdot 242,29 = 484,584 \text{ } [\Omega\text{-m}]$
- Se selecciona el valor de separación $a = 1,30 \text{ m}$ de la curva de la Figura 4. 12.

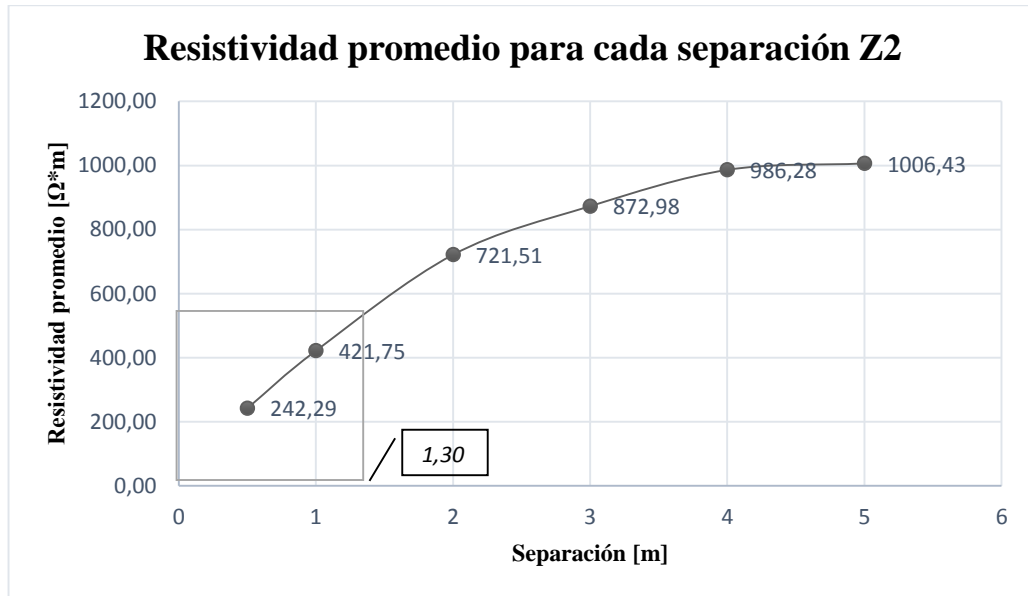


Figura 4. 11. Curva de resistividad aparente de la zona 2.

- Se calcula mediante $H = (a/h)/(a) = 1,30/2,35 = 0,55 \text{ m}$

C. Modelamiento para el terreno de la zona 3.

- En la Figura 4. 14 se presenta la curva de la resistividad aparente ρ_a vs a de la zona 3.
- De la curva se estiman los valores de ρ_1 y $\rho_2 = 450,40 \text{ } [\Omega\text{-m}]$ y $930,80 \text{ } [\Omega\text{-m}]$ respectivamente.
- $\rho_2/\rho_1 = 2,067 \approx 2$
- $\rho_a/\rho_1 = 1,6$
- $a/h = 2$ como se muestra en la Figura 4. 13.

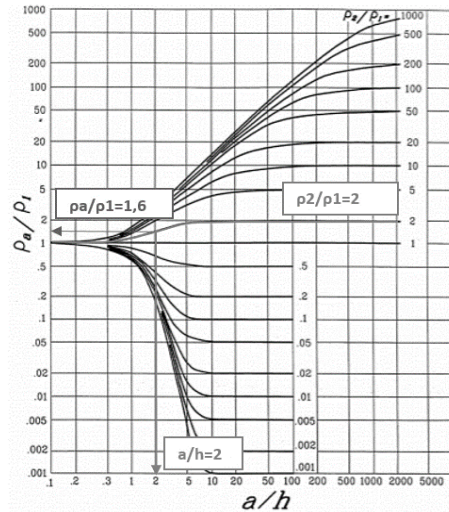


Figura 4. 12. Gráfica de Sunde de la zona 3.

- Se calcula mediante $\rho_a = \left(\frac{\rho_a}{\rho_1}\right) \cdot (\rho_1) = 1,6 \cdot 450,40 = 720,64 \text{ } [\Omega\text{-m}]$
- Se selecciona el valor de separación $a = 1,70 \text{ m}$ de la curva de la Figura 4. 14.

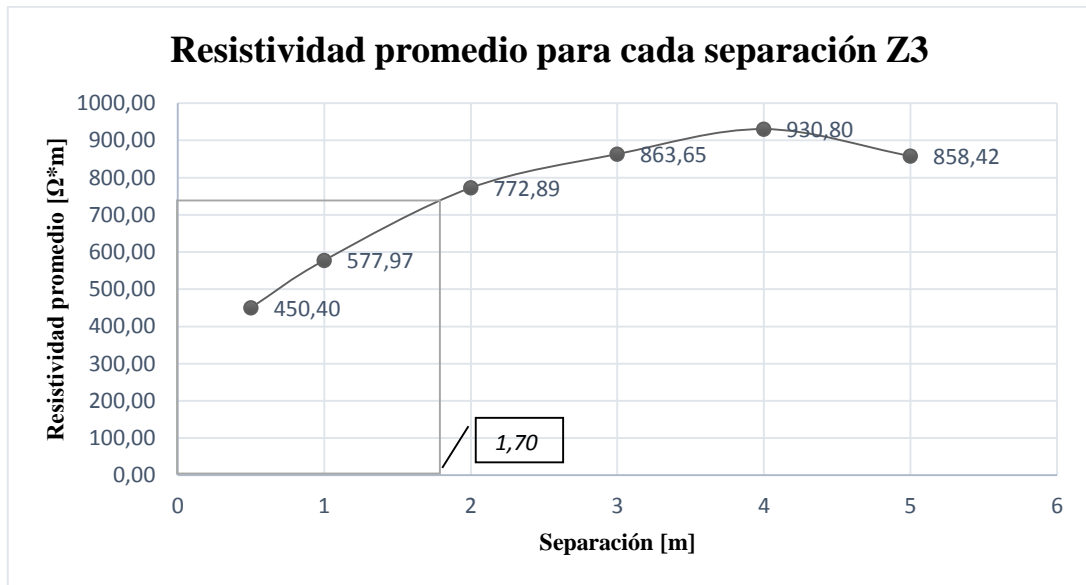


Figura 4. 13. Curva de resistividad aparente de la zona 3.

- Se calcula mediante $H = (a/h)/(a) = 1,70/2 = 0,85 \text{ m}$

4.1.2.2. Modelo de suelo por la metodología Box-Cox

Partiendo de los datos de resistividad obtenidos de las lecturas en la Tabla 4. 11, Tabla 4. 12 y Tabla 4. 13, se procede con los cálculos para cada zona de medición.

Tabla 4. 11. Registro de medidas zona 1 por método Box-Cox.

Separación	RES_A	RES_B	RES_C	RES_D	Promedio	X=LN(Xi)	(Xi-X)^2
0,5	333,08	393,79	377,38	393,79	374,51	5,9256	0,2786
1	466,64	519,88	444,72	548,07	494,8275	6,2042	0,0621
2	674,1	667,91	686,46	661,73	672,55	6,5111	0,0033
3	703,32	805,12	786,61	758,85	763,475	6,6379	0,0340
4	764,37	838,34	801,35	875,32	819,845	6,7091	0,0654
5	801,04	847,25	847,25	862,66	839,55	6,7329	0,0781
Valor promedio=XProm						6,45346098	0,0869167
Desviación estándar (S)							0,294816466
Distribución Normal estándar invertida (70%) [z]						0,524400513	
La resistividad (con probabilidad del 70% de no ser superada)						653,13	

Tabla 4. 12. Registro de medidas zona 2 por método Box-Cox.

Separación	RES_A	RES_B	RES_C	RES_D	Promedio	X=LN(Xi)	(Xi-X)^2
0,5	232,99	242,84	251,04	0	242,29	5,4901	0,9200
1	407,13	425,93	432,19	0	421,75	6,0444	0,1673
2	729,75	674,1	760,68	0	721,51	6,5813	0,0164
3	879,15	832,88	906,91	0	872,98	6,7719	0,1014
4	899,98	936,97	1121,89	0	986,28	6,8939	0,1940
5	801,04	1001,3	1216,96	0	1006,433	6,9142	0,2123
Valor promedio=XProm						6,44931921	0,06685655
Desviación estándar (S)							0,518233093
Distribución Normal estándar invertida (70%) [z]						0,524400513	
La resistividad (con probabilidad del 70% de no ser superada)						658,13	

Tabla 4. 13. Registro de medidas zona 3 por método Box-Cox.

Separación	RES_A	RES_B	RES_C	RES_D	Promedio	X=LN(Xi)	(Xi-X)^2
0,5	479,18	435,14	399,7	487,32	450,335	6,1100	0,1151
1	502,03	558,4	614,46	637,01	577,975	6,3595	0,0088
2	742,74	714,91	755,73	878,18	772,89	6,6501	0,0387
3	855,09	854,16	865,27	880,08	863,65	6,7612	0,0947
4	912,31	875,32	950,53	985,05	930,8025	6,8360	0,1464
5	844,17	796,42	887,3	905,79	858,42	6,7551	0,0910
Valor promedio=XProm						6,57866122	0,0724475
Desviación estándar (S)							0,287136748
Distribución Normal estándar invertida (70%) [z]						0,524400513	
La resistividad (con probabilidad del 70% de no ser superada)						744,36	

4.1.2.3. Modelo de suelo por el método matemático.

La estimación de parámetros de los dos modelos de suelo de capa horizontal se presenta como un problema de optimización, y el ajuste de la curva se realiza entre los valores de resistividad aparente medidos y calculados utilizando la ecuación (4). Se minimiza el error

cuadrático relativo promedio entre las mediciones realizadas en el campo y el valor calculado a partir del modelo usando la ecuación (3. 5).

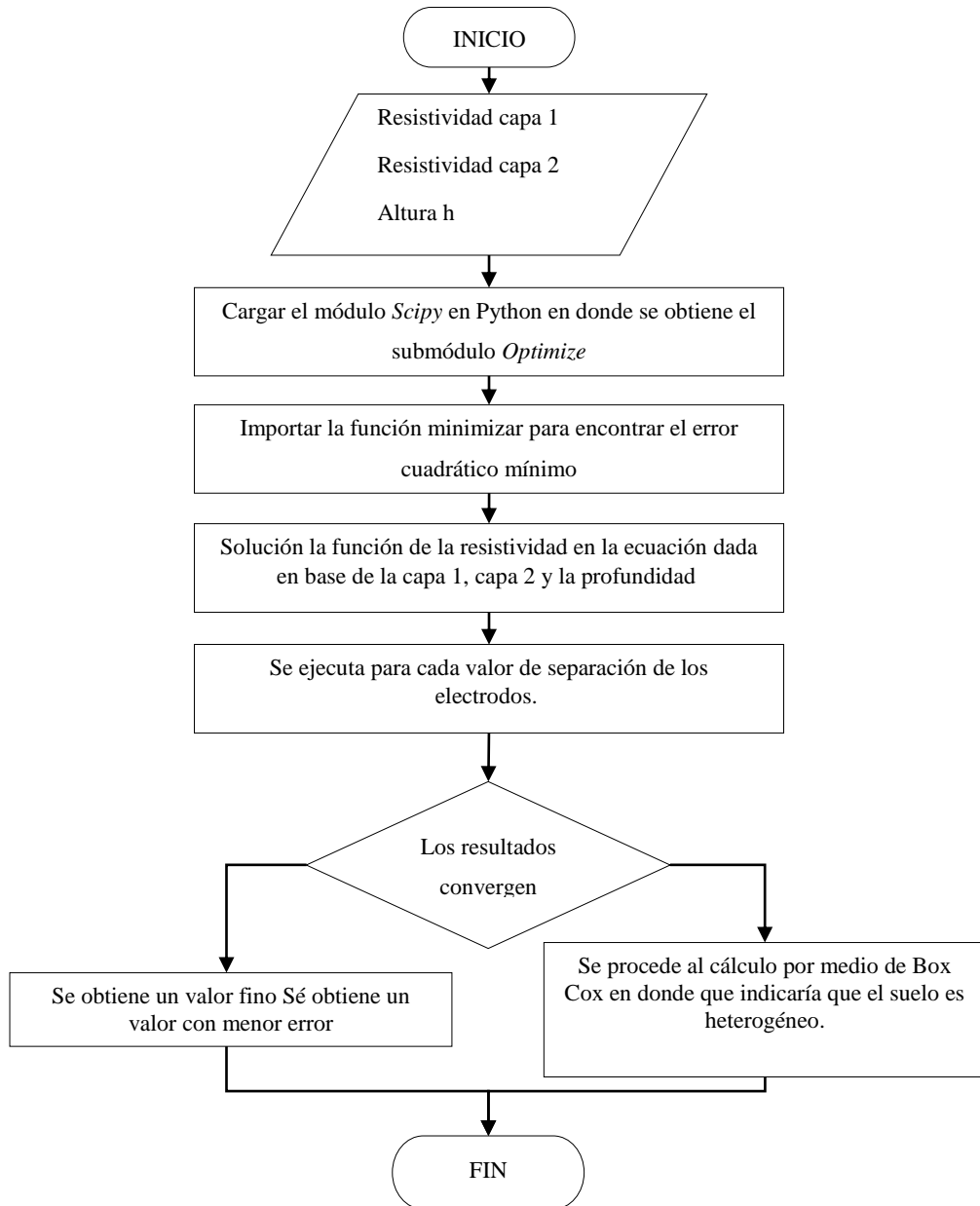


Figura 4. 14. Flujograma para el procesamiento de datos con metodología matemática.

4.1.3. Cálculo de cortocircuito.

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito se referencia la red esquematizada en la Tabla B.1 del Anexo B y los parámetros a usar para el estudio son tomados de la placa de los equipos, en algunos casos se usaron tablas con datos estándares que mostraban los valores requeridos

como se revisó en la teoría donde se toma la impedancia y relación X/R de la librería del software Etap.

A continuación, se realiza el cálculo de la corriente de cortocircuito en la red eléctrica que llega a la Estación Cotopaxi, empleando el método de potencias para lo cual se tiene a consideración el siguiente diagrama unifilar simplificado del sistema de potencia.

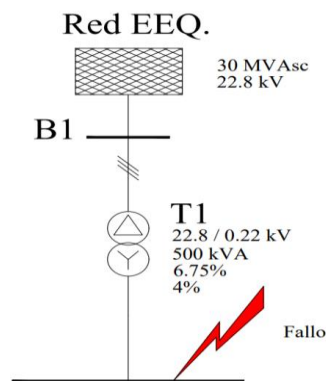


Figura 4. 15. Sección usada para el análisis de Corriente de Cortocircuito.

Para obtener la corriente de falla es necesario convertir las impedancias de todos los equipos; red de alimentación, transformadores, cables de la siguiente manera siguiendo el procedimiento indicado en la teoría.

$$S_{cc} = 30 \text{ MVAs}$$

$$T_1 = \frac{S_{nTr}}{U_{k\%}} = \frac{0,3}{0,04} = 7,5 \text{ MVA}$$

$$Z_{C1} = \frac{0,1612 + 0,54i \Omega/1000 \text{ ft}}{0,3049} = 0,53 + 1,77i = 1,85 \angle 73.3^\circ \Omega/\text{Km} \cdot 0,06 \text{ Km} = 0,111$$

$$S_{C1} = \frac{V_n^2}{Z_{C1}} = \frac{22,8^2}{0,0111} = 4,68 \text{ MVA}$$

$$Z_{C2} = \frac{0,3427 + 0,0995i \Omega/1000 \text{ ft}}{0,3049} = 1,124 + 0,326i = 1,17 \angle 16.17^\circ \Omega/\text{Km} \cdot 0,03 \text{ Km} = 0,0351$$

$$S_{C2} = \frac{V_n^2}{Z_{C2}} = \frac{0,220^2}{0,0351} = 1,38 \text{ MVA}$$

Seguidamente se obtiene un valor equivalente de los MVA y se calcula la corriente de cortocircuito trifásica.

$$S_{EqT} = \left[\frac{1}{30} + \frac{1}{4683,24} + \frac{1}{7,5} \right]^{-1} = 5,99$$

$$I_{CC3\phi} = \frac{S_{EqT}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{5,99}{\sqrt{3} \cdot 0,22} = 15,71 \text{ KA}$$

Entonces la corriente de falla simétrica es obtenida en la Barra 2 y es mediante la siguiente ecuación: $I_f = D_f(3I_0)$, considerando el tiempo de despeje de falla ($t_f = 0,3 \text{ s}$). El factor de decremento está dado por la Tabla 3. 5 de donde se obtiene el siguiente resultado de corriente de falla.

$$D_f = 1.043$$

$$I_f = 1.043 \cdot (15710) = 1638,53 \text{ A}$$

4.1.4. Resultados del nuevo SPT.

Empleado los datos obtenidos anteriormente en la que se evalúa la resistividad del terreno, área y corriente de cortocircuito el procedimiento de diseño de la malla hasta obtener el diseño adecuado del nuevo SPT se muestra en el Anexo G, para obtener estos resultados se realizó una interfaz gráfica en Matlab. En esta sección comparamos si la tensión de malla calculada es menor que la tensión tolerable de toque, el diseño es correcto $E_m < E_{t50}$ los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4. 14. Comparación de tensiones tolerables.

Tensión de malla E_m vs Tensión de toque tolerable E_{t50}	$E_m = 540,31 < E_{t50} = 4263,81 \text{ V}$
Tensión de paso real E_p vs Tensión de paso tolerable E_{p50}	$E_{p\text{real}} = 668,30 < E_{p50} = 1224,56 \text{ V}^2$

² Para el cálculo de este diseño se realizó un interfaz guide que se muestra los resultados en ANEXO G.

Una vez analizado que la tensión de malla y de paso real son menores que el voltaje tolerable de toque y paso $E_m < E_{t50}$, se determina que el diseño propuesto es correcto por lo que a continuación se plantea dos escenarios para su validación de resultados:

- Implementación en Zona 2 con la finalidad de realizar nuevo diseño considerando la cercanía de las instalaciones y equipos a proteger.
- Implementación en Zona 1 con vista a poder acoplarse de manera paralela y ayudar a mejorar sus condiciones de despeje de fallas en caso sobretensiones.

4.6. MODELAMIENTO Y VALIDACIÓN DEL SPT.

Para modelar el diseño de SPT en el Software Etap se consideran los datos obtenidos en los procesos anteriores y se muestra en la Tabla G.1.

4.5.1. Modelamiento en el software mediante la metodología IEEE.

Se emplea la metodología IEEE-80-2013 tanto para el proceso de diseño y el modelamiento en el programa, mediante el software AutoCAD se dibuja una malla cuadrada con las características mostradas en el diseño con sus respectivos conductores, varillas, a escala real esto en formato .xml, para luego ser importadas al procesador de modelamiento Etap.

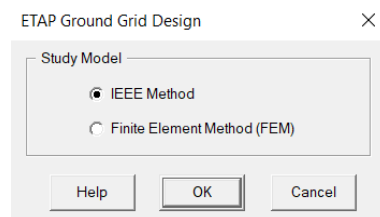


Figura 4.16. Modelos de estudio que dispone ETAP.

Una vez seleccionado el método con el cual se va a analizar el caso de estudio se procede a la opción *import from xml*.

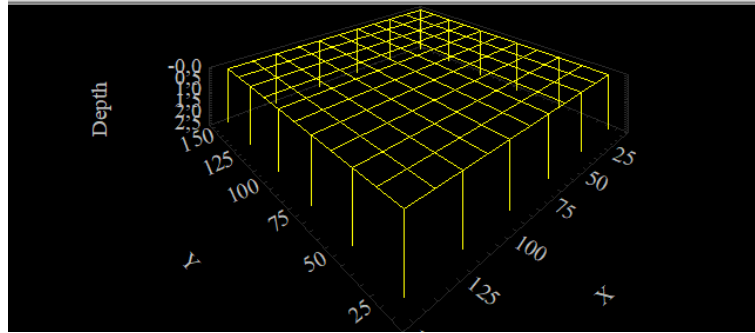


Figura 4.17. Malla Cuadrada importada en el software Etap.

A continuación, se insertan los parámetros de los materiales que se van a utilizar como la configuración de los conductores, electrodos, su longitud, ubicación y diámetro.

Group Conductors

Grid Size

Lx 40 m

Ly 40 m

of Conductors

X Direction 11

Y Direction 11

Conductors

Depth 0.5 m

Size 120 sq mm

Type Copper, commercial hard-drawn

Insulation Bare

Cost 3 \$/m

Help OK Cancel

(a). Configuración de la malla.

Material Constants

Conductivity	Alpha Factor	K Factor	Fusing Temperature	Resistivity @ 20 C	Thermal Capacity
970	0.00381	242	1084	1.78	3.42

Label	Length	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Diameter	Type
1 R0	2.4	15.70	10.00	0.50	15.70	10.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-drawn
2 R1	2.4	15.80	18.00	0.50	15.80	18.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-drawn
3 R2	2.4	15.90	26.00	0.50	15.90	26.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-drawn
4 R3	2.4	15.80	34.00	0.50	15.80	34.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-drawn
5 R4	2.4	15.70	42.00	0.50	15.70	42.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-drawn
6 R5	2.4	15.80	50.00	0.50	15.80	50.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-drawn

(b). Configuración del Conductor

Figura 4.18. Interfaz para inserción de parámetros de materiales.

Seguidamente se calcula la resistividad, esta se obtiene mediante el editor de suelo donde se ingresan los datos obtenidos en campo expuestas en la Tabla 4. 19 y el programa arrojará los datos y la gráfica mostrada en la Tabla 4. 20. Este parámetro es importante debido a que influye de manera directa para diseñar el SPT.

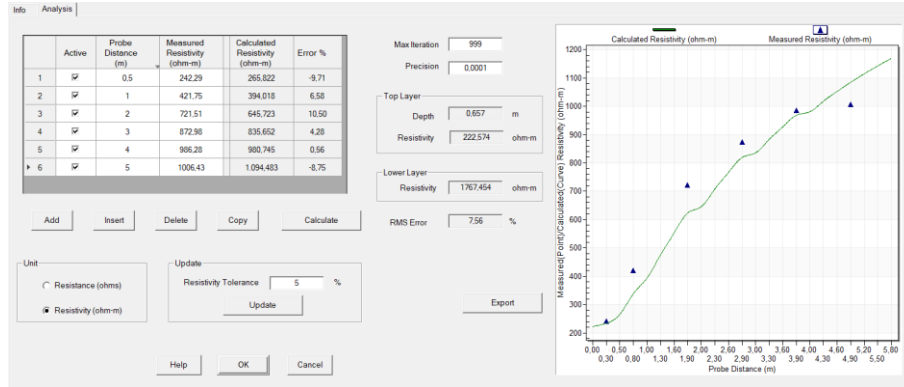


Figura 4.19. Gráfica de la resistividad del terreno.

Adicionalmente se definen las condiciones del diseño como tiempo de falla, corriente de falla, factor división de corriente y para el cálculo de tensión de toque y paso se considera personas de 50 kg.

Figura 4.20. Ingreso de condiciones del sistema.

Cálculo de las tensiones de toque y paso tolerables del sistema de puesta a tierra modelado por IEEE-Method.

Summary and Alert				
Result Summary				
	Calculated Volts	Tolerable Volts	Location	
			X	Y
Touch	624.1	1217.4	15.6	50.1 m
Step	545.6	4234.3	15.7	50 m
GPR	4470.5	Volts	Rg	2.629 Ohm

Figura 4.21. Tensiones de toque y de paso tolerables

4.5.2. Modelamiento en el software mediante FEM.

Para el modelamiento en el software Etap se lo realiza mediante metodología de Elementos finitos en donde se evalúa la malla cuadrada con las características del diseño anterior de forma paralela al sistema original, con sus respectivos pasos para la modelación de sistemas a estudiar cómo son modelación de la geometría, discretización especificación de las propiedades (conductores y varillas a escala real) esto en formato .xml, para ser importadas al módulo del programa y por último especificaciones de condiciones de borde y cargas a las cuales va estar sometido el sistema.

Para considerar la implementación de una malla paralela al sistema de puesta a tierra original se consideran los siguientes criterios.

Según criterio conforme a lo indicado por la NC IEC 61000-5-2 TR3:2003 hace referencia a las conexiones equipotenciales de tipología híbrida en donde se menciona que se pueden conectar a instalaciones existentes que no requieran el cambio o que se lo desmantelará posteriormente y por principio de equipotencialidad se debe unir las mallas para evitar inducciones eléctricas peligrosas.

En la Figura 4. 8 se selecciona para el caso de estudio que se va a realizar por el método de elementos finitos.

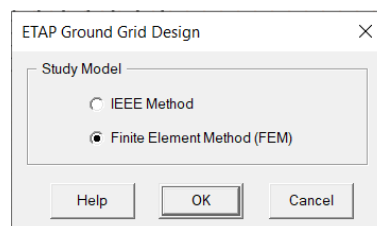
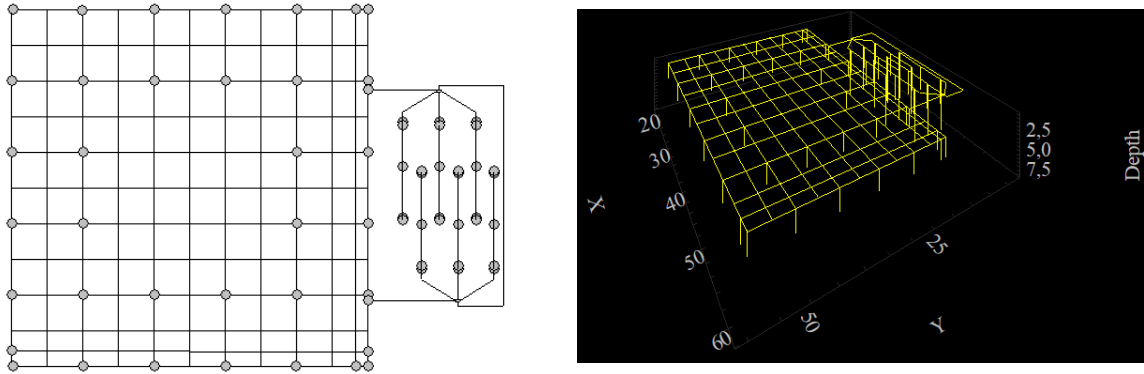


Figura 4. 22. Metodología de Elementos finitos (FEM).

Una vez seleccionado el método con el cual se va a analizar el caso de estudio se procede a la opción *import from xml*. Donde para este análisis como se importa la geometría tanto del modelo original y el nuevo diseño para ser evaluadas como se muestran en la **Figura 4. 23**.



(a). SPT de forma unida original nuevo. diseño (b). Diseño unido importado al software Etap
Figura 4. 23. SPT original y malla cuadrada unidas modelado en el software Etap.

Se colocan las especificaciones de los materiales que se van a utilizar como la configuración de los conductores, electrodos en su longitud, ubicación y diámetro, todas estas características se muestran a continuación.

Material Constants										
Conductivity	Alpha Factor	K Factor	Fusing Temperature			Resistivity @ 20 C	Thermal Capacity			
97.0	0.00381	242	1084			1.78	3.42			
Label	Length	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Diameter	Type	
1	R0	2.4	15.70	10.00	0.50	15.70	10.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-dr...
2	R1	2.4	15.80	18.00	0.50	15.80	18.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-dr...
3	R2	2.4	15.90	26.00	0.50	15.90	26.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-dr...
4	R3	2.4	15.80	34.00	0.50	15.80	34.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-dr...
5	R4	2.4	15.70	42.00	0.50	15.70	42.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-dr...
6	R5	2.4	15.80	50.00	0.50	15.80	50.00	2.90	2.00	Copper, commercial hard-dr...

Figura 4. 24. Configuración de los materiales (conductor y electrodo).

Cálculo de la resistividad, esta parte es importante debido que la resistividad es un parámetro que afecta o beneficio de manera directa al momento del diseño de SPT y se lo realiza en el editor de suelo donde ingresamos los datos de la resistividad obtenidas en campo, ver Tabla 4. 8, y mediante el cálculo del programa se obtienen los datos y la gráfica como se muestran en la Figura 4. 25.

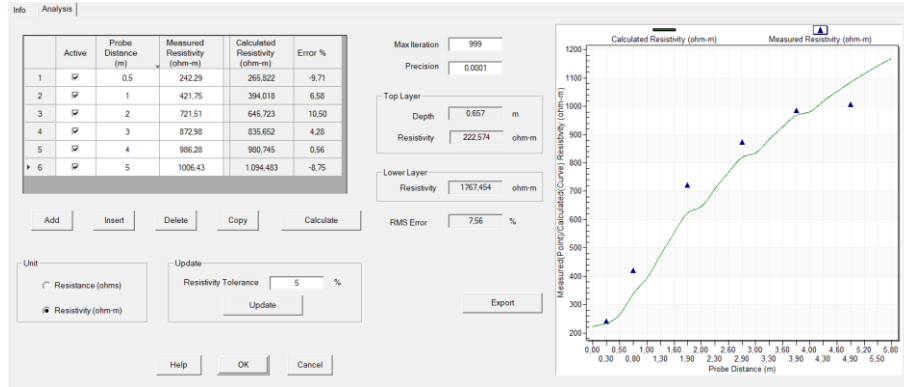


Figura 4. 25. Gráfica de la resistividad del terreno en FEM.

Adicionalmente se definen las condiciones a las cuales va a estar sometido el sistema como tiempo de falla, corriente de falla, factor división de corriente y para el cálculo de tensión de toque y paso se considera personas de 50 kg. El ingreso de estos datos se visualiza a continuación.

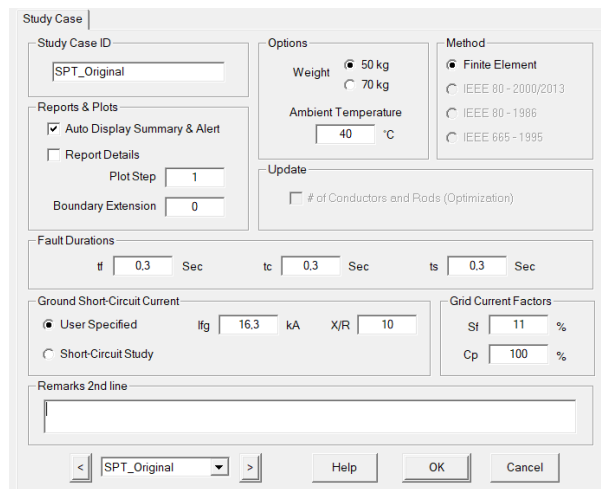


Figura 4. 26. Condiciones para evaluación de la malla original.

Cálculo de la resistencia y tensiones tolerables del sistema de puesta a tierra modelado por método de Elementos Finitos.

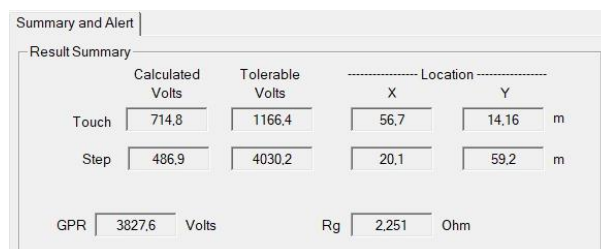


Figura 4. 27. Resultado modelamiento SPT.

4.7. APANTALLAMIENTO

4.7.1. Método electrogeométrico

Anteriormente se mencionó que el apantallamiento es un sistema de protección contra las descargas atmosféricas, el cual combina el uso de puntas captadoras con cables que están distribuidos a lo largo y ancho de una edificación y que finalmente se conectan a un sistema de puesta a tierra que conduce la descarga de forma segura.

El método electrogeométrico es una técnica usada para analizar la acción de las descargas atmosféricas en objetos conectados a tierra, considera la tensión de ruptura dieléctrica de grandes espacios entre electrodos para su aplicación.

4.7.2. Método de la esfera rodante.

El método de la esfera rodante es una derivación del método electrogeométrico, consiste en imaginar una esfera de radio igual a la distancia de impacto r_{sc} rodando sobre los volúmenes de las estructuras a proteger contra los rayos haciendo contacto con las puntas captadoras únicamente.

Antes de realizar este método se deberá calcular el análisis de riesgo, de acuerdo con la norma IEC 62305-2 o la NTC 4552-2, estas normas internacionales han aceptado una relación entre el nivel de riesgo de la edificación y el Radio r_{sc} de la esfera rodante para poder normalizar y simplificar el cálculo de apantallamiento.

Tabla 4. 14. Radio de la esfera rodante en función de los niveles de protección [28].

Nivel de Protección	Radio de la esfera [m]
Nivel I	20
Nivel II	30
Nivel III	45
Nivel IV	60

Después de tener el radio se debe aplicar el método que consiste en hacer rodar una esfera de radio calculada según la Tabla 4. 14 la estructura a proteger.

Se consideran como protegidos aquellos puntos que se encuentran en la zona definida por la superficie de la esfera y la superficie exterior de dicha estructura los puntos en que la toca a las diferentes partes de la estructura y el suelo son susceptibles a ser alcanzadas por las descargas.

El posicionamiento de los terminales de captación debe realizarse de manera tal que la esfera rodante escogida por el nivel de protección nunca toque en ninguna parte de la estructura de este modo la esfera siempre estará soportada por algún elemento del sistema de captación.

4.7.3. Factor de riesgo.

El proyecto está localizado en una latitud de $0^{\circ}37'20.3''$ S y longitud: $78^{\circ}34'46.5''$. El cálculo se realizó mediante el análisis de los factores de riesgo indicados en la IEC-62305 e IEC Risk Assesment Calculator, se tomó en cuenta los siguientes requerimientos:

- Sistema de Protección Externo con el Rayo.
- Sistema de Protección Interno contra las Sobretensiones provisto de Coordinadas según IEC 62.305-4.
- Sistema de Protección contra incendios provisto de Sistemas manuales.
- Posibilidad de medidas de protección adicionales consistentes en sistemas de avisos.
- Sistemas de puntas Franklin (protección pasiva).

Tabla 4. 15. Dimensiones de áreas para evaluación.

Edificio	Largo	Ancho	Alto
Edificio Principal Oficinas	67	24	4.5
Restaurant	15.72	10.49	4.5
Edificio de Generador	20.83	14.16	4.5
Taller de mantenimiento de vehículos	22.36	8.47	4.5
Edificio de administración	42.26	8.03	4.5
Almacenamiento de explosivos	23.27	7.13	4.5
Carpintería/Electricidad	18.64	6.64	4.5
Edificio principal de logística	25.95	5.94	4.5
FST Classroom No. 4	5.33	4.97	4.5

Para poder determinar el nivel de riesgo en una estructura se presenta el siguiente mecanismo simplificado en las siguientes tablas que contienen los datos procesados acorde a los procedimientos de la IEC-62305, mismos que en el Anexo H se detalla los procedimientos completos para evaluar el riesgo de una edificación.

En la

Tabla 4. 16 se detallan los datos de la edificación sección oficinas teniendo en cuenta la ubicación del edificio en este caso la Estación no se encuentra rodeado de edificaciones y la densidad de rayos por km^2 .

Tabla 4. 16. Oficinas, Edificación: características ambientales y de la estructura

Parámetro de entrada	Comentario	símbolo	valor	referencia
Densidad de rayos por año		NG	5,190665	
Dimensiones de la estructura (m)		L,A,H	65,12,3	
Factor de ubicación de la estructura	Estructura aislada	CD	1	TABLA H.1
LPS		PB	0,02	TABLA H.2
Compensación de potencial		PEB	0,01	TABLA A.7
Protección externa		Ks1	0,96	Ec. B.5

Las líneas de energía o potencia y telecomunicaciones que ingresan a la edificación, así como sus sistemas interconectados brindan datos acordes a sus niveles de aislamiento que los conductores están diseñados, así como el tipo de instalación y su distancia desde la fuente anterior. Estos datos se presentan en la **Tabla 4. 17** y **Tabla 4. 18**.

Tabla 4. 17. Edificio de oficinas: Línea eléctrica

Parámetros de entrada	Comentario	Símbolo	Valor	Referencia
Longitud (m)		LL	60	
Factor de instalación	aéreo	CI	0,01	TABLA H.5
Factor de tipo de línea	LV línea	CT	0,2	TABLA H.6
Factor medioambiental	Rural	CE	1	TABLA H.7
Protección de línea	Sin Blindaje	RS	0,8	TABLA H.8
Blindaje, puesta a tierra, aislamiento		CLD	1	TABLA H.9
		CLI	0	
Estructura adyacente		LJ, WJ, HJ	—	
Factor de ubicación de la estructura adyacente		CDJ	—	TABLA H.1
Tensión soportada del sistema interno (kV)		UW	5	
	Parámetros resultantes	KS4	0,2	EC. B.7
		PLD	0,8	TABLA H.8
		PLI	0,1	TABLA H.10

Tabla 4. 18. Edificio de oficinas: Línea de telecomunicaciones.

Parámetros de entrada	Comentario	Símbolo	valor	referencia
Longitud (m)		LL	400	
Factor de instalación	aéreo	CI	0,01	TABLA H.5
Factor de tipo de línea	Línea de telecomunicaciones	CT	1	TABLA H.6
Factor medioambiental	Rural	CE	1	TABLA H.7
Protección de línea		RS		TABLA H.8
Blindaje, puesta a tierra, aislamiento		CLD	1	TABLA H.9
		CLI	0	
Estructura adyacente		LJ, WJ, HJ	—	
Factor de ubicación de la estructura adyacente		CDJ	—	TABLA H.1
Tensión soportada del sistema interno (kV)		UW	1	
	Parámetros resultantes	KS4	1	EC. B.7
		PLD	1	TABLA H.8
		PLI	0,04	TABLA H.10

El número de personas que realizan actividad en un área es diferente para cada zona de la infraestructura a analizar cómo es el caso de la sección de oficinas. Estos valores están indicados en la **Tabla 4. 19** permitirán calcular los valores de pérdida para cada zona y sumarlos para obtener un valor total de pérdida considerando la variación del tiempo en el cual un funcionario para en determinadas zonas. Pero para definir la normativa indica asignar los factores asociados a la zona de la edificación con mayor riesgo, esto interpretando que está bajo una misma edificación la protección.

Tabla 4. 19. Distribución de personas en las zonas - oficina

ZONAS	Número de personas	Tiempo de presencia (h*año)	LT
Z1 - Zona Exterior	1	8000	0,01
Z2 - Oficinas	2	21600	0,01
Z3 - Centro Informático	1	21600	0,01
Z4 - Taller de equipos electrónicos	1	21600	0,01
TOTAL	6		

Tabla 4. 20. Factores válidos edificio de oficinas: z2_oficinas

Parámetros de entrada	Comentario	Símbolo	valor	referencia
Superficie del suelo	Vinil_marmol	rt	1,00E-03	TABLA H.12
Protección para golpes		PTA	0,0001	TABLA H.1
Riesgo de incendio		rf	0,001	TABLA H.14
Protección contra incendio		rp	0,5	TABLA H.15
Protecciones descargas internos		Ks2	0,96	EC. B.6
Pérdida de vidas humanas	Peligro especial	hz	1	TABLA H.16
	D1: Por contacto y tensión de paso	LT	0,01	TABLA H.11
	D2: Por daño físico	LF	1,6667E-05	
	D3: Por falla de los sistemas internos	LO	0,00033333	
Factor para personas en la zona	nz/nt x tz/tt	-	0,3333333	

Cálculo de cantidades relevantes.

Tabla 4. 21 Edificio Oficinas Áreas de colección de estructura y líneas

	Símbolo	Resultado	Ecuación
Estructura	AD	15074,34	
	AM	7,85E+08	No necesario*
Línea de energía	AL/P	2,40E+03	
	AI/P	2,40E+05	Z ₁
	ADJ/P	0	No ad. Estructura
Telecomunicaciones	AL/T	1,60E+04	
	AI/T	1,60E+06	
	ADJ/T	-	

Tabla 4. 22. Número anual esperado de eventos peligrosos.

	Símbolo	Resultado	Ecuación
Estructura	ND	0,078245849	
	NM		No necesario

Línea de energía	NL/P	2,49E-05	
	NI/P	2,49E-03	No relevante
	NDA/P	0	No ad. E.
	NL/T	8,31E-04	
	NI/T	8,31E-02	
	NDA/T	0	No ad. E.

Con los factores determinados se procede a obtener los factores finales de riesgo por medio del software IEC Risk que indica que su aplicación debe ser acompañada por la determinación de los riesgos calculados anteriormente. La interfaz corresponde a los datos obtenidos y son ingresados como se indica en la siguiente figura.

The screenshot shows the IEC Risk assessment software interface with the following sections:

- Structure's Dimensions:** Length of structure (m): 67, Width of structure (m): 24, Height of roof plane (m): 4, Height of highest roof protrusion (m): 5, Equivalent area (m²): 4,245 m².
- Structure's Attributes:** Risk of fire or physical damage: Low, Structure screening effectiveness: Good, Internal wiring type: Unscreened.
- Environmental Influences:** Location relative to surroundings: Isolated structure, Location density (service line density): Rural, Number thunderdays: 51 days/year, Equivalent annual flash density: 5.1 flashes/km².
- Conductive Service Lines:**
 - Power Line:** Type of service to the structure: Buried cable, Type of external cable: Screened, Presence of MV / LV transformer: Transformer.
 - Other Overhead Services:** Number of conductive services: 0, Type of external cable: Unscreened.
 - Other Underground Services:** Number of conductive services: 1, Type of external cable: Screened.
- Protection Measures:** LPS type: No protection, Fire protection level: Manual systems, Surge protection: Full SPD set IEC62305-4.
- Loss Categories:**
 - Category 1 - Loss of Human Life:** Special hazards to life: No special hazards, Life loss due to fire: Commercial, schools..., Life loss due to overvoltages: No safety critical systems.
 - Category 2 - Loss of Essential Services:** Services lost due to fire: Telecommunications, Services lost due to overvoltages: Telecommunications.
 - Category 3 - Loss of Cultural Heritage:** Cultural heritage lost due to fire: No heritage value.
 - Category 4 - Economic Loss:** Special economic hazards: No special hazards, Economic loss due to fire: Hospital, hotel, Economic loss due to overvoltage: Industrial, commercial site, Step - touch potential loss factor: No shock risk, Tolerable risk of economic loss: 1 in 1,000 yrs.
- Calculated Risks:**

	Tolerable Risk (Rt)	Direct Strike Risk (Rd)	Indirect Strike Risk (Ri)	Calculated Risk (R)
Loss of Human Life:	1.00E-05	5.63E-07	9.43E-07	1.51E-06
Loss of Essential Services:	1.00E-03	2.22E-05	1.53E-03	1.59E-03
Loss of Cultural Heritage:	1.00E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Economic Loss:	1.00E-03	2.22E-04	1.53E-02	1.59E-02

Figura 4. 28. Evaluación inicial con valores ingresados acorde a la IEC-62305

En donde el LPS el cual es el nivel de protección contra rayos se varía hasta mitigar el error calculado comparándolo con el riesgo tolerable. En color rojo se presentan los parámetros en los cuales se tiene que trabajar, se obtuvo el siguiente resultado:

Structure's Dimensions:		Conductive Service Lines:		Loss Categories:	
Length of structure (m):	6.7	Power Line:	Type of service to the structure: Bused cable	Category 1 - Loss of Human Life:	Special hazards to life: No special hazards
Width of structure (m):	24	Type of external cable: Screened	Presence of MV / LV transformer: Transformer	Life loss due to fire: Commercial, schools...	Life loss due to overvoltages: No safety critical systems
Height of roof plane (m):	4	Other Overhead Services:	Number of conductive services: 0	Category 2 - Loss of Essential Services:	Services lost due to fire: No service exist
Height of highest roof protrusion (m)*	5	Type of external cable: Unscreened	Type of external cable: Unscreened	Services lost due to overvoltages: Telecommunications	
* Measured from the ground		Other Underground Services:	Number of conductive services: 1	Category 3 - Loss of Cultural Heritage:	Cultural heritage lost due to fire: No heritage value
Equivalent area (m ²):	4.245 m ²	Type of external cable: Screened	Type of external cable: Screened	Category 4 - Economic Loss:	Special economic hazards: No special hazards
Structure's Attributes:		Protection Measures:		Economic loss due to fire: Hospital, hotel	Economic loss due to overvoltage: Industrial, commercial site
Risk of fire or physical damage:	Low	LPS type: Level IV - 84%	Fire protection level: Manual systems	Step - touch potential loss factor: No shock risk	Tolerable risk of economic loss: 1 in 1,000 yrs
Structure screening effectiveness:	Good	Surge protection: Full SPD set IEC62305-4			
Internal wiring type:	Unscreened				
Environmental Influences:					
Location relative to surroundings:	Isolated structure				
Location density (service line density):	Rural				
Number thunderdays:	51 days/year				
Equivalent annual flash density:	5.1 flashes/km ²				
View isokeraunic map:	View Map				
Calculated Risks:					
	Tolerable Risk (Rt)	Direct Strike Risk (Rd)	Indirect Strike Risk (Ri)	Calculated Risk (R)	
Loss of Human Life:	1,00E-05 =>	1,30E-07	+ 7,07E-08	= 2,01E-07	
Loss of Essential Services:	1,00E-03 =>	6,49E-07	+ 9,19E-05	= 9,26E-05	
Loss of Cultural Heritage:	1,00E-03 =>	0,00E+00	+ 0,00E+00	= 0,00E+00	
Economic Loss:	1,00E-03 =>	7,58E-06	+ 9,20E-04	= 9,27E-04	

The IEC lightning risk assessment calculator is intended to assist in the analysis of various criteria to determine the risk of loss due to lightning. It is not possible to cover each special design element that may render a structure more or less susceptible to lightning damage. In special cases, personal and economic factors may be very important and should be considered in addition to the assessment obtained by use of this tool. It is intended that this tool be used in conjunction with the written standard IEC62305-2.

Figura 4. 29. Factor de riesgo corregido.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se detallan los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto el cual se dividen en tres etapas; diagnóstico del SPT actual, diseño de una nueva malla de puesta a tierra y el apantallamiento de la Estación Cotopaxi.

Para realizar el procesamiento de los datos por las diferentes metodologías propuestas hasta obtener los parámetros necesarios como cálculo de la resistencia de la malla original, modelamiento de suelo y análisis de la corriente de cortocircuito del sistema se lo realiza de forma manual de acuerdo al procedimiento que se haya planteado donde se desarrolló una interfaz en GUI de Matlab, la herramienta muestra las variables de entrada y salida de forma manual, para el análisis del sistema eléctrico de la Estación Cotopaxi y validación de los resultados de diseño se simula en el software Etap tanto para el método IEEE y elementos finitos. En cuanto al estudio de Apantallamiento se requiere conocer las variantes frente a los criterios de selección del factor de riesgo el cual brindó los resultados a mostrar en los siguientes ítems.

5.1. DIAGNÓSTICO.

Para evaluar el estado actual del sistema de puesta a tierra se ha considerado metodologías adecuadas referente a los sistemas de grandes electrodos como son el método de la pendiente y método intersección de curvas haciendo uso de un equipo de medición calibrado en el Instituto de Metrología Ecuatoriano, en donde se puede obtener la verdadera resistencia de tierra del sistema de electrodos que se estudió en este caso el sistema de la Estación Cotopaxi:

Tabla 5. 1. Valores obtenidos de la resistencia de puesta a tierra.

Valor de resistencia por método de la pendiente:			
R1	2,71	$R_{\text{Puesta_Tierra}} =$	3,13 Ω
R2	1,21		
R3	5,46		
Valor de resistencia por intersección de curvas:			
R1	5,71	$R_{\text{Puesta_Tierra}} =$	3,71 Ω
R2	3,10		
R3	2,45		
R4	2,02		
R5	1,60		

Finalmente en la evaluación de la malla existente considerando que es un sistema en donde la posición del centro geométrico no es accesible, pero si su barra equipotencial sumado a la distancia del cable proporcionada por el equipo de medición fue escogida en base a [11].

5.2. DISEÑO DE LA MALLA

5.2.1. Modelamiento de suelo.

Mediante la toma de datos en distintos puntos acorde a lo indicado expresamente por la Estación Cotopaxi se presenta la siguiente información en la Tabla 5.2 que proyecta valores de resistividad aparente de cada configuración medido, calculados mediante los tres métodos.

Tabla 5. 2. Valores de la resistividad aparente obtenidos por los diferentes métodos.

Ubicación	Resistividad aparente por el método gráfico de Sunde [Ω -m]	Resistividad aparente por el método estadístico Box cox [Ω -m]	Resistividad aparente por el método Matemático [Ω -m]
Zona 1	599.22	653,13	769.31
Zona 2	484.58	658,13	847.53
Zona 3	720.64	744,36	807.84

Debido a que la resistividad del terreno, expuesto en la Tabla 5. , en donde se realizará el diseño de sistema de puesta tierra tiene una gran importancia y su impacto influye de manera directa en el diseño se trabaja con este parámetro haciendo un proceso de datos de campo mediante los métodos de gráfico de Sunde , estadísticos box cox, matemático en donde se hace una comparación entre los resultados obtenidos llegando a la conclusión que hay un porcentaje alto de diferencia esto se debe a que los diferentes métodos tienen diversas formas probabilísticas de determinar la resistividad. Se escoge el método de Sunde por mayor similitud con las curvas características del método.

Tabla 5. 2. Cálculo del error entre métodos para evaluar la resistividad del terreno.

Cálculo de error [%]				
Ubicación	$\%error = \frac{ Va - VExact }{VExact}$	P_Sun	P_Box	P_Mat
Zona 1		11,08%	3,08%	14,16%
Zona 2		26,96%	0,80%	27,75%
Zona 3		4,88%	1,75%	6,63%

Tomando como valor exacto el promedio de cada zona y asumiendo el valor de la resistividad calculada por cada método como valor aproximado se calcula el margen de error

entre esta y cada una de los resultados obtenidos por los métodos para cada zona deduciendo así que los valores que menor error presentan son las resistividades calculadas por el método de Box Cox. Esto se debe que el análisis por este método es netamente estadístico aplicando las metodologías de varianza, logaritmos y promedios, acercándose cada vez más al valor ideal mientras que el análisis gráfico de Sunde es necesariamente de interpretación gráfica es aquí donde pueden existir errores o diferente criterio de quien interprete estos datos.

5.2.2. Resultados del diseño de la malla

a. Método de la IEEE

Tabla 5. 3. Resistencia de la malla y tensiones de toque y paso tolerables.

Parámetro	IEEE-80 Matlab Guide tensión calculada	IEEE-80 Matlab Guide tensión tolerable	IEEE Method Software Etap tension calculada	IEEE Method Software Etap tension tolerable
Tensión de toque	548,198 V	1219,79 V	624,1 V	1217.4 V
Tensión de paso	627,709 V	4244,73 V	545,6 V	4234,3 V
Resistencia de SPT	2,83 Ω		2,629 Ω	

En función de los resultados mostrados anteriormente se puede concluir que los resultados obtenidos son los deseados por la Estación, manual de sistemas Delta V de un valor máximo de 3 Ohm y cumple con el mecanismo de cálculo en cuanto al voltaje de paso y toque establecidos por la IEEE-80.

b. Método de elemento finito

Tabla 5. 4. Evaluación de la malla existente con la proyectada por medio de FEM.

Parámetro	FEM_SPT Paralelo tensión calculada	FEM_SPT Paralelo tensión tolerable
Tensión de toque	643,4 V	1217.4 V
Tensión de paso	438,2 V	4234.3 V
Resistencia de SPT	2,251 Ω	

Por medio de los resultados obtenidos en la Tabla 5. 4 se puede concluir que la unión de las dos mallas permitirá bajar la resistencia a 2,25 ohm, esto es importante considerar para la migración de los sistemas independientes conectados hacia el nuevo sistema en base de un

principio de redundancia no poner en riesgo la seguridad de las personas y equipos de la estación.

Teniendo la información necesaria para el modelamiento se realiza la discretización del dominio, donde se generan los cuadrados de los elementos finitos en el software obteniendo las gráficas tensión de paso Figura 5. 2 y tensión de toque Figura 5. 3.

Para lo siguiente se analiza el gráfico de la Figura 5. 1 en donde se aprecia la diferencia de potencial entre los pies debiera ser mayor cerca de la barra del diseño en donde esta situación descrita para una barra única es similar a aquella definida para todo un sistema de electrodos y el potencial de paso es más alto en el área inmediatamente próxima a los electrodos enterrados en condiciones de suelo uniforme. Esto se aplica a la proyectada como se ve en la parte izquierda del gráfico de la Figura 5. 2 a parte de observar que las tensiones de paso son más altas alrededor del sistema de malla y varían de entre 400 a 450 V comparando con la tensión tolerable de paso 4234.3 V es menor y en caso de algún fallo el operador está protegido.

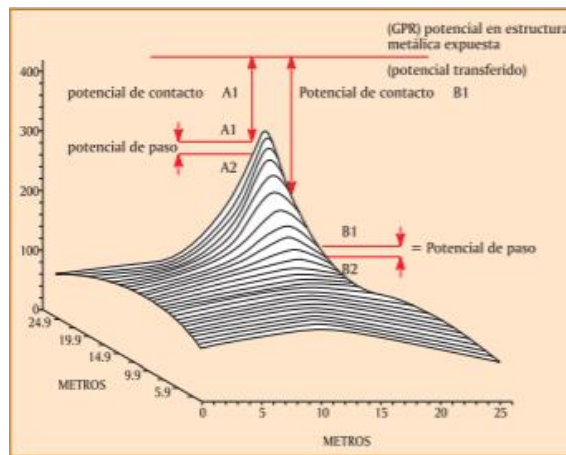


Figura 5. 1 Potenciales de contacto y transferido en torno a una barra de tierra [1].

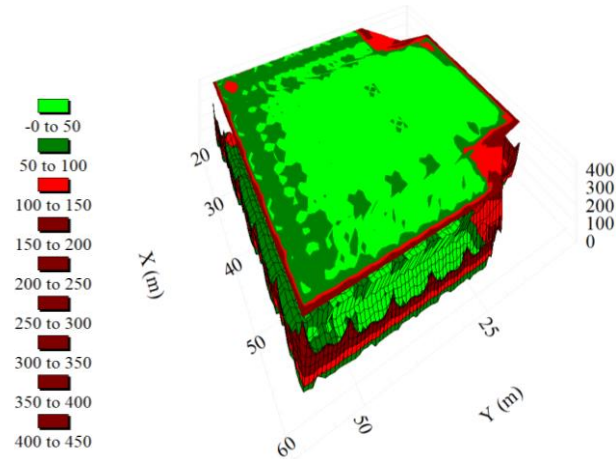


Figura 5. 2 Gráfica en 3D de la tensión de paso mediante la FEM.

Y ante las condiciones que fue expuesta este diseño con la proyectada en la parte izquierda del gráfico de la Figura 5. 3 se puede observar que las tensiones de toque son más altas alrededor del sistema de malla y varían de entre 800 a 900 V comparando con la tensión tolerable de 1217.4 V es menor y de igual manera al unir las dos mallas tanto la existente y proyectada y antes las condiciones de estudio está dentro de los límites establecidos.

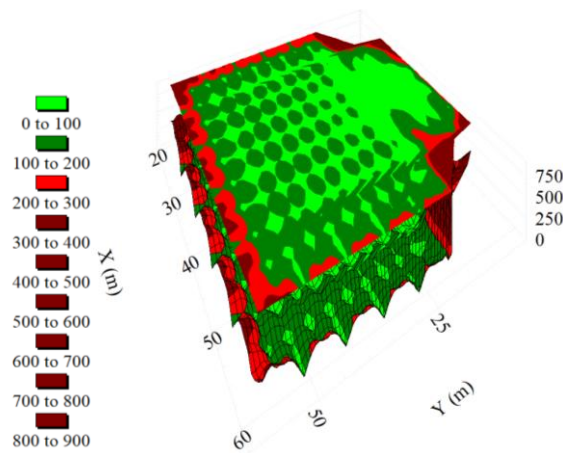


Figura 5. 3. Gráfica en 3D de la tensión de toque.

5.3. APANTALLAMIENTO.

5.3.1 Factor de riesgo.

El factor de riesgo está definido por 4 lineamientos planteados por la IEC-62305-2 los cuales son: pérdida de vidas humanas, pérdida de servicios esenciales; pérdida de patrimonios culturales y pérdidas económicas mismo que se detallan en el Anexo H.

Con el análisis de riesgo de las instalaciones de la estación Cotopaxi, en la **Tabla 5.** se presentan los resultados acordes a la normativa IEC 62305-2.

Tabla 5. 6. Resultados factor de riesgo - Estación Cotopaxi.

Resultados - Riesgo	Riesgo pérdidas humanas		Pérdidas de servicios públicos		Pérdidas de patrimonio		Riesgo pérdidas económicas	
	1E-5		1E-3		1E-3		1E-3	
	Evaluación	Corrección	Evaluación	Corrección	Evaluación	Corrección	Evaluación	Corrección
Máximo riesgos tolerables RT								
Edificio Principal Oficinas - Z12	2,01E-7	2,01E-7	1,55E-3	9,26E-5	0.00	0.00	1,55E-2	9,30E-4
Restaurant - Z16	3,21E-05	6,99E-7	0.00	0.00	0.00	0.00	5,11E-04	5,11E-04
Edificio de Generador - Z3	4,89E-05	1,18E-06	3,08E-03	7,22E-05	0,00E+00	0,00E+00	3,26E-02	7,67E-04
Taller de mantenimiento de vehículos - Z5	1,69E-07	—	0,00E+00	—	0,00E+00	—	6,18E-04	—
Edificio de administración - Z1	4,66E-08	1,21E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,66E-02	8,39E-04
Almacenamiento de explosivos - Z31	3,72E-01	5,45E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,59E-01	1,83E-02
Carpintería/Electricidad - Z8	4,72E-07		0,00E+00		0,00E+00		6,17E-04	
Edificio principal de logística - Z7	1,30E-07		0,00E+00		0,00E+00		2,63E-04	
FST Classroom No. 4 - Z19	1,63E-06	5,68E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,13E-03	1,84E-04

Los valores indicados de color rojo en la **Tabla 5.** se evidencia la necesidad de correcciones acorde a su sistema de protección actual. Esto se realiza fundamentalmente variando si el sistema requiere un determinado nivel o el que cuente con sistemas internos y externos de protección en cada edificación, estos son los factores que se pueden variar para cumplir con la normativa IEC-62305-2.

En función de los valores de la **Tabla 5.** se recomiendan los niveles de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas.

Tabla 5. 7. Niveles de protección recomendados

ZONAS	Protección necesaria	Notas
Edificio Principal Oficinas - Z12	IV	
Restaurant - Z16	II	
Edificio de Generador - Z3	II	
Taller de mantenimiento de vehículos - Z5	no necesario	
Edificio de administración - Z1	II	Cumplir con Full SPD
Almacenamiento de explosivos - Z31	I	TIPO I, Requiere acciones extra
Carpintería/Electricidad - Z8	no necesario	
Edificio principal de logística - Z7	no necesario	
FST Classroom No. 4 - Z19	IV	Requiere Full SPD

5.3.1 Método electrogeométrico.

Luego de evaluar el riesgo según establece la normativa IEC 62305-2, se procedió a aplicar la metodología de las esferas rodantes, para esto mediante AutoCAD se traza las vistas: frontal, trasera, laterales y superior, seguidamente se grafica un círculo de radio obtenido al evaluar los riesgos para cada infraestructura, esta circunferencia deberá ser tangente entre una punta captadora y el suelo y entre puntas, de este modo, todo lo que se encuentre por debajo del perímetro de la circunferencia será un espacio protegido ante descargas atmosféricas.

En la Figura 5. 4 se muestra las esferas que han sido graficadas, estando de color negro y en líneas entrecortadas la porción de esfera que se borrarán, en línea continua y de color magenta se muestra la sección de circunferencia que es tangente entre puntas captadoras y el suelo, el espacio debajo de esta representación será el espacio protegido, se ha usado líneas de color verde para indicar la superficie de la tierra, finalmente se empleó el color celeste para representar estructuras que permitan aumentar la altura de los pararrayos, debido a que comercialmente están disponibles en dimensiones entre 300 mm y 2000mm [28].

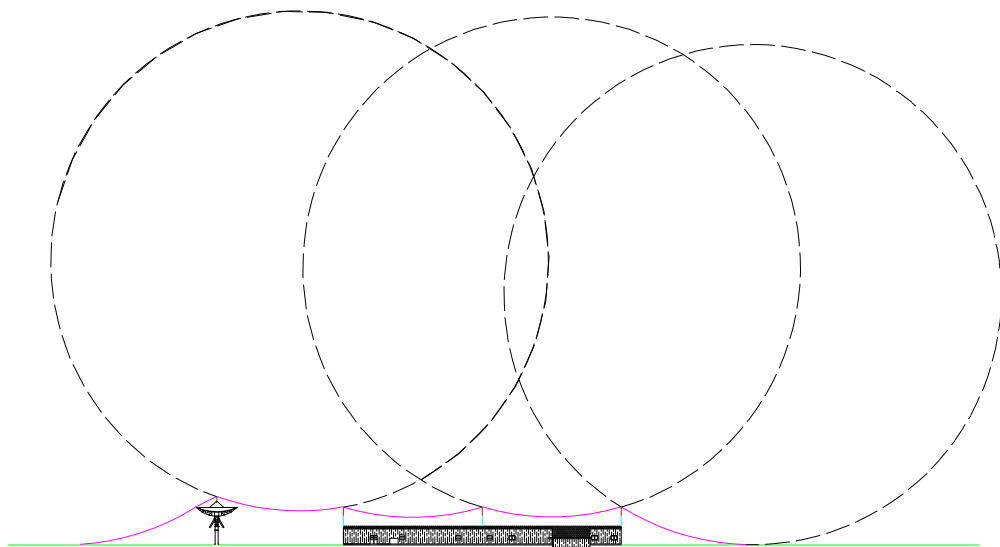


Figura 5. 4. Esferas rodantes aplicadas en el edificio de oficinas - Z12.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se muestran los sistemas de apantallamiento a las edificaciones mencionadas en la Tabla 5. .

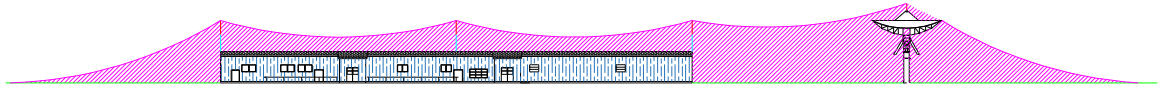


Figura 5. 5. Vista frontal del edificio principal de oficinas - Z12.

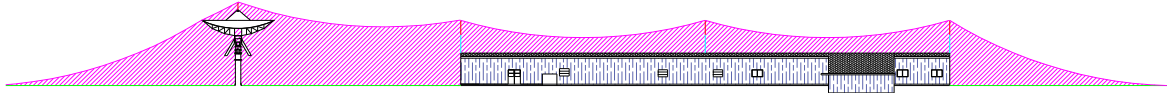


Figura 5. 6. Vista trasera del edificio principal de oficinas - Z12

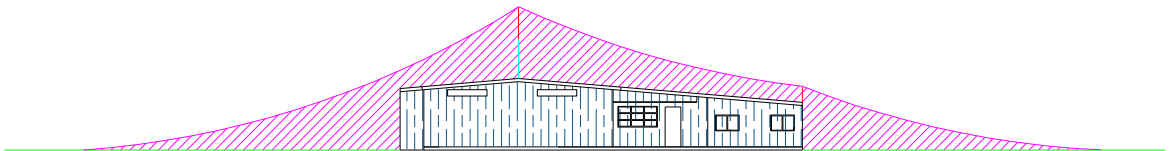


Figura 5. 7. Vista lateral izquierda del edificio principal de oficinas - Z12

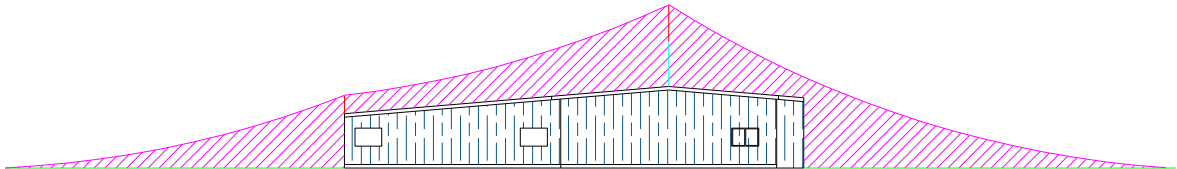


Figura 5. 8. Vista lateral derecha del edificio principal de oficinas - Z12.

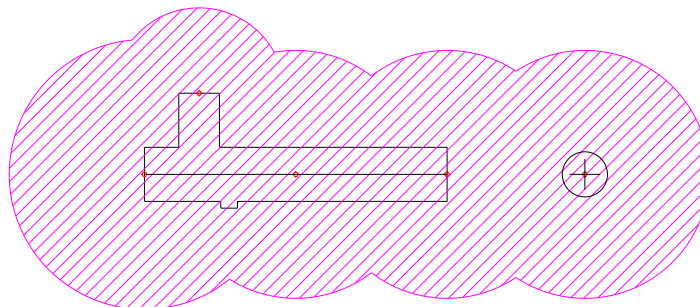


Figura 5. 9. Vista superior del edificio principal de oficinas - Z12.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Se investigó el contenido bibliográfico relacionado a los sistemas de puesta a tierra y apantallamiento determinando el uso de la normativa IEEE-81 para la evaluación, IEEE-80 para el diseño del SPT, IEEE89 e IEC-62305 para el estudio del apantallamiento como las principales en el proyecto realizado, mismas que son complementadas con la IEEE-142, IEC-61000 e IEEE-1100 respectivamente.

Se realizó el diseño del SPT de la Estación Cotopaxi considerando expresamente el pedido de la Estación Cotopaxi en cuanto a la vida útil del sistema en donde se concluye que por mención de los fabricantes de productos de puesta a tierra (ERICO, Inc. y nVent) los cuales se basan en la mayor investigación de corrosión de metales en el mundo, el estándar NBSC 579, determinan una vida útil de los electrodos de 50 años máximo para las varillas de acero recubiertas de cobre al 13 mm de espesor mismos que coinciden con las características del SPT de la Estación en mención. Concluyendo que el SPT al tener 67 años de implementación el tiempo estimado de vida útil de los electrodos está a un 134% de los años recomendados. Esto puede generar una falsa evaluación del diagnóstico al obtener valores bajos de resistencia en la malla, pero al desconocer el efecto del esfuerzo eléctrico frente a una falla que se pudiera dar en la actualidad especialmente en las uniones de los conductores con el electrodo y puntas del mismo.

El diseño de SPT cumple en base a la resistencia máxima de 3Ω acorde a los sistemas Delta V referencia dada por la Estación, para lo cual se realizó el modelamiento del suelo a partir de mediciones eléctricas en la superficie del terreno por tres métodos, estos fueron método gráfico de Sunde, estadístico Box-Cox y método matemático en donde se hace un análisis de los resultados obtenidos calculando un bajo margen de error los cuales se presentan en las resistividades calculadas por el método de Box Cox. Pero para el análisis del diseño se escoge la resistividad de 242,29 (ohm-m) valor que se toma en consideración para el nuevo diseño de SPT debido a la zona en donde se aplicó esta medida aplicando el mejoramiento del sueño a un 50%. Cabe mencionar que este valor no se considera por ser el más adecuado, sino porque pertenece al espacio destinado por la institución para instalar el nuevo diseño de SPT, para concluir el motivo de otras mediciones es analizar la compatibilidad de los resultados y métodos.

Al poner dos mallas de SPT en paralelo se obtuvo una reducción de la resistencia al paso de la corriente en el caso del presente estudio llega a un valor de 2,25 ohm al estar conectadas de

manera equipotencial esto con respaldo de la NC-IEC-61000-5-2 y por el modelamiento en el software Etap a través de métodos finitos, se concluye que cumple los valores permisibles tanto en resistencia, voltaje de toque, paso y respalda los valores de resistividad del terreno escogidos inicialmente, cumpliendo el diseño con el valor de resistencia recomendado tanto de manera individual como de forma equipotencial.

En cuanto al apantallamiento se concluye que en la zona de almacenamiento de explosivos 31, por medio del análisis de los factores de riesgo se llegó a la conclusión de implementar acciones extra como: elaboración de un mapa de riesgo con el fin de distribuir el material explosivo en base a un criterio de circulación de aire y zonas de aislamiento de fuego.

En las zonas: 5, 8 y 7 que actualmente están en servicio de la Estación se obtuvo valores de riesgo menores a los máximos tolerables en donde no se requiere la implantación de un sistema de protección atmosférica completo.

Finalmente, se requiere la cantidad de 18 equipos atrae rayos de tipo franklin de 5 puntas construidas de acero inoxidable para las instalaciones de la Estación Cotopaxi mismas que están disponibles comercialmente en dimensiones entre 300 mm y 2000mm para lo cual se diseñó su ubicación acorde a los resultados de la aplicación de las esferas rodantes indicando el área de cobertura calculada. Los accesorios para el sistema se detallan en el Anexo I entre lo cuales fue necesario la aplicación de acoples en función de las bases de elevación y uniones con bajantes de cable trenzado de cobre electrolítico desnudo 150 mm recomendados por la empresa Blitzplaner.

6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda analizar el sistema eléctrico de potencia evaluando la calidad de energía, debido a que por necesidad de la institución quieren conocer si las perturbaciones eléctricas se dan en base de armónicos y afectan a los sistemas electrónicos sensibles.

Se recomienda acorde a lo que determina la IEC-62305 el tener especial cuidado en cuanto a las bajantes de descargas atmosféricas o a su vez las estructuras metálicas en donde se hace referencia a los lugares con almacenamiento de explosivos. En donde se recomienda una ventilación natural del ambiente en lo posible tener aislado el recorrido de los sistemas de descarga a tierra. Esto se recomienda aplicar en los edificios N°: **10, 11 y 31** de la Estación Cotopaxi mismos que contienen material volátil en estado líquido y sólido.

Se recomienda a la Estación Cotopaxi el considerar el efecto de corrosión en relación al tiempo en los elementos del SPT que no son accesibles o se encuentran enterrados ya que no son similares a los que son accesibles a su vez implementar un plan de medición anual hasta cuando la institución decida implementar un nuevo sistema de puesta a tierra, esto con el fin de que puedan evidenciar cambios considerables en la resistencia de la malla existente.

Finalmente es recomendable el uso de distinta normativa en escenarios de similitud infraestructura debido a que cada caso real se lo debe tratar acorde a las condiciones técnicas, públicas y económicas a la cual están regidos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Tasipanta, “Estudio e implementacion de sistemas de proteccion contra descargas atmosfericas y puesta a tierra de proteccion de La compañía "Helerich and Payne del Ring ",” Escuela Politécnica del Ejército., 2002.
- [2] R. A. Chiriboga Guaras, “Proyecto de un sistema de puesta a tierra normalizada para centros de transformación en el sector del nuevo aeropuerto de Quito parroquia de Tababela,” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2008.
- [3] J. Ramírez, *Sistemas de puesta a tierra : disenado con IEEE-80 y evaluado con MEF / Jose Samuel Ramirez Castano, Eduardo Antonio Cano Plata.* 2010.
- [4] H. Peñafiel and D. Vallejo, “MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN TRES DIMENSIONES Y UN MODELO FÍSICO REAL A ESCALA,” UPS, 2020.
- [5] PROCOBRE, “SISTEMAS DE PUESTAA TIERRA,” COLOMBIA, 2010.
- [6] O. N. de N. (NC), “NC IEC 61000 - 5 - 2 TR3:2003,” vol. 1, no. 33.100. Habana, pp. 1–70, 2003.
- [7] M. Romanoff, *Underground Corrosion, National Bureau of Standards Circular 579. US Government Printing Office, Washington, U.S. Gover. Whashingtong,* 1957.
- [8] C. Rempe, “A Technical Report on The Service Life of Ground Rod Electrodes",” Solon, OH, 2003. [Online]. Available: <https://www.eric.com/catalog/literature/LT0540.pdf>.
- [9] J. A. Bustamante Cuenca, “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,” UPS-CUENCA, 2011.
- [10] R. Linares y Miranda and J. L. López Bonilla, “Electromagnetic compatibility,” *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 20, no. 1, pp. 5–7, 2012, doi: 10.4067/S0718-33052012000100001.
- [11] R. Ramón, “MEDICION DE LA RESISTENCIA DE TIERRA DE GRANDES ELECTRODOS,” 2013.

- [12] Comité ejecutivo de la norma ecuatoriana del Ecuador, “Norma Ecuatoriana De Construcción Nec Capítulo 15 Instalaciones Electromecánicas.” Quito, p. 173, 2013, [Online]. Available: <https://www.ecp.ec/wp-content/uploads/2017/09/NECINSTALACIONESELECTROMECHANICAS2013.pdf>.
- [13] Fluke, “Resistencia de puesta a tierra,” 2017.
- [14] A. Granero, “Medidas y vigilancia de las instalaciones de puesta a tierra Publicación,” Schneider, Barcelona, 2000.
- [15] F. M. Sinchi Sinchi, “Diseño y determinación de sistemas de puesta a tierra mediante pruebas de campo con elementos comunes utilizados en la región, incluyendo GEM y electrodo químico,” p. 3, 2017, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14487>.
- [16] IEEE Std 80, *Guide for Safety In AC Substation Grounding*, vol. 2000, no. February. 2000.
- [17] K. Orrego and L. Tabares, “ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA BOX COX PARA MEDIR LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO,” UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2007.
- [18] J. Rodríguez, W. Villa, J. Valencia, and Á. Jaramillo, “Cálculo de los parámetros del modelo del suelo de dos capas para sistemas de puesta a tierra utilizando Python,” vol. 41, no. August, pp. 345–355, 2020.
- [19] R. Aguas, “Metología para el cálculo de las corrientes de cortocircuito,” UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR FACULTAD, 2011.
- [20] ABB, “Subestaciones transformadoras MT / BT : teoría y ejemplos del cálculo de cortocircuitos Subestaciones transformadoras MT / BT : teoría y ejemplos del cálculo de cortocircuitos,” *Cuad. Apl. técnicas n° 2*, p. 179, 2010.
- [21] L. Precious, “Descripción física del rayo. Parámetros,” *Agenda*, p. 12, 2010.
- [22] Söhne and Dehn, *Blitzplaner Manual de Protección contra rayos*. Madrid, 2007.
- [23] P. Salazar, “DISEÑO ÓPTIMO DE APANTALLAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTO VOLTAJE Y EXTRA ALTO VOLTAJE PROYECTO,” Escuela Politécnica Nacional, 2013.

- [24] E. Orbea, “El Estudiante Electromecánico: MAPA ISOCERÁUNICO DEL ECUADOR.” <http://elestudianteelectromecanico.blogspot.com/2015/09/mapa-isoceraunico-del-ecuador.html> (accessed Jul. 23, 2021).
- [25] N. Vallejo, “Diseño del apantallamiento contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión con ayuda computacional,” p. 120, 2011.
- [26] C. Ramírez, *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión*, 2nd ed. Colombia, 2003.
- [27] S. Dard, “IEC - 62305-1 Protección contra el rayo Parte 1: Principios generales.” Madrid, p. 70, 2006.
- [28] IEC, “International Electrotechnical Commission (IEC 62305-2), ”Protection against lightning – Part 2: Risk management.” Varembe, p. 88, 2010, [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62305-2%7Bed2.0%7Den.pdf.
- [29] D. Barragán, “MANUAL DE INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO EN MATLAB PARTE I.” p. 75, 2008.
- [30] C. Casado, “Manual Básico De Matlab.” 2008.
- [31] A. Marzal, *Introducción a la programación con Python 3*. Castelló de la Plana, 2014.
- [32] Escuela de ingeniería Eléctrica, ““Introducción al ETAP,”” pp. 1–9, 2010.
- [33] S. Mendieta, “Manual para el uso de las herramientas básicas del software ETAP,” Universidad de La Salle, 2015.
- [34] IMPROTEK, “Etc 3200.” Miraflores, p. 3, 2000.
- [35] I. García, “Guía de Instalación del Sistema DeltaV.” pp. 1–24, 2016.

8. ANEXOS

Anexo A. Localización del IGM y el SPT actual.



Se puede acceder a la Estación Cotopaxi desde la carretera E35, sentido Latacunga-Quito.

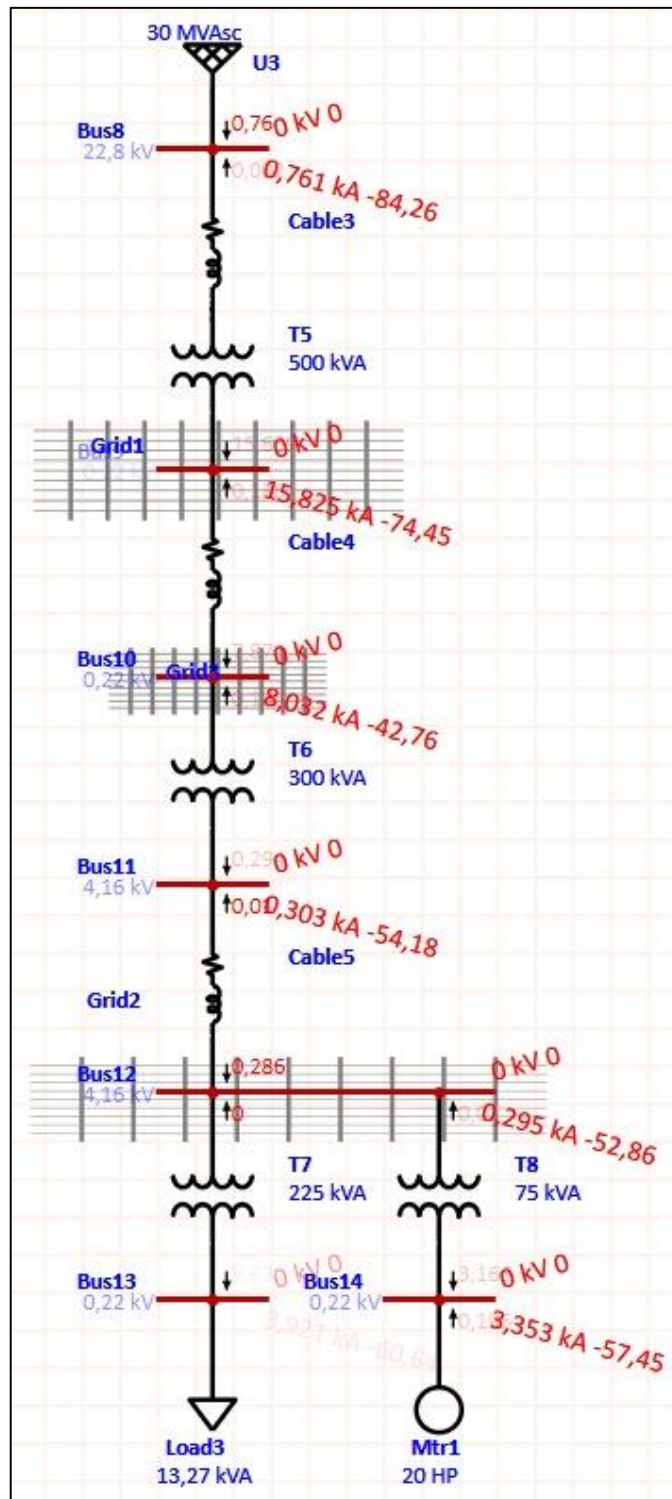


Distribución de la infraestructura de la Estación

Anexo B. Características técnicas del SEP de la Estación Cotopaxi.

Tabla B.1. Datos del sistema pertenecientes al SEP del IGM, se considera una S_{BASE} DE 100MVA.

Datos				Esquema unifilar IGM	
Equivalentes de Thévenin	Scc3φ	30	MVA _{sc}	<p>The diagram shows a power system with buses B1 through B7. Bus B1 is connected to a 30 MVA_{sc}, 22.8 kV Red EEQ. Bus B1 is connected to bus B2 via a line with a fault (red lightning bolt). Bus B2 is connected to bus B3 via a line. Bus B3 is connected to bus B4 via a line with transformer T2 (0.22 / 4.160 kV, 300 kVA, 4.8%). Bus B4 is connected to bus B5 via a line. Bus B5 is connected to bus B6 via a line with transformer T3 (4.160 / 0.22 kV, 225 kVA, 4.8%). Bus B5 is also connected to bus B7 via a line with transformer T4 (4.160 / 0.22 kV, 75 kVA, 2.6%). Bus B6 is connected to 'Control' and bus B7 is connected to 'Antena Satelital'. Two generators (G) are connected to bus B1. Transformer T1 (22.8 / 0.22 kV, 500 kVA, 6.75%, 4%) is connected between bus B1 and the fault location on bus B2.</p>	
	X/R	10%			
	Tensión	22,8	kV		
	f	60	Hz		
Línea 1 MT	XLPE, 25.0 Kv, 60 Hz, 1/C, CU, 1				
	L	60	m		
	R	0.1277	Ω		
	X	0.052j	Ω		
Transformador 2	S_n	500	kVA		
	Z%	6.75%			
	Vk%	4%			
	D/Y [kV]	22.8	0,22		
	I_p	12.66	A		
	I_s	1312.66	A		
Línea 2 BT	XLPE, 1.0 Kv, 60 Hz, 3/C, CU, 2/0				
	L	30	m		
	R	0,3427	Ω		
	X	0,0995j	Ω		
Sección a analizar Fallo					
<p>This diagram shows a close-up of the fault section. It includes the Red EEQ (30 MVA_{sc}, 22.8 kV), bus B1, and transformer T1 (22.8 / 0.22 kV, 500 kVA, 6.75%, 4%). A fault (red lightning bolt) is shown on the line connecting bus B1 to bus B2.</p>					



Sistema de potencia simulado en software Etap - corrientes de falla en cada barra

Anexo C. Código de programación para determinar la resistividad aparente.

```

1 Created on Tue Jun 15 11:37:47 2021
2 @author: Leonardo Abril - Freddy Azogue
3 from numpy import array, sqrt
4 from scipy.optimize import minimize
5 def Resistivity_0(a, ro, h, Np=10):
6     a_ro = array(ro)
7     k = (a_ro[1:]-a_ro[:-1])/(a_ro[1:]+a_ro[:-1])
8     Suma1= 0
9     for q in range(1,Np):
10         kn = k[0]**q
11         cn = (2*q*h/a)**2
12         c1 = kn/sqrt(1+cn)
13         c2 = kn/sqrt(4+cn)
14         Suma1 +=(c1-c2)
15     roc = ro[0]*(1 + 4*Suma1)
16     return roc
17 def Error_1(xd,M_a,M_ro):
18     NN = len(M_a)
19     S_errorc = 0
20     for q in range (NN):
21         ro_m=Resistivity_0(M_a[q],xd[:2],xd[2])
22         ec=(ro_m-M_ro[q])**2
23         S_errorc +=ec
24     Er=S_errorc/NN
25     return Er
26
27 # Programa principal
28 #Configuración 1
29 distancia_electrodos=1
30 ro_C1_C2=[494.51,839.55]
31 h_capa=0.2
32 Np=1000
33 resistividadAparenteCalculada=Resistivity_0(distancia_electrodos,ro_C1_C2,h_capa,Np)
34 print("{0:5.6f}".format(resistividadAparenteCalculada))
35 #Configuración 2
36 distancia_electrodos=1
37 ro_C1_C2=[421.75,1006.43]
38 h_capa=0.2
39 Np=1000
40 resistividadAparenteCalculada=Resistivity_0(distancia_electrodos,ro_C1_C2,h_capa,Np)
41 print("{0:5.6f}".format(resistividadAparenteCalculada))
42 #Configuración 3
43 distancia_electrodos=1
44 ro_C1_C2=[577.97,858.42]
45 h_capa=0.2
46 Np=1000
47 resistividadAparenteCalculada=Resistivity_0(distancia_electrodos,ro_C1_C2,h_capa,Np)
48 print("{0:5.6f}".format(resistividadAparenteCalculada))
49 #LISTA DE DISTANCIA
50 distancias=[0.5,1,2,3,4,5]
51 listres=[374.51,494.83,672.55,763.47,819.85,839.55]

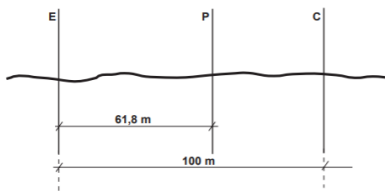
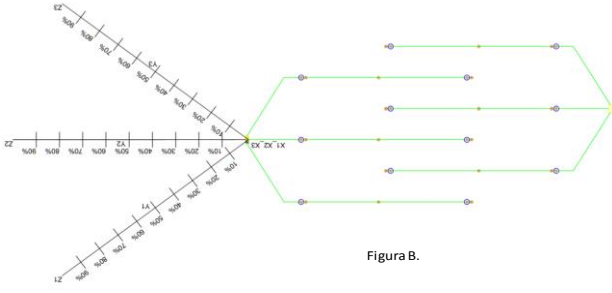
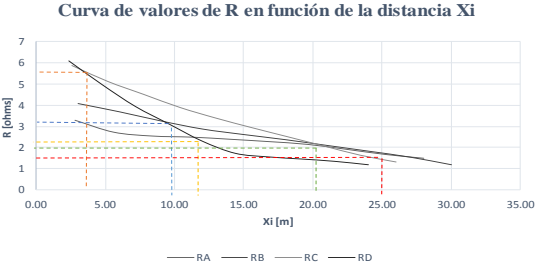
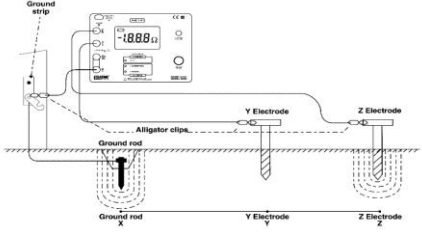
```

```
52 xd=[374.51,839.55,0.1]
53 print("Error: ",Error_1(xd,distancias,listres))
54 resoptimizado=minimize(Error_1,xd,(distancias,listres))
55 print("Respuesta: ",resoptimizado)
56
```


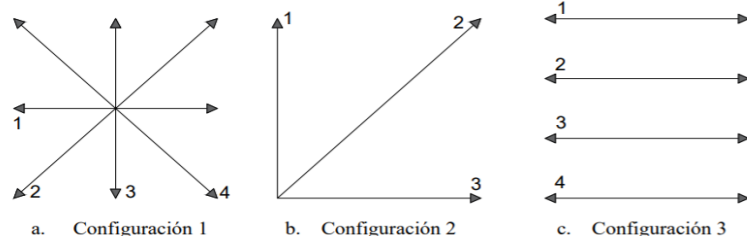
Mientras que a continuación se muestran los resultados del código de programación.

```
1 C1: 769.314376
2 C2: 847.531371
3 C3: 807.844663
4 Error: 39598.7464065
5 Respuesta: status: 2
6 success: False
7 x: array([ 3.17169288e+02,  9.40323596e+02,  5.40953294e-01])
8 nfev: 247
9 message: 'Desired error not necessarily achieved due to precision loss.'
10 njev: 47
11 hess_inv: array([[ 1.19414145e+01,  3.32221599e+00,  2.52363484e-02],
12 [ 3.32221599e+00,  5.84158093e+00,  1.01819090e-02],
13 [ 2.52363484e-02,  1.01819090e-02,  5.98705555e-05]])
14 jac: array([ 5.86509705e-05,  8.34465027e-05, -5.63621521e-03])
15 fun: 18.347964098542864
16 ...Program finished with exit code 0
17 Press ENTER to exit console.
```

Anexo D. Formulario para levantamiento de datos de la resistencia de la malla existente por el método de intersección de curvas.

MEDIDAS DE RESISTENCIAS DE GRANDES ELECTRODOS DE TIERRA. <<MÉTODO DE LA INTERSECCIÓN DE CURVAS>>																																																																																																																																																														
DATOS DEL SITIO																																																																																																																																																														
Instrument Mfg. Medidor de Resistencia	Operator Name	Test Date																																																																																																																																																												
Model ETCR-3200	Leonardo Abril - Freddy Azogue	14/5/2021																																																																																																																																																												
Serial # 32090026	Test Location																																																																																																																																																													
	Malla SPT - Principal																																																																																																																																																													
	Address																																																																																																																																																													
	Estación Cotopaxi del IGM																																																																																																																																																													
Test Conditions																																																																																																																																																														
Soil Condition:	<input checked="" type="checkbox"/> Moist	<input type="checkbox"/> Dry	Temperature 17 °C																																																																																																																																																											
Soil Type:	<input type="checkbox"/> Clay	<input type="checkbox"/> Limestone	<input type="checkbox"/> Sand & Gravel																																																																																																																																																											
	<input type="checkbox"/> Granite	<input type="checkbox"/> Shale	<input type="checkbox"/> Sandstone																																																																																																																																																											
	<input checked="" type="checkbox"/> Loam	<input type="checkbox"/> Slate	<input type="checkbox"/> Other																																																																																																																																																											
Grounding System:	<input type="checkbox"/> Single Rod	Rod Depth	7.3 m																																																																																																																																																											
	<input checked="" type="checkbox"/> Multiple Rod (Grid)	Longest Diagonal Distance	19.23 m																																																																																																																																																											
<p>Según el Dr. Tagg la verdadera resistencia de un sistema de electrodos se obtiene cuando la pica de potencial P esta situada a una distancia del centro eléctrico del sistema, igual al 61,8% de la distancia desde el centro eléctrico hasta la pica de corriente C. Figura A, El diseño que actual de diagnóstico es el de la Figura B.</p>																																																																																																																																																														
 <p>Figura A.</p>		 <p>Figura B.</p>																																																																																																																																																												
REGISTRO DE LOS DATOS DE CAMPO																																																																																																																																																														
XZ1 Electrode Distance:	28	m	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Porcentaje %</th> <th colspan="4">Distancia X como % de C</th> <th colspan="4">Electrodo de Tensión a distancia $Pi=0,618(C+X)-X$</th> <th colspan="4">Resistencias a las diferentes distancias Xi</th> </tr> <tr> <th>XiA</th> <th>XiB</th> <th>XiC</th> <th>XiD</th> <th>PiA[m]</th> <th>PiB[m]</th> <th>PiC[m]</th> <th>PiD[m]</th> <th>RA</th> <th>RB</th> <th>RC</th> <th>RD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>10%</td><td>2.80</td><td>3.00</td><td>2.60</td><td>2.40</td><td>16.23</td><td>17.39</td><td>15.07</td><td>13.92</td><td>3.29</td><td>4.06</td><td>5.86</td><td>6.10</td></tr> <tr><td>20%</td><td>5.60</td><td>6.00</td><td>5.20</td><td>4.80</td><td>15.16</td><td>16.25</td><td>14.08</td><td>13.00</td><td>2.73</td><td>3.67</td><td>5.11</td><td>4.98</td></tr> <tr><td>30%</td><td>8.40</td><td>9.00</td><td>7.80</td><td>7.20</td><td>14.10</td><td>15.10</td><td>13.09</td><td>12.08</td><td>2.55</td><td>3.24</td><td>4.50</td><td>3.95</td></tr> <tr><td>40%</td><td>11.20</td><td>12.00</td><td>10.40</td><td>9.60</td><td>13.03</td><td>13.96</td><td>12.10</td><td>11.16</td><td>2.50</td><td>2.86</td><td>3.89</td><td>3.13</td></tr> <tr><td>50%</td><td>14.00</td><td>15.00</td><td>13.00</td><td>12.00</td><td>11.96</td><td>12.81</td><td>11.10</td><td>10.25</td><td>2.40</td><td>2.60</td><td>3.39</td><td>2.32</td></tr> <tr><td>60%</td><td>16.80</td><td>18.00</td><td>15.60</td><td>14.40</td><td>10.89</td><td>11.66</td><td>10.11</td><td>9.33</td><td>2.29</td><td>2.36</td><td>2.94</td><td>1.74</td></tr> <tr><td>70%</td><td>19.60</td><td>21.00</td><td>18.20</td><td>16.80</td><td>9.82</td><td>10.52</td><td>9.12</td><td>8.41</td><td>2.16</td><td>2.09</td><td>2.51</td><td>1.57</td></tr> <tr><td>80%</td><td>22.40</td><td>24.00</td><td>20.80</td><td>19.20</td><td>8.75</td><td>9.37</td><td>8.12</td><td>7.50</td><td>1.93</td><td>1.82</td><td>2.08</td><td>1.47</td></tr> <tr><td>90%</td><td>25.20</td><td>27.00</td><td>23.40</td><td>21.60</td><td>7.68</td><td>8.23</td><td>7.13</td><td>6.58</td><td>1.69</td><td>1.54</td><td>1.65</td><td>1.36</td></tr> <tr><td>100%</td><td>28.00</td><td>30.00</td><td>26.00</td><td>24.00</td><td>6.61</td><td>7.08</td><td>6.14</td><td>5.66</td><td>1.51</td><td>1.18</td><td>1.33</td><td>1.20</td></tr> </tbody> </table>	Porcentaje %	Distancia X como % de C				Electrodo de Tensión a distancia $Pi=0,618(C+X)-X$				Resistencias a las diferentes distancias Xi				XiA	XiB	XiC	XiD	PiA[m]	PiB[m]	PiC[m]	PiD[m]	RA	RB	RC	RD	10%	2.80	3.00	2.60	2.40	16.23	17.39	15.07	13.92	3.29	4.06	5.86	6.10	20%	5.60	6.00	5.20	4.80	15.16	16.25	14.08	13.00	2.73	3.67	5.11	4.98	30%	8.40	9.00	7.80	7.20	14.10	15.10	13.09	12.08	2.55	3.24	4.50	3.95	40%	11.20	12.00	10.40	9.60	13.03	13.96	12.10	11.16	2.50	2.86	3.89	3.13	50%	14.00	15.00	13.00	12.00	11.96	12.81	11.10	10.25	2.40	2.60	3.39	2.32	60%	16.80	18.00	15.60	14.40	10.89	11.66	10.11	9.33	2.29	2.36	2.94	1.74	70%	19.60	21.00	18.20	16.80	9.82	10.52	9.12	8.41	2.16	2.09	2.51	1.57	80%	22.40	24.00	20.80	19.20	8.75	9.37	8.12	7.50	1.93	1.82	2.08	1.47	90%	25.20	27.00	23.40	21.60	7.68	8.23	7.13	6.58	1.69	1.54	1.65	1.36	100%	28.00	30.00	26.00	24.00	6.61	7.08	6.14	5.66	1.51	1.18	1.33	1.20
Porcentaje %	Distancia X como % de C				Electrodo de Tensión a distancia $Pi=0,618(C+X)-X$				Resistencias a las diferentes distancias Xi																																																																																																																																																					
	XiA	XiB		XiC	XiD	PiA[m]	PiB[m]	PiC[m]	PiD[m]	RA	RB	RC	RD																																																																																																																																																	
10%	2.80	3.00		2.60	2.40	16.23	17.39	15.07	13.92	3.29	4.06	5.86	6.10																																																																																																																																																	
20%	5.60	6.00	5.20	4.80	15.16	16.25	14.08	13.00	2.73	3.67	5.11	4.98																																																																																																																																																		
30%	8.40	9.00	7.80	7.20	14.10	15.10	13.09	12.08	2.55	3.24	4.50	3.95																																																																																																																																																		
40%	11.20	12.00	10.40	9.60	13.03	13.96	12.10	11.16	2.50	2.86	3.89	3.13																																																																																																																																																		
50%	14.00	15.00	13.00	12.00	11.96	12.81	11.10	10.25	2.40	2.60	3.39	2.32																																																																																																																																																		
60%	16.80	18.00	15.60	14.40	10.89	11.66	10.11	9.33	2.29	2.36	2.94	1.74																																																																																																																																																		
70%	19.60	21.00	18.20	16.80	9.82	10.52	9.12	8.41	2.16	2.09	2.51	1.57																																																																																																																																																		
80%	22.40	24.00	20.80	19.20	8.75	9.37	8.12	7.50	1.93	1.82	2.08	1.47																																																																																																																																																		
90%	25.20	27.00	23.40	21.60	7.68	8.23	7.13	6.58	1.69	1.54	1.65	1.36																																																																																																																																																		
100%	28.00	30.00	26.00	24.00	6.61	7.08	6.14	5.66	1.51	1.18	1.33	1.20																																																																																																																																																		
XZ2 Electrode Distance:	30	m																																																																																																																																																												
XZ3 Electrode Distance:	26	m																																																																																																																																																												
XZ4 Electrode Distance:	24	m																																																																																																																																																												
<p>Curva de valores de R en función de la distancia Xi</p> 																																																																																																																																																														
																																																																																																																																																														
Resistencia correspondientes a cada intersección:																																																																																																																																																														
R1	5.65	Corresponde a la intersección de la curva C-D																																																																																																																																																												
R2	3.1	Corresponde a la intersección de la curva B-D																																																																																																																																																												
R3	2.45	Corresponde a la intersección de la curva D-A																																																																																																																																																												
R4	2.05	Corresponde a la intersección de la curva C-B-A																																																																																																																																																												
R5	1.6	Corresponde a la intersección de la curva B-A																																																																																																																																																												
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Effective grounding Electrode Resistance:</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">3.71</td> <td style="width: 10%;">Ω</td> <td style="width: 20%; text-align: right;">Valor del promedio</td> </tr> </table>				Effective grounding Electrode Resistance:	3.71	Ω	Valor del promedio																																																																																																																																																							
Effective grounding Electrode Resistance:	3.71	Ω	Valor del promedio																																																																																																																																																											

Anexo E. Formulario del levantamiento de los datos de medición del terreno.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	REGISTRO MEDIDA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO	REV-001	
DATOS DEL SITIO Fecha: <u>7 de mayo del 2021</u> Subestación: <u>SE_IMG</u> Dirección: <u>Estación Cotopaxi del IGM</u> Proyecto: <u>Diseño y modelamiento de SPT y Apantallamiento para la Estación Cotopaxi</u>			
DATOS COMPLEMENTARIOS Responsable de la medida: <u>Leonardo Abril - Freddy Azogue</u> Equipo de medida utilizado: <u>medidor de resistencia y resistividad doble tenaza, marca ETCR-320</u> Condiciones del terreno: <u>Humedo</u> Observaciones del sitio: <u>Área amplio - Irregular</u>			
PLANO DEL TERRENO			
			
REGISTRO DE LOS DATOS DE CAMPO			
CONFIGURACIÓN 1			
ORD	Dirección	Distancia de separación [m] 0.5 1 2 3 4 5	Profundidad [m]
Medición 1:	E-O	99.47 [Ω] 73.01 [Ω] 53 [Ω] 37.24 [Ω] 30.38 [Ω] 25.48 [Ω]	0.1
Medición 2:	SE-NO	117.6 [Ω] 81.34 [Ω] 52.92 [Ω] 42.63 [Ω] 33.32 [Ω] 26.95 [Ω]	0.1
Medición 3:	S-N	112.7 [Ω] 69.58 [Ω] 54.39 [Ω] 41.65 [Ω] 31.85 [Ω] 26.95 [Ω]	0.1
Medición 4:	SO-NE	117.6 [Ω] 85.75 [Ω] 52.43 [Ω] 40.18 [Ω] 34.79 [Ω] 27.44 [Ω]	0.1
CONFIGURACIÓN 2			
ORD	Dirección	Distancia de separación [m] 0.5 1 2 3 4 5	Profundidad [m]
Medición 1:	E-O	69.58 [Ω] 63.7 [Ω] 58 [Ω] 46.55 [Ω] 35.77 [Ω] 30.38 [Ω]	0.1
Medición 2:	SE-NO	72.52 [Ω] 66.64 [Ω] 53.41 [Ω] 44.1 [Ω] 37.24 [Ω] 31.85 [Ω]	0.1
Medición 3:	S-N	74.97 [Ω] 67.62 [Ω] 60.27 [Ω] 48.02 [Ω] 44.59 [Ω] 38.71 [Ω]	0.1
CONFIGURACIÓN 3			
ORD	Dirección	Distancia de separación [m] 0.5 1 2 3 4 5	Profundidad [m]
Medición 1:	E-O	143.2 [Ω] 78.55 [Ω] 58.8 [Ω] 45.28 [Ω] 36.26 [Ω] 26.85 [Ω]	0.1
Medición 2:	SE-NO	129.9 [Ω] 87.37 [Ω] 56.644 [Ω] 45.23 [Ω] 34.79 [Ω] 25.33 [Ω]	0.1
Medición 3:	S-N	119.4 [Ω] 96.14 [Ω] 59.878 [Ω] 45.82 [Ω] 37.78 [Ω] 28.22 [Ω]	0.1
Medición 4:	SO-NE	145.5 [Ω] 99.67 [Ω] 69.58 [Ω] 46.6 [Ω] 39.15 [Ω] 28.81 [Ω]	0.1

Anexo F. Flujograma para el diseño de SPT expuesto en la IEEE 80.

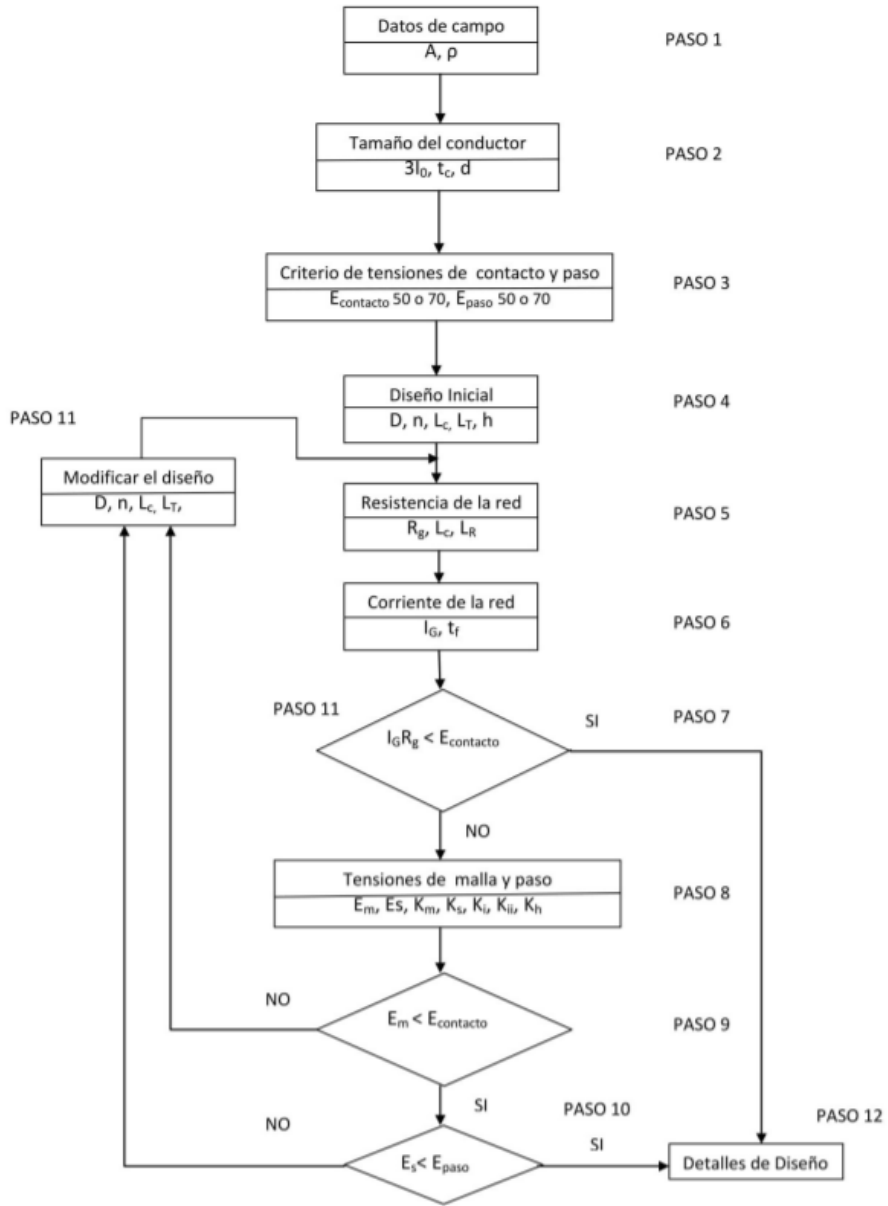


Diagrama de bloques del procedimiento del diseño se SPT [16].

Anexo G. Procedimiento de diseño del Sistema de Puesta a Tierra

Para el diseño de la malla se toma en consideración los siguientes datos:

Tabla G.1. Datos considerados del sistema.

N°	Datos	Símbolo	Valor	Unidad
1	Duración de la Falla	t_f	0.3	s
2	Voltaje en el primario del transformador	V_{AV}	22.8	KV
3	Voltaje en el secundario del transformador	V_{BV}	220	V
4	Resistividad del suelo	ρ_a	484.58	$\Omega.m$
5	Resistividad del material de la capa superficial	ρ_s	2500	$\Omega.m$
6	Espesor de la capa superficial	h_s	0.10	m
7	Profundidad enterrada la malla	h	0.50	m
8	Corriente de falla	I_f	16,38	kA
Dato transformador Trifásico en Cabina				
1	Alimentador	El Obraje 73C		
2	Código Puesto	22442		
3	Voltaje	22.8		kV
4	Potencia	500		kVA

Para determinar el calibre del conductor se emplearon datos de la Tabla G.3 de los materiales conductores, donde se elige cobre comercial trenzado duro y mediante la siguiente ecuación (3.11) se dimensiona el tamaño del conductor.

$$A_{MCM} = 16385,53 \left(\frac{197,4}{\sqrt{\left(\frac{3,42}{0,3 \cdot 0,00381 \cdot 1,78}\right) \cdot \ln\left(\frac{242 + 1084}{242 + 17}\right)}} \right) = 63,38 \text{ MCM}$$

La fórmula simplificada da una aproximación muy buena usando la ecuación (3. 12)

$$A_{MCM} = I_F \cdot K_F \cdot \sqrt{t_c} = 16385,53 \cdot 7,03 \cdot \sqrt{0,30} = 63,361 \text{ MCM}$$

Tabla G.2. Constantes de los materiales conductores.

Descripción	Conductividad del material (%)	α_r factor at 20°C (1/°C)	K_o at 0°C (0°C)	Fusing temperature T_m	ρ_r 20°C ($\mu\Omega\text{cm}$)	TCAP thermal capacity ($\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$)	Kf
Copper, annealed soft-drawn	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42	7
Copper, commercial hard-drawn	97	0,00381	242	1084	1,78	3,42	7,06
Copper-clad Steel wire	40	0,00378	245	1084	4,4	3,85	10,45
Copper-clad Steel wire	30	0,00378	245	1084	5,86	3,85	12,06
Cooper-clad Steel rod	20	0,00378	245	1084	8,62	3,85	14,64
Aluminum, EC grade	61	0,00403	228	657	2,86	2,56	12,12
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0,00353	263	652	3,22	2,6	12,41
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0,00347	268	654	3,28	2,6	12,47
Aluminum-clad Steel wire	20.3	0,0036	258	657	8,48	3,58	17,2
Steel, 1020	10.8	0,00316	605	1510	15,9	3,28	15,95
Stainless-clad Steel rod	9.8	0,0016	605	1400	17,5	4,44	14,72
Zinc-coated Steel rod	8.6	0,0032	293	419	20,1	3,93	28,96
Stainless Steel, 304	2.4	0,0013	749	1400	72	4,03	30,05

Con los resultados obtenidos el conductor se elige por encima del valor calculado y es el N° 2 AWG de cobre con un área de 66,36 MCM, y de acuerdo la norma IEEE Std. 80-2013 dentro de la cláusula 9.4, que se refiere a aspectos básicos de diseño de la malla de tierra, propone en literal c), el incluir en la malla, conductores de tierra calibre N° 4/0 AWG de material de cobre desnudo, con un diámetro de $d = 0,0116\text{mm}$ y un área de 211.6 MCM como se muestra en la Tabla G.2.

Tabla G.3. Dimensiones típicas de los conductores de puesta a tierra [3].

Calibre (AWG o Kcmil)	Área		
	mm ²	Mils circulares	Cantidad
2	33,62	66360	7
1	42,41	83690	19
1/0	53,49	105600	19
2/0	67,43	133100	19
3/0	85,01	167800	19
4/0	107,2	211600	19

Para el cálculo de los siguientes parámetros de las tensiones de toque y paso tolerables se considera un espesor de capa superficial de $h=0.10$ con una resistividad del material de 4500 [$\Omega\text{-m}$] y una tierra con una resistividad de 484.58 [$\Omega\text{-m}$] calculada por el método gráfico de

Sunde de la zona 1, cabe mencionar que con un tratamiento de suelo se baja la resistividad en un 50% el valor para el diseño se establece en 242,29 [Ω -m].

Primero se calcula el factor de reducción de la resistividad de la capa superficial de la siguiente manera.

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right)}{2h_s \cdot 0,09} = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{242,29}{4500}\right)}{2 \cdot 0,10 + 0,09} = 0,706$$

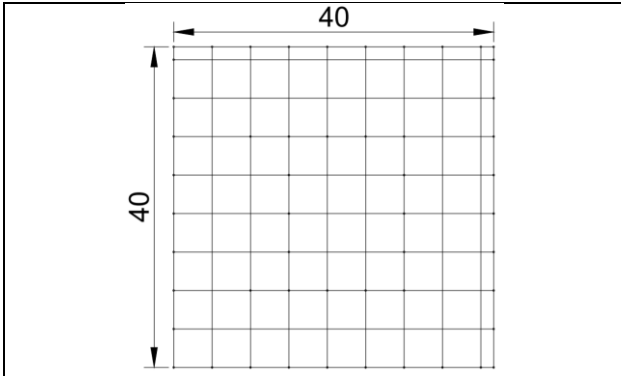
En donde se analiza para personas permitidas que ingresen con peso promedio de 50kg se calcula las tensiones de toque y de paso como corresponde:

$$E_{p50} = (1000 + 6 \cdot 0,706 \cdot 4500) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{0,30}} = 4244,73 \text{ V}$$

$$E_{t50} = (1000 + 1,5 \cdot 0,706 \cdot 4500) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{0,30}} = 1219,79 \text{ V}$$

A continuación, para el diseño inicial de la malla se propone un sistema con las siguientes consideraciones.

Tabla G.4. Diseño de SPT tipo malla cuadrada.

	D	4 [m]
	L_X	40 [m]
	L_Y	40 [m]
	A	1600 [m ²]
	h	0,5 [m]
	N_X	11
	N_Y	11
	L_{T(Lc)}	880 [m]
	L_P	160 [m]
	L_{r(30°2,40)}	60 [m]

Siguientemente con los datos del diseño inicial se determina la resistencia de la malla R_g con reemplazando los valores en la ecuación (3. 15).

$$R_g = 242,29 \left[\frac{1}{952} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 1600}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0,50 \cdot \sqrt{\frac{20}{1600}}} \right) \right] = 2,83 \Omega$$

Con el cálculo de la resistencia de la malla se puede calcular la corriente a disipar por la malla (I_G) pero antes se obtiene el valor del factor división de corriente (D_f) de la siguiente manera.

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{R_g + Z_{eq}} \right|$$

$$Z_{eq} = (0,27 + 0,165i) = 0,31 \angle 31,42^\circ$$

$$S_f = \left| \frac{0,31}{2,83 + 0,31} \right| = 0,098$$

en donde se considera las impedancias equivalentes del número de líneas de transmisión y cables de guarda mostradas en la Tabla G.5.

Tabla G.5. Impedancias equivalentes aproximadas de cables de guarda de líneas de transmisión y neutros de distribución (alimentadores) [3].

Número de líneas de transmisión	Número de neutros de distribución	Zeq (ohm)	
		Rtg = 15, Rdg = 25	Rtg = 100, Rdg = 200
2	12	0,10 + j0,07	0,47 + j0,087
2	16	0,08 + j0,055	0,366 j0,067
4	1	0,45 + j0,16	1,30 + j0,103
4	2	0,34 + j0,15	1,09 + j0,273

Una vez considerado el factor división de corriente se determina la corriente máxima a disipar por la malla I_G mediante la ecuación (3. 16) y la elevación del potencial de tierra GPR mediante la ecuación (3. 17).

Datos

$$I_F = 3I_0 = 16,385 \text{ kA} ; \quad \frac{X}{R} = 10 \rightarrow D_f = 1,043 ; \quad C_p = 1$$

$$I_G = 16385,53 * 1,043 * 0,098 * 1 = 1674,7 \text{ A}$$

$$GPR = 1674,7 \cdot 2,83 = 4749,43 \text{ V}$$

Para poder determinar si el diseño es adecuado se calculan los parámetros tensión de malla y paso real de E_m , $E_{p\text{real}}$, para lo cual se sigue los procedimientos mostrados en la sección 3.5.5. determinación de la tensión máxima de la malla de acuerdo a la selección de la geometría para este análisis tipo cuadrado.

$$n_a = \frac{2 \cdot 880}{160} = 11$$

$n = n_a = 11$ para mallas cuadradas

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot 11)^{2/11}} = 0,58$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0,5}{1}} = 1,22$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{4^2}{16 \cdot 0,5 \cdot 0,011} + \frac{(4 + 2 \cdot 0,5)^2}{8 \cdot 4 \cdot 0,011} + \frac{0,5}{4 \cdot 0,011} \right) + \frac{0,58}{1,22} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \cdot 11 - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0,70$$

$$L_M = 880 + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{2,40}{\sqrt{40^2 + 40^2}} \right) \right] \cdot 72 = 995,327$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot 11 = 2,27$$

$$E_m = \frac{242,29 \cdot 1674,7 \cdot 0,70 \cdot 2,27}{995,327} = \mathbf{548,198 \text{ V}}$$

$$L_S = 0,75 \cdot 880 + 0,85 \cdot 72 = 721,2$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot 0,5} + \frac{1}{4 + 0,5} + \frac{1}{4} (1 - 0,5^{11-2}) \right] = 0,46$$

$$E_p = \frac{242,29 \cdot 1674,7 \cdot 0,46 \cdot 2,27}{721,2} = \mathbf{627,09 \text{ V}}$$

Para el cálculo de todos estos parámetros de diseño se creó una interfaz gráfica en Matlab las variables de entradas y salidas se muestran en la Figura G.2.

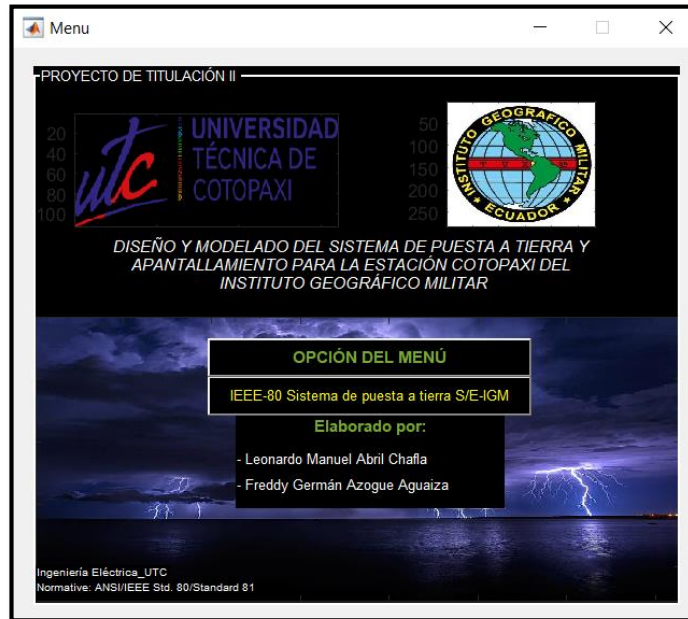


Figura G.1. Menú de la interfaz Guide para cálculo de SPT_IEEE_80

Datos del Terreno		Tipo de unión: Soldada		Criterios de tensiones de toque y paso	
Cálculos Resistividad		Temp Max de la unión:	450 [°C]	K:	-0.897817 factor de reflexión
Resistividad del suelo:	242.29 [ohm-m]	Temp Ambiente(Ta):	40 [°C]	Cs:	0.706365 factor de reducción
Resistividad superficial:	4500 [ohm-m]	Akcmil:	63.386 kcmil	Peso de la persona:	50 kg
Profund. de la capa superficial:	0.10 [m]	Área mínima:	32.1177 mm ²	Ep:	4244.73 [V] Voltaje de paso
Prámetros Eléctricos		Diámetro mínimo:	0.0063948 mm	Et:	1219.79 [V] Voltaje de toque
3X10 Corriente de falla:	16.38 [kA]	Conductor de diseño:	4/0 AWG	Resistencia de la Malla [Rg]	
Cálculos corriente de falla		Área :	107.2 mm ²	Rg:	2.83599 [ohmios]
Conductor de malla		Diámetro :	0.0116829 mm	Corrientes de Malla (IG)	
Tipo:	Cobre Comercial	Geometría de la malla		3I0:	kA (Corriente de falla)
Tiempo de duración de la falla:	0.3	CONFIGURAR MALLA CUADRADA		Ts:	0.3 s (Tiempo de duración de la falla)
Conductividad:	97 respecto al cobre	h:	0.50 [m]	X/R:	10 Relación X/R
Factor ar:	0.00381 @20°C [1/°C]	Área:	1600 [m ²]	Df:	1.04327 Factor de decremento
K0 a 0°C:	242	Lp:	160 [m ²]	Sf:	0.098 Factor de división
Tm:	1084 °C (Temp de fusión)	Conductores verticales:	11 [und]	IG: 1.6747 [kA]	
pr a 20°C:	1.78 [μΩ cm]	Conductores horizontales:	11 [und]	Incremento de potencial	
TCAP:	3.42 J/cm ³ °C C. térmica	Lc:	880 [m]	GPR:	4749.43 [V] Incremento de P en malla
Diseño SI Cumple con la Norma		LR:	72 [m]	Voltaje de malla	
Tensión de malla es menor que el voltaje tolerable de toque (Em<Et) EL DISEÑO ES CORRECTO		Lm:	995.327 [m]	Em:	548.198 [V] Voltaje de malla en la falla
Press to see IEEE80 Normative		Lt:	952 [m]	Voltaje de Paso	
Press to see Proforma de diseño.		Km:	0.70736 [m]	Ep:	627.709 [V]
		Ki:	2.272 [m]	Volver	
		Ks:	0.46846 [m]		

Figura G.2. Interfaz Guide resultados del diseño de puesta a tierra.

Anexo H. Tablas para el cálculo del nivel de riesgo en edificaciones – Apantallamiento, referenciadas acorde a la normativa IEC-62305-2

Tabla H.1. Factor de ubicación de la estructura.

Factor de ubicación de la estructura	
Ubicación relativa	C_d
Estructura rodeada de objetos superiores	0.25
Estructura rodeada de objetos de la misma altura o menor Estructura aislada	0.5
No hay otros objetos en las proximidades	1
Estructura aislada en la cima de una colina o un montículo l	2

Tabla H.2. Valores de probabilidad para cada medida de protección.

Valores de probabilidad P_B dependiendo de las medidas de protección para reducir el daño físico.		
Características de la estructura	Clase de LPS	P_B
Estructura no protegida por LPS	-	1
Estructura protegida por LPS	IV	0.2
	III	0.1
	II	0.05
	I	0.02
Estructura con un sistema de captación a LPS I y una estructura continua de metal u hormigón armado que actúa como un sistema de bajada natural		0.01
Estructura con techo de metal y sistema de captación de aire, posiblemente con componentes naturales, con protección completa de cualquier instalación de techo contra rayos y una estructura continua de metal u hormigón armado que actúa como un sistema de bajante natural		0.001

Tabla H.3. Valores de probabilidad P_{TU} .

Valores de probabilidad P_{TU} que un destello en una línea eléctrica entrante causara choque a los seres vivos debido a voltajes de contacto peligrosos P_{TU}	
Medida de protección	
Sin medidas de protección	1
Noticias alarmantes	10^{-1}
Aislamiento eléctrico	10^{-2}
Restricciones físicas	0

Tabla H.4. Valor de probabilidad PEE.

Valor de probabilidad P_{EE} en función de LPL para los que están diseñados los DPS	
LPL	P_{EE}
Sin SPD	1
III-IV	0.05
II	0.02
I	0.01

Tabla H.5. Factor de instalación de la línea CT.

Factor de instalación de la línea C_I	
Enrutamiento	C_I
Aéreo	1
Enterrado	0.5
cables enterrados que se extienden dentro de una terminación de tierra mallada	0.01

Tabla H.6. Factor de tipo de la línea CT

Factor de tipo de la línea C_T	
Instalación	C_T
Alimentación de BT, telecomunicaciones o línea de datos	1
Alimentación de MT (con transformador de MT/BT)	0.2

Tabla H.7. Factor ambiental de la línea CE.

Factor ambiental de la línea C_F	
Ambiente Rural	1
Suburbano	0.5
urbano	0.1
Urbano con edificios altos superiores a los 20m	0.01

Tabla H.8. Valores de probabilidad PE.

Valores de probabilidad P_P dependiendo de la resistencia R_s del cable apantallado y la tensión de soporte para Rs y PDL							
Tipo de línea	condiciones de soterramiento, blindaje y unión	Voltaje soportado en kV					
		1	1.5	2.5	4	6	
Línea de potencia	Línea aérea o enterrada, sin blindaje o cuyo blindaje no está adherido a la misma barra de unión del equipo	1	1	1	1	1	
Líneas en telecomunicaciones	Blindado cuya pantalla está unida equipotencialmente a los equipos	$5\Omega/\text{km} < R_s \leq 20\Omega/\text{km}$	1	1	0.95	0.9	0.8
		$1\Omega/\text{km} < R_s \leq 5\Omega/\text{km}$	0.9	0.8	0.6	0.3	0.1
		$R_s \leq 1\Omega/\text{km}$	0.6	0.4	0.2	0.04	0.02

Tabla H.9. Valores de factores CLD y CLI.

Valores de factores CLD y CLI dependiendo el apantallamiento, puesta a tierra y condiciones de aislamiento			
Tipo de línea externa	conexión a la entrada	CDL	CLI
Línea aérea sin blindaje	Indefinido	1	1
Línea enterrada sin blindaje	Indefinido	1	1
Línea de alimentación neutra con conexión a tierra múltiple	ninguno	1	0.2
Línea enterrada blindada (energía o TLC)	Pantalla no unida a la misma barra de unión que el equipo	1	0.3
Línea aérea blindada (alimentación o TLC)	Pantalla no unida a la misma barra de unión que el equipo	1	0.1
Enterrada blindada (alimentación o TLC)	Pantalla unida a la misma barra de unión que el equipo apantallado	1	0
Línea aérea blindada (Energía O TLC)	A la misma barra de unión que el equipo	1	0
Cable de protección contra rayos o cableado en conductos de cables de protección contra rayos, conductos metálicos o tubos metálicos	Pantalla unida a la misma barra	0	0
sin línea externa	Sin conexión a líneas externas (sistemas autónomos)	0	0
cualquier tipo	Aislamiento según IEC 62305-4	0	0

Tabla H.10. Valores de probabilidad PLI por tipo de línea y tensión.

Valores de probabilidad PLI dependiendo del tipo de línea y la tensión soportada al impulso U_w del equipo					
Tipo de línea	Voltaje U_w en kV				
	1	1.5	2.5	4	6
Líneas de energía	1	0.6	0.3	0.16	0.1
TLC Líneas	1	0.5	0.2	0.08	0.04

Tabla H.11. Distribución de personas.

Distribución de personas			
Definición de las zonas		Número de personas	Tiempo de presencia
Z1	Zona exterior	1	404
Z2	oficinas	3	1612
Z3	centro informático	1	1612
Z4	taller de equipos electrónicos	1	1612
TOTAL		nt=6	-

Tabla H.12. Tipo de pérdida L1: Valores típicos.

Tipo de pérdida L1: Valores medios típicos de LT, LF Y LO			
Tipo de daño	Valor de pérdida típico		Tipo de estructura
D1 Lesiones	LT	1E-02	Todos los tipos
D2 Daño físico	LF	1E-01	Riesgo de explosión
		1E-01	Hospital, hotel, escuela, edificio cívico
		5E+02	Entretenimiento público, iglesia, museo
		2E-02	Industrial, comercial
		1E-02	otros
D3 Fallas internas del sistema	Lo	1E-01	Riesgo de explosión
		1E-01	Unidad de cuidado intensivos y bloques de operaciones en hospitales
		1E-03	otros

Tabla H.13. Factor de reducción r_t por superficie de piso.

Factor de reducción r_t en función del tipo de superficie de piso o suelo		
Tipo de superficie	Resistencia de contacto $k\Omega$	r_t
Agrícola, concreto	≤ 1	1E-02
Mármol, cerámica	1-10	1E-03
Grava, moqueta, alfombras	10-100	1E-04
Asfalto, linóleo, madera	≥ 100	1E-05

Tabla H.14. Factor de reducción r_p en función de las disposiciones.

Factor de reducción r_p en función de las disposiciones adoptadas para reducir las consecuencias del fuego	
Provisiones	r_p
sin provisiones	1
Una de las siguientes disposiciones: extintores, instalaciones de extinción fijas operadas manualmente; instalaciones de alarma manual, hidrantes; compartimientos de fuego, tutas de escape	0.5
Una de las siguientes disposiciones: extintores, instalaciones de extinción fijas operadas automáticamente, instalaciones de alarma automáticas (solo si los bomberos pueden llegar en menos de 10 min.)	0.2

Tabla H.15. Factor de reducción r_f por riesgo de incendio.

Factor de reducción r_f en función del riesgo de incendio o explosión de la estructura		
Riesgo	Cantidad de riesgo	r_f
Explosión	Zonas de 0 a 20 y explosivo sólido	1
	Zonas de 1 a 21	1E-01
	zonas de 2 a 22	1E-03
Fuego	Elevado	1E-01
	Ordinario	1E-02
	Bajo	1E-03
Explosión o fuego	Ninguno	0E+00

Tabla H.16. Factor H_z aumentando la cantidad relativa de pérdida.

Factor H_z aumentando la cantidad relativa de pérdida en presencia de un peligro especial	
Tipo de peligro especial	H_z
Sin peligro especial	1
Bajo nivel de pánico (por ejemplo, una estructura limitada a dos pisos y el número de personas no mayor de 100)	2
Medio nivel de pánico (por ejemplo, estructuras diseñadas para eventos culturales o deportivos con un número de participantes entre 100 y 1000 personas)	5
Dificultad de evacuación (Estructuras con personas inmobilizadas, hospitales)	5
Alto nivel de pánico (por ejemplo, estructuras diseñadas para eventos culturales o deportivos con varios participantes, más de 1000 personas)	10

Tabla H.17. Valores de pérdida para cada zona.

Tipo de pérdida L2: Valores de pérdida para cada zona		
Tipo de daño	Pérdida típica	Ecuación
D2	$L_B = L_V = r_p \times r_f \times L_F \times n_z/t$	C7
D3	$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O \times n_z/n_t$	C8

Tabla H.18. Valores típicos de LF y LO

Tipo de pérdida L2: Valores medios típicos de LF y LO			
Tipo de daño	Típico valor de pérdida		Tipo de servicio
D2 daño físico	LF	10-1	Gas, agua, suministro de energía
		10-2	líneas de telecomunicaciones TV,
D3 falla de interno sistemas	LO	10-2	Gas, agua, suministro de energía
		10-3	líneas de telecomunicaciones TV,

Tabla H.19. Tipo de pérdida para cada zona.

Tipo de pérdida L3: Valores de pérdida para cada zona		
Tipo de daño	Valor de pérdida típico	Ecuación
D2 daño físico	$L_B = L_V = r_p \times r_f \times L_F \times C_z / C_t$	C9

Tabla H.20. Valor medio típico de LF.

Tipo de pérdida L3: Valor medio típico de LF			
Tipo de daño	Valor de pérdida típico	Tipo de estructura o zona	
D2 daño físico	LF	10-1	Museos, gal leries

Anexo I. Presupuesto referencial.

Cliente: ESTACIÓN COTOPAXI
RUC_CI:
Dirección: El Boliche
Ciudad: Pastocalle

Presupuesto referencial

Número de presupuesto	1
Fecha de emisión	29/7/2021
Fecha de vencimiento	29/8/2021
Total a pagar (USD)	25.925,54

Presupuesto netamente referencial.				
Concepto / Descripción	Cantidad	Unidad	Precio	Importe
MATERIALES				
Conductor AWG # 4/0	960	m.	\$ 8,50	\$ 8.160,00
Conductor AWG # 500 CMC	50	m.	\$ 10,50	\$ 525,00
Varilla copperweld 2,4m, alta camada	36	unid.	\$ 18,00	\$ 648,00
Consolidado material rocoso	1	unid.	\$ 350,00	\$ 350,00
Soldadura exotérmica	40	unid.	\$ 5,50	\$ 220,00
Consolidado mejoramiento resistividad al 50%	36	unid.	\$ 140,00	\$ 5.040,00
Sistema de protección contra rayos punta Franklin promedio	18	unid.	\$ 90,00	\$ 1.620,00
Bases de soporte media promedio 5 m	18	m.	\$ 12,00	\$ 216,00
Dilatador entre estructuras de aluminio	18	unid.	\$ 8,00	\$ 144,00
Mango para sujeción de punta	36	unid.	\$ 6,00	\$ 216,00
Grapa	100	unid.	\$ 0,50	\$ 50,00
soporte de tubería	54	unid.	\$ 3,00	\$ 162,00
conector bimetálico	18	unid.	\$ 18,00	\$ 324,00
tubo de protección	18	unid.	\$ 30,00	\$ 540,00
Protección de uniones	36	unid.	\$ 4,80	\$ 172,80
Cable trenzado de cobre electrolítico desnudo 150 mm	100	m.	\$ 22,00	\$ 2.200,00
Servicio técnico de intslación				
Diagnóstico del SPT actual	1	svcio.	\$ 500,00	\$ 500,00
Cálculo de diseño de malla a implementarse	1	svcio.	\$ 1.500,00	\$ 1.500,00
Estudio de apantallamiento	1	svcio.	\$ 400,00	\$ 400,00
Transporte	1	svcio.	\$ 60,00	\$ 60,00
Gastos administrativos	1	svcio.	\$ 100,00	\$ 100,00

Aviso legal: Los precios son referenciales y pueden variar entre zonas y países.
 Información útil netamente para la Estación Cotopaxi.

Importe neto		23.147,80	23.147,80
IVA 12% de	23.147,80		2.777,74
Importe bruto			25.925,54