



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

“Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera”

Trabajo de investigación previo a la obtención del Título de Magister en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor:

Ing. Orbea García Jefferson Marcelo

Tutor:

Ing. MSc. Salazar Achig Edgar Roberto

LATACUNGA – ECUADOR

2023

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera” presentado por Ing. Orbea García Jefferson Marcelo para optar por el título magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, julio, 03, 2023



.....
Titulo. MsC. Edgar Roberto Salazar Achig
CC.: 0502847619

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: "Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera", ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, julio, 25, 2023

.....
MsC. Vázquez Teneda Franklin Hernán
171043449-7
Presidente del tribunal

.....
PhD. Palacios Juan Pablo
130688632-4
Lector 2

.....
MsC. Quinatoa Caiza Carlos Iván
050328786-4
Lector 3

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a mis padres quienes a lo largo de mi trayectoria estudiantil y profesional han velado por mi bienestar y educación siendo el pilar en todo momento, brindándome toda la paciencia y amor. A todas las personas que influyen en mi vida, en mi Desarrollo y superación les dedico este esmerado trabajo investigativo.

(Jefferson Orbea)

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres y hermanos por su ancla y ejemplo para inculcarme y apoyarme en la búsqueda de mi superación y metas profesionales. A los docentes de esta prestigiosa Universidad que con sus conocimientos y experiencias me guiaron en la culminación de este trabajo investigativo

(Jefferson Orbea)

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, julio, 03, 2023



.....
Ing. Orbea García Jefferson Marcelo
0504098005

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, julio, 03, 2023



.....
Ing. Orbea García Jefferson Marcelo
0504098005

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera” contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, julio, 25, 2023



.....
MsC. Vásquez Teneda Franklin Hernán
171043449-7

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: “Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera”

Autor: Orbea García Jefferson Marcelo

Tutor: Salazar Achig Edgar Roberto

RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata sobre el análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en la planta de flotación minera Agroindustrial El Corazón. La propuesta surge ante la necesidad del departamento eléctrico para identificar las perturbaciones y comprobar el correcto rendimiento del sistema de puesta a tierra (SPT) y la evaluación de la factibilidad y diseño un sistema de protección ante descargas atmosféricas.

Se estudia el SPT con mediciones de la resistividad del suelo, la geometría y la resistencia de las tres mallas. En el software ETAP, se establece un modelo de suelo de 2 capas, se cargan las geometrías de cada malla y se aplica la técnica de elementos finitos para obtener la resistencia, voltaje de toque y de paso de cada malla. La simulación entrega que la malla 1 genera un voltaje de toque de 1823V superando el límite tolerable de 988V según IEEE-80. Se realiza las propuestas de equipotencialización de las mallas y se analiza las gráficas de los gradientes de potencial. Con las adecuaciones se obtiene una equipotencialidad en toda la instalación y obtiene voltaje de paso máximo de 900V y una distribución de potencial uniforme.

Con respecto al diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas, se determinó el nivel de riesgo de NPR=1. Para la protección externa se usa el método electrogeométrico de las esferas rodantes mediante la colocación de puntas captadoras de rayo en diez ubicaciones en la planta, se determina los bajantes y tomas de tierra tipo pata de ganso para drenar corrientes de rayo. De la protección interna se realiza el estudio de los DPS para media tensión en el lado MT y los DPS tipo 1 y 2 combinado, Tipo 2 y Tipo 3 que se instalan en las zonas determinadas de baja tensión.

PALABRAS CLAVE: Sistema de puesta a tierra, métodos de elementos finitos, software ETAP, apantallamiento eléctrico

**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
DIRECCION DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Title: “Analysis of the protection system for grounding and electrical shielding in a mining plant”

Author: Orbea García Jefferson Marcelo

Tutor: Salazar Achig Edgar Roberto

ABSTRACT

The present research work focuses on the analysis of grounding protection and surge protection in the flotation plant of Minera Agroindustrial El Corazón. The objective of this study is to identify disturbances and verify the proper functioning of the grounding system (SPT) and evaluate the feasibility and design of a surge protection system.

The SPT analysis involved measurements of soil resistivity, geometry, and resistance of the three meshes. A 2-layer soil model was established using the ETAP software, and the finite element technique was applied to determine resistance, touch and step voltages. The simulation revealed that Mall 1 generated a touch voltage of 1823 V, exceeding the IEEE-80 tolerable limit of 988 V. Proposals were made to bond the meshes, achieving equipotentiality throughout the installation and obtaining a maximum step voltage of 900V with a uniform potential distribution.

For the lightning protection system, a risk level NPR=1 was determined. External protection utilized the electrogeometric method of rotating spheres, with sensor tips placed strategically throughout the plant. Ground connections of the goose foot type were employed to safely discharge lightning currents. Internally, surge protection devices (SPDs) types 1 and 2, Type 2, and Type 3 were studied and installed in designated low voltage areas.

This research contributes to enhancing the safety and reliability of the flotation plant by addressing grounding and surge protection challenges. The proposed measures and findings provide valuable insights for the electrical department and contribute to the overall electrical shielding of the plant.

KEYWORD: Grounding system, finite elements, ETAP software, electrical shielding

Jorge Manuel Zambrano Orbea con cédula de identidad número: 0926181421. Licenciado/a en: CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN MENCIÓN LENGUA INGLESA Y LINGÜÍSTICA con número de registro de la SENESCYT: 1006-2017-1880675; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera” de: Jefferson Marcelo Orbea García, aspirante a magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Latacunga, julio, 03, 2023



Jorge Manuel ZAMBRANO ORBEA
C.C. # 0926181421

INDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes	1
Planteamiento del problema	2
Formulación del problema.....	3
Objetivos.....	3
Sistema de tareas en relación a los objetivos	4
Justificación	6
Hipótesis	7
CAPITULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA METODOLÓGICA	8
1.1. Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte	8
1.2. Fundamentación teórica	12
1.2.1. Fallas y perturbaciones en sistemas eléctricos trifásicos.....	12
1.2.2. Transitorios eléctricos	14
1.2.3. Sobrevoltajes en los sistemas eléctricos	16
1.2.4. Sistema de puesta a tierra	17
1.2.5. Diseño y análisis de los sistemas de puesta a tierra con métodos numéricos	29
1.2.6. Descargas atmosféricas y su efecto en los sistemas eléctricos	31
1.2.7. Norma IEC-62305 protección contra descargas atmosféricas	35
1.2.8. Equipamiento de sistema de protección contra descargas atmosféricas	36
1.2.9. Métodos de protección contra descargas atmosféricas	37
1.2.10. Descargadores de sobretensiones (DPS).....	39
1.3. Fundamentación metodológica.....	41
1.3.1. Métodos de investigación	42
1.3.2. Tipos de investigación.....	43
1.3.3. Técnicas e instrumentos de la investigación	44
1.3.4. Conclusiones del capítulo I.....	44

CAPITULO II. PROPUESTA.....	46
2.1 Título	46
2.2. Objetivos.....	46
2.3. Descripción de la propuesta.....	46
2.4. Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados.....	47
2.4.1. Descripción de la planta minera	47
2.4.2. Información eléctrica de la planta de flotación	48
2.4.3. Estado actual del sistema de puesta a tierra	50
2.4.4. Determinación de la resistividad del terreno	52
2.4.5. Modelamiento del sistema actual de puesta a tierra.....	55
2.4.6. Diseño del sistema de apantallamiento ante descargas atmosféricas ...	61
CAPITULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA.....	72
INVESTIGACIÓN	72
3.1. Análisis de Resultados	72
3.1.1. Medición de la puesta a tierra	72
3.1.2. Modelamiento del suelo	73
3.1.3. Resultados del análisis de las mallas	75
3.1.4. Estructura metálica como componente natural del SPCDA	80
3.1.5. Evaluación del método electrogeométrico	81
CONCLUSIONES.....	82
RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA.....	86

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pirámide de la calidad de la energía	14
Figura 2. Gráfica del comportamiento de un transitorio impulsivo de corriente que puede ocurrir en un sistema eléctrico	15
Figura 3. Gráfica del comportamiento de un transitorio oscilatorio por energización de capacitores	16
Figura 4. Fenómeno de descarga atmosférica de acoplamiento resistivo e inductivo	17
Figura 5. Potenciales de Contacto, de Paso y transferidos en torno a barra de tierra .	18
Figura 6. Técnicas de puesta a tierra y sus impedancias equivalentes	19
Figura 7. Corrientes capacitivas en un sistema aislado de tierra	20
Figura 8. Sistema de conexión de tierra típicos	21
Figura 9. Medida de la resistividad de un terreno	23
Figura 10. Resistividad aparente del suelo graficada en función.....	24
Figura 11. Distribución de potencial en la superficie de un terreno alrededor de un electrodo vertical.....	25
Figura 12. Potencial en la superficie del suelo en torno a la superficie de la malla ...	25
Figura 13. Situaciones que involucran riesgo a una persona y el sistema de puesta a tierra durante una falla	26
Figura 14. Exposición a un voltaje de toque	27
Figura 15. Exposición a un voltaje de paso	28
Figura 16. Ejemplo de un voltaje inducido por falla a tierra.....	28
Figura 17. Diagrama del método de elemento finito	30
Figura 18. Diagrama de disipación de energía de una descarga atmosférica	32
Figura 19. Forma de onda de la corriente de un rayo [33]	32
Figura 20. Mapa de nivel Cerámico en área de prestación de EEQ	33
Figura 21. Conexión entre las partes de la norma IEC 62305	35
Figura 22. Ángulos de protección (α) correspondientes a las clases de los SPCR.....	38
Figura 23. Método del enmallado tipo Jaula de Faraday	39
Figura 24. Diagrama de localización y clasificación de los DPS	40

Figura 25. Diagrama de Flujo del Proceso de Investigación	42
Figura 26. Localización geográfica de la planta minera en Geo portal EEQ.....	47
Figura 27. Disposición física de planta de flotación AIC	48
Figura 28. Esquema del sistema de puesta a tierra de la planta de flotación	51
Figura 29. Direcciones y sentido de las mediciones de resistividad	53
Figura 30. Mediciones de resistividad del suelo graficadas en software ETAP	54
Figura 31. Diagrama del modelo de suelo de 2 capas	55
Figura 32. Vista en 3D de la geometría de malla de puesta a tierra en ETAP	56
Figura 33. Resultados análisis de resistencia y valores de toque, paso, GPR de SPT	58
Figura 34. Perfiles de voltajes absolutos, de toque y de paso de la malla 1 en 3D	59
Figura 35. Perfiles de voltajes absolutos, de toque y de paso de la malla 2 en 3D	60
Figura 36. Perfiles de voltajes absolutos, de toque y de paso de la malla 3 en 3D	61
Figura 37. Modelo 3D de la planta de flotación.....	63
Figura 38. Aplicación del método de la esfera rodante en la vista lateral de la planta	65
Figura 39. Aplicación del método de la esfera rodante en el modelo 3D de la planta	65
Figura 40. Curva de TOV típica para DPS ciclo pesado 10 KA	68
Figura 41. Valores medidos y cálculo de la resistividad de formación usando ETAP	74
Figura 42. Perfil de potencial absoluto en 2D de la malla equipotencializada	76
Figura 43. Perfil de potencial absoluto en 3D de la malla equipotencializada	77
Figura 44. Perfil de voltaje de toque en 3D de la malla equipotencializada.....	77
Figura 45. Puesta a tierra tipo pata de ganso para bajante de pararrayo sugerido.....	78
Figura 46. Perfil voltaje toque en 3D de malla 2 ante descarga atmosférica 20 KA..	79
Figura 47. Ubicación de tomas de tierra pata de ganso en Malla 2 y demás bajantes	79
Figura 48. Vistas laterales y frontales de las zonas protegidas de la planta	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categorías típicas de fenómenos electromagnéticos sistema de potencia. ...	13
Tabla 2. Codificación de los esquemas de conexión de puesta a tierra.....	21
Tabla 3. Resistividades típicas de suelos.....	23
Tabla 4. Valores máximos de parámetros del rayo de acuerdo con el NPR	36
Tabla 5. Valores máximos de radio de la esfera rodante y del tamaño de la malla....	38
Tabla 6. Requisitos de los DPS dependiendo de las zonas de protección	39
Tabla 7. Especificaciones de transformador de media potencia	48
Tabla 8. Especificaciones de celda de media tensión	49
Tabla 9. Especificaciones de grupo electrógeno de emergencia	49
Tabla 10. Especificaciones de alimentador EEQ	49
Tabla 11. Parámetros de las SPT mallas de puesta a tierra de la planta.....	52
Tabla 12. Valores de resistencia del terreno obtenidas del equipo Fluke.....	53
Tabla 13. Valores de resistividad aparente del terreno calculados	54
Tabla 14. Parámetros de los estudios de caso para SPT en cada malla.....	57
Tabla 15. Resultado de la gestión de riesgo aplicando la norma IEC 62305-2.....	63
Tabla 16. Relación entre el NPR y la eficiencia del SPCDA.....	64
Tabla 17. Relación entre NPR y Radio de la Esfera rodante, Norma IEC 62305	64
Tabla 18. Detalle de los captadores pararrayos a instalarse en la planta.....	66
Tabla 19. Especificaciones de DPS de MT para transformador 1 MVA 13.2/440V..	69
Tabla 20. Correspondencia entre los NPR y las clases de los SPCR	70
Tabla 21. Parámetros del impulso de corriente de rayo de acuerdo a clase SPCDA..	70
Tabla 22. Determinación del DPS en relación al NPR y lugar de instalación	71
Tabla 23. Resultados de mediciones y cálculos de las mallas de SPT de la planta....	72
Tabla 24. Relación distancia entre electrodos vs Profundidad suelo y resistencia.....	74
Tabla 25. Voltaje de toque, de paso y GPR para configuraciones de malla actuales .	75
Tabla 26. Datos de voltaje de toque, de paso y GPR para el SPT equipotencializado	76
Tabla 27. Voltaje de toque, de paso y GPR para el SPT de la malla ante I=20 KA... 78	
Tabla 28. Voltaje de toque, de paso y GPR para el SPT de la malla con tomas pata ganso ante I=20 KA.....	80

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La larga experiencia de la industria eléctrica en la protección de los sistemas eléctricos demuestra la necesidad de protegerlas de antiguos y nuevos fenómenos que como son las sobrecorrientes, cortocircuitos, sobretensiones y otros que afectan la calidad de la potencia.

Dentro de los fenómenos conocidos podemos mencionar a las sobrecargas y los cortocircuitos, estudiados y analizados en detalle mediante software que permite dimensionar de mejor manera los dispositivos de protección. Con respecto a nuevos problemas derivados surgen las fugas a tierra ya sea por contactos directos e indirectos. A nivel de subestaciones e instalaciones industriales son estudiados mediante voltajes de toque y de paso admisibles en una instalación los cuales son ocasionados por fenómenos atmosféricos o maniobras en la red eléctrica ocasionando valores elevados de tensiones en equipo y estructura y siendo potencialmente peligrosas para la integridad del ser humano, y provocar la destrucción o envejecimiento anticipado de los receptores eléctrico [1].

Para que un sistema de protección eléctrico funcione de manera adecuada requiere de una parte primordial la cual es el Sistema de Puesta a tierra (SPT, por sus siglas), esto con el fin de evitar que personas en contacto con la misma, queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales de soportabilidad del ser humano cuando se presente una falla. El estudio del rendimiento de la puesta a tierra en la industria minera es imprescindible para si resguardará la integridad de las personas y los equipos [2].

En una planta minera también se consideran aspectos relacionados con las puestas a tierra como: el acoplamiento entre puestas a tierra diferentes en una mina; el diseño apropiado de la resistencia de neutro a tierra considerando los efectos capacitivos del

sistema; los equipos de protección relacionados con las resistencias de neutro a tierra, las condiciones de seguridad de los cables de arrastre subterráneos para tres niveles distintos de tensiones y el sistema de apantallamiento de las estructuras metálicas.

El estudio del sistema de puesta a tierra y su comportamiento ante fallas y descargas atmosféricas en las empresas mineras es una práctica importante para garantizar de una conexión y operación confiable, se requiere adaptarla a los códigos eléctricos, estándares de energía y que cumplan con un mínimo de parámetros aceptables. Hoy en día el estudio eléctrico de protecciones eléctricas y rendimiento del sistema de puesta a tierra se realiza mediante plataformas de software que entregan un mayor nivel de detalle e información del comportamiento ante fallas sistema eléctrico.

Planteamiento del problema

Un adecuado sistema de protecciones eléctricas es esencial para la seguridad de las personas y del correcto funcionamiento de los equipos que producen algún tipo de trabajo. El correcto trabajo de los dispositivos de protección depende directamente de un correcto sistema de puesta a tierra. Sin embargo, la puesta a tierra y su sinnúmero de terminología produce una falta de comprensión en su entendimiento que el personal técnico enfrenta diariamente.

Así mismo el riesgo de electrocución de una persona que trabaje o se encuentre en una planta industrial minera está ligado no solo al aumento de voltaje a tierra que se tiene durante una falla, sino a la corriente y su duración a través de ella [3]. Al aparecer voltajes peligrosos en la estructura de la planta que supere los valores máximos permisibles de una persona que entre en contacto, puede sufrir de un choque eléctrico y afectación en su salud.

Las fallas que no son mitigadas o reducidas en el sistema eléctrico de la planta minera, pueden ocasionar inconvenientes que van desde inhabilitar la producción hasta incluso poner en riesgo la vida del personal. Las sobretensiones en la red eléctrica producto de descargas o de maniobras que no son despejadas y derivadas en el tiempo adecuado pueden producir arcos eléctricos y por efectos térmicos explosiones e incendios.

El conocer todos los aspectos y eventos de falla que pueda ocurrir en un sistema eléctrico de puesta a tierra y sus dispositivos de protección tanto de manera teórica, simulada o medida in situ, permiten poder anticipar el comportamiento previsible de la falla y minimizar su riesgo o afectación al sistema.

La normativa eléctrica tanto nacional como la internacional establecen los requisitos básicos y mínimos que debe tener una infraestructura eléctrica. Hoy en día los análisis actuales mediante modelado y simulación de sistemas eléctricos permiten obtener valores próximos a los reales previo a la implementación y anticipar distintas fallas que se puede presentar. Estas herramientas permiten a su vez poner en práctica los conceptos y procedimientos dictados en las normas mencionadas.

Formulación del problema

La instalación eléctrica de la planta minera no cuenta con un análisis técnico en cuanto al comportamiento de su sistema de puesta a tierra frente a fallas. Con el análisis del sistema de puesta a tierra en la planta minera se permite verificar de la efectividad del sistema de puesta a tierra y su rendimiento se plantea al comparar los valores obtenidos con los estándares admitidos bajos la normativa IEEE-80.

Objetivos

Objetivo General

- Analizar el rendimiento del sistema de protección de falla a tierra y del apantallamiento ante descargas atmosféricas para la nave industrial de la planta minera Agroindustrial El Corazón.

Objetivos Específicos

- Realizar una revisión al estado del arte del rendimiento y estudios a los sistemas de puesta a tierra, los métodos de aterrizamiento de sistemas de distribución y apantallamientos para protección atmosférica.

- Evaluar los problemas en los sistemas de protección de fallas a tierra y apantallamiento para protección atmosférica que es propenso el sistema eléctrico de la planta minera.
- Simular mediante software del esquema actual de puesta a tierra y sus valores de voltajes de paso y de toque ante alteraciones de las variables importantes como la impedancia, sobretensiones y corrientes de falla.
- Proponer las alternativas de solución para el sistema eléctrico que mejor protección y rendimiento presenten desde el punto de vista técnico.

Sistema de tareas en relación a los objetivos

Objetivos Específicos	Actividades (tareas)	Resultados de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Realizar una revisión al estado del arte de los sistemas de protección de fallas a tierra, aterrizamiento de equipos eléctricos y apantallamientos para protección atmosférica.	Investigar en base de datos científicas y académicas acerca de trabajos relacionados a los sistemas de protección de fallas a tierra, estándares de medición y normativas aplicables a la determinación de las protecciones y análisis adecuados. Realizar el estado del arte y fundamentación teórica con la información más relevante del tema.	Resumen de los trabajos más trascendentales en temas de protección de fallas a tierra y apantallamientos. Clasificación de estrategias y métodos para evaluar los sistemas de puesta a tierra. Comparativas de software que realicen la evaluación de un sistema de puesta a tierra y protecciones.	Recolección de información en bases de datos científicas por medio de buscadores en revistas indexadas. Clasificación del software que mejor se adapte al estudio de puesta a tierra y sus protecciones.
Evaluar los problemas en los sistemas de protección de	Determinar los problemas eléctricos relacionados a fallas a tierra y descargas	Esquemas explicativos acerca de las fallas	Diagramas de flujo de procesos, establecimiento de secuencia de

fallas a tierra y apantallamiento para protección atmosférica que es propenso el sistema eléctrico de la planta minera.	atmosféricos que está propenso en la planta minera. Enlazar cada uno de los problemas con la normativa aplicable para definir los métodos de mitigación de falla que se deba aplicar.	eléctricas a ser analizadas. Diagrama de flujo, procedimientos y aplicación de normas para cumplir con parámetros eléctricos de puesta a tierra y apantallamiento admisibles en la instalación eléctrica	acciones (entradas y salidas) que se establecen en un proceso de solución de problemas. Interpretación de mediciones, valores de campo para obtener información a analizar.
Simular mediante software los diversos esquemas de protección, mediante la variación de las variables importantes como la impedancia, sobretensiones y corrientes de falla.	Implementar el modelo de red eléctrica y del sistema de puesta a tierra y apantallamiento en el software de análisis escogido. Realizar un sinnúmero de simulaciones para obtener los valores de voltajes, corrientes, tiempo de despeje de falla y respuesta ante perturbaciones.	Conjunto de variables eléctricas de resistencias, niveles de sobrevoltajes y corrientes en función del tiempo obtenidos de la simulación del sistema de puesta a tierra y apantallamiento. Gráficos y diagramas de las variables más importantes resultados de la simulación.	Empleo de modelos matemáticos mediante software para simular el comportamiento de la puesta a tierra y la obtención de valores de sus fallas y perturbaciones. Graficas de análisis de resultados de las variables de resistencia, voltajes, corrientes en función del tiempo
Identificar las alternativas de solución para el sistema eléctrico que mejor protección y rendimiento presenten desde el punto de vista técnico.	Analizar las distintas gráficas de simulación y esquemas físicos del sistema eléctrico y de puesta a tierra de la planta minera. Establecer las adecuaciones y mejoras al sistema eléctrico de	Listado de propuestas y esquemas de conexión nuevos que se requieren ser implementados en la planta minera. Especificaciones técnicas de nuevos equipos de protección contra	Diagramas ilustrativos de procesos y esquemas de conexión de equipamiento eléctrico. Tablas de resumen y fichas técnicas de equipos eléctricos de

	protecciones ante fallas a tierra y sobretensiones por descargas atmosféricas que requiere la planta.	fallas a tierra y sobretensiones transitorias y permanentes.	protección de fallas a tierra y de sobretensiones por descargas atmosféricas.
--	---	--	---

Elaborado por: Autores

Justificación

El presente trabajo brinda una propuesta de mejoramiento al sistema de distribución eléctrico de una planta industrial minera, en la cual se analiza el rendimiento del sistema de puesta a tierra ante fallas y descargas atmosféricas.

La propuesta surge ante la necesidad del departamento técnico Eléctrico de identificar las perturbaciones que ocurren en el sistema eléctrico y producen un potencial riesgo a los trabajadores e interrupciones en el suministro eléctrico debido a una incorrecta actuación de las protecciones eléctricas. Los efectos menores producidos son la interrupción en las operaciones normales de la planta minera, pudiendo escalar a siniestros o problemas en la seguridad de las personas.

La planta minera al tener parte de sus instalaciones eléctricas con una antigüedad superior a los 20 años y otras partes implementadas recientemente, requiere ser analizadas en conjunto en cuanto al rendimiento del sistema de puesta a tierra, su equipotencialidad y su cumplimiento de acuerdo a la normativa vigente general nacional con el NEC, e internacional de puesta a tierra IEEE 80 y la IEEE 142 para puestas a tierra de sistemas industriales. Así mismo se requiere analizar el riesgo de fenómenos electromagnéticos de rayos y lluvias en el sector, ya que no se cuenta con información técnica para determinar la verdadera necesidad de implementar un sistema de protección contra descargas eléctricas.

Estos problemas de fallas a tierra o descargas atmosféricas requieren ser analizados tanto de manera empírica, como mediante la simulación mediante software que aplica métodos computacionales para determinar la resistencia de la malla de tierra, los voltajes de paso y toque y aproximar valores de corriente de descarga que simulen la

posible ocurrencia de estos fenómenos electromagnéticos para poder adecuar las protecciones eléctricas adecuadas.

Hipótesis

¿El análisis del comportamiento al sistema de puesta a tierra y apantallamiento ante fallas mediante simulación en software permitirá determinar su rendimiento para poder identificar las deficiencias y proponer soluciones para implementar en la instalación eléctrica?

CAPITULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA METODOLÓGICA

1.1. Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte

1.1.1.1. Del análisis de las mallas de tierra

La práctica actual para el diseño de sistemas de puesta a tierra en subestaciones o centros de transformación MT/BT se basa principalmente por el estándar IEEE 80 como un proceso iterativo de cambio de variables de diseño hasta que se cumplan los requisitos de seguridad para los voltajes de paso y contacto y la resistencia máxima de la malla de tierra [4]. Estudios usando este método tradicional de obtención de diferencias de potencial en diferentes puestos de los sistemas de puestos a tierra para evaluar los voltajes de paso y de toque admisibles y soportables en las personas se realiza en [5]. Sin embargo, la mayoría de las geometrías de las mallas de puesta a tierra en edificios, plantas industriales son muy complicadas, y de distintas geometrías y forma y no son cuadradas, rectangulares o triangulares puros como se calculan en la guía IEEE 80. Además, el proceso IEEE solo permite diseñar sistemas de puesta a tierra bajo aproximaciones de suelo uniforme [4].

Como métodos modernos de análisis de malla a tierra, en [6] se estudia un diseño del sistema de puesta a tierra el software ETAP con el método de elementos finitos que se usa para analizar mallas de tierra de diferentes ensayos geométricos, resistividades y lugares donde se inyecta la corriente de falla para obtener los valores de voltajes de paso y de toque. Estos se comparan con los calculados basados en las ecuaciones de la norma IEEE-80; con el objetivo de realizar el reforzamiento y la optimización del SPT de una subestación de transmisión.

Los métodos de diseño de SPT requieren como paso inicial las mediciones in situ de la resistividad del suelo, que como se mencionó no es uniforme y es multicapa. En [7] se realiza análisis del SPT de una central de generación distribuida mediante mediciones in situ de la resistividad y resistencia de la malla a tierra para posteriormente realizar un modelado y simulación del sistema de puesta a tierra y apantallamiento en ETAP

por medio del método de elementos finitos; en [8] se aplica enfoques de modelo de suelo multicapa que es mucho más preciso que el modelo de suelo uniforme.

Revisando estudios de plantas industriales de gran magnitud, en [9] se analiza las plantas industriales de petróleo y gas y oleoductos donde se diseña sus mallas de tierra de las subestaciones eléctricas mediante el software ETAP, en el cual se utiliza se realiza un análisis de cortocircuito de la subestación bajo estudio y con el módulo de diseño de puesta a tierra se diseña, simula y optimiza el diseño diseña la malla de tierra.

Otros problemas relacionados con mallas de puesta a tierra sin equipotencialidad se analizan en [10], donde se estima el potencial transferido entre dos redes de puesta a tierra independientes ubicadas a 40 m de distancia, una de las cuales, denominada red activa, fue inyectada con corriente de rayos disparados por equipos y en la red pasiva se determina los voltajes de paso, de toque. En [11] se construyó sistema de puesta a tierra de diferentes configuraciones con diferentes valores de resistividad del suelo, el objetivo de este estudio fue cuantificar los efectos de la resistividad del suelo, la polaridad del impulso y las configuraciones de los electrodos de tierra.

Para analizar los efectos que presentan los sistemas de puesta a tierra sobre el neutro y la carga, se utilizó un modelo matemático del sistema de puesta a tierra y se simuló mediante el programa Simulink de Matlab, considerando dos casos, en función de si la descarga atmosférica impacta en el neutro del sistema o en una fase [12].

1.1.1.2. Del análisis de la respuesta transitoria de los sistemas de puesta a tierra (SPT)

El análisis de transitorios en el caso de sistemas de puesta a tierra tiene que ver con la respuesta ante descargas atmosféricas y valores de voltajes y corrientes de falla de gran magnitud y de corta duración de tiempo o de alta frecuencia. En [13] se realiza una recopilación de los métodos empleados para el análisis de la respuesta del sistema de puesta a tierra para altas frecuencias y presenta un modelo del sistema híbrido basado en modelado de líneas eléctricas para definir parámetros del SPT implementado en Matlab y comparado con un modelo desarrollado en ATPdraw.

Otro estudio para determinar la impedancia de puesta a tierra de configuraciones arbitrarias y su comportamiento ante excitaciones tipo impulso es analizado por [14] mediante la simulación en Matlab (GTIERRAS); el modelo incluye el análisis de sobretensiones por descargas atmosféricas, otros transitorios típicos asociados con problemas de compatibilidad electromagnética y el efecto de la geometría de los electrodos y la resistividad del suelo.

En [15] se analizó la protección mejorada contra rayos para redes de bajo voltaje usando la técnica de conexión equipotencial. Se obtuvo valores del pico de corriente máxima, corriente nominal, voltaje de operación, las corrientes de falla y los tiempos de falla modelados en ETAP usando la técnica de flujo de carga de Gauss-Seidel.

En [16] se analiza un trabajo que es muy recomendado para futuros diseño de sistemas de puesta a tierra de subestaciones. Se modela y simula un sistema de puesta a tierra en subestaciones eléctricas ante corriente de falla debido a caída de rayos o mal funcionamiento del dispositivo. EL modelado y simulación consistió en análisis de transitorios den de transitorios (ATP/EMTP), donde el modelo inyectar una corriente de falla de 25 kA en el centro o en una de las esquinas de la malla.

En [10] se evalúan mediante simulación los potenciales transferidos entre dos mallas de tierra separadas y la respuesta transitoria del dispositivo de protección contra sobretensiones (SPD) en la red pasiva. Se encuentra que la amplitud de las corrientes de rayo inicialmente inyectadas en la red activa es un determinante importante de los potenciales máximos transferidos, la corriente máxima que fluye a través de los SPD y la energía consumida por el SPD.

1.1.1.3. Del análisis de pararrayos en estructuras eléctricas

El análisis de protección contra el rayo y los sistemas de puesta a tierra se han convertido en los últimos años en un tema fundamental, y muchos estudios se han realizado en la literatura. En [17] se ha revisado más de 45 estudios sobre este tema realizados en los últimos cinco años.

En [18] se indica los procedimientos para realizar mediciones y verificaciones sobre el sistema de Protección Contra Descargas Atmosféricas y Puestas a Tierra de Protección, con el objetivo de mantener el buen estado de conservación de las instalaciones existentes y verificar el cumplimiento de la normativa vigente. A su vez se indica el cálculo de la ocurrencia de caída de rayos en el sector.

La medida de la ocurrencia y probabilidad y riesgo de la caída de rayos es analizada en [19] que realiza en estudio en el Distrito de San Marcos – Perú. Posteriormente se diseña del sistema de protección de pararrayos para la protección de la instalación eléctrica bajo las recomendaciones brindadas por la norma internacional NFPA 780.

En [20] se investigó, evaluó y mejoró el sistema de protección contra rayos y el sistema de puesta a tierra de una planta de la industria petroquímica. Los métodos utilizados en este estudio fueron métodos de protección de ángulo y esfera rodante. Del mismo modo en [21] se compara los dos principales métodos de diseño: el método clásico de ángulo fijo empírico y el método de esfera rodante del modelo electrogeométrico (EGM).

1.1.1.4. Del análisis de los equipos de protección de sobretensiones (SPD)

Los dispositivos de protección contra sobretensiones, SPD, mejoran la confiabilidad de los sistemas de energía al mitigar el riesgo de falla del equipo debido a sobretensiones incidentes, sobre todo ante equipos electrónicos sensibles en sistemas modernos [22]

En [10] se analiza el potencial transferido entre dos redes de puesta a tierra independientes ubicadas a 40 m de distancia. Se evalúan los potenciales transferidos en otra red, denominada red pasiva, y la respuesta transitoria del dispositivo de protección contra sobretensiones (SPD) en la red pasiva.

En [22] se evalúa los SPD en un entorno de laboratorio mediante eventos de sobrevoltajes transitorios y/o picos de corriente y evalúa mediante los métodos de prueba para los dispositivos de protección contra sobretensiones.

En [20] se investigó, evaluó y mejoró el sistema de protección contra rayos y el sistema de puesta a tierra de una planta de la industria petroquímica. Dentro del estudio se

desactivó el dispositivo de protección contra sobretensiones (SPD) existente y provocó un aumento en la magnitud del potencial de tierra en el edificio DCS.

1.2. Fundamentación teórica

1.2.1. Fallas y perturbaciones en sistemas eléctricos trifásicos

1.2.1.1. Calidad de la energía en los sistemas eléctricos

La calidad de energía de un sistema eléctrico depende de las condiciones normales de operación, y tiene que ver con el voltaje, la frecuencia, la distorsión de las señales y la continuidad del servicio. Para asegurar un nivel adecuado de calidad requiere del estudio del conexionado adecuado de los sistemas de puesta a tierra, a lo largo de toda la cadena de valor (generación, transmisión, distribución), bajo la perspectiva de disminución de perturbaciones e interrupciones del servicio eléctrico [23].

La Calidad Eléctrica en una instalación viene afectada por la presencia de las perturbaciones eléctricas. La guía IEEE 1100 [24] define a la calidad de energía como el concepto de alimentación y de puesta a tierra de equipo electrónico sensible en una manera que sea adecuado para su operación. En un sistema eléctrico, las anomalías que puedan ocurrir se clasifican en dos partes; las fallas y las perturbaciones.

1.2.1.2. Fallas en los sistemas eléctricos

Una falla es la condición que “impide continuar” la operación de uno o más componentes de un sistema eléctrico y requiere la rápida acción de los esquemas de protecciones para no dañar a los equipos.

La falla eléctrica común es el llamado cortocircuito, se produce por la ruptura de los medios aislantes entre conductores activos o entre un conductor activo y tierra. Puede ser causado por factores como daños mecánicos de los equipos, sobrecalentamiento de conductores, picos de tensión (causados por rayos o switcheo de interruptores), ingreso de cargas conductivas y capacitivas, ionización del aire y deterioro de los medios aislantes debido a un entorno hostil o a la vejez, o al mal uso del equipo.

1.2.1.3. Perturbaciones en los sistemas eléctricos

El estándar IEEE 1159-2019 [25] clasifica los fenómenos electromagnéticos que describen los problemas de la calidad de energía de la forma como se muestra en la Tabla 1, que incluyen los fenómenos presentes en sistemas eléctricos, estos a su vez se clasifican según su duración, amplitud, espectro armónico de los fenómenos electromagnéticos que provocan las perturbaciones. Estos se pueden clasificar en transitorios (Transitorios impulsionales, transitorios oscilantes), variaciones de corta duración (Interrupciones, huecos, sobretensiones momentáneas), variaciones de larga duración (Sobretensión, sub tensión, interrupciones mantenidas), desequilibrio (Desequilibrio de tensión y de corriente), distorsión de forma de onda (Armónicos, sub armónicos, interarmónicos, microcortes componentes de continua y ruidos de alta frecuencia.), fluctuaciones de tensión, variaciones de frecuencia

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients 1.1 Impulsive 1.1.1 Nanosecond 1.1.2 Microsecond 1.1.3 Millisecond 1.2 Oscillatory 1.2.1 Low frequency 1.2.2 Medium frequency 1.2.3 High frequency	5 ns rise 1 μ s rise 0.1 ms rise < 5 kHz 5–500 kHz 0.5–5 MHz	< 50 ns 50 ns – 1 ms > 1 ms 0.3–50 ms 20 μ s 5 μ s	 0–4 pu ^a 0–8 pu 0–4 pu
2.0 Short-duration root-mean-square (rms) variations 2.1 Instantaneous 2.1.1 Sag 2.1.2 Swell 2.2 Momentary 2.2.1 Interruption 2.2.2 Sag 2.2.3 Swell 2.2.4 Voltage Imbalance 2.3 Temporary 2.3.1 Interruption 2.3.2 Sag 2.3.3 Swell 2.3.4 Voltage Imbalance		0.5–30 cycles 0.5–30 cycles 0.5 cycles – 3s 30 cycles – 3 s 30 cycles – 3 s 30 cycles – 3 s >3 s – 1 min >3 s – 1 min >3 s – 1 min >3 s – 1 min	0.1–0.9 pu 1.1–1.8 pu < 0.1 pu 0.1–0.9 pu 1.1–1.4 pu 2%–15% < 0.1 pu 0.1–0.9 pu 1.1–1.2 pu 2%–15%
3.0 Long duration rms variations 3.1 Interruption, sustained 3.2 Undervoltages 3.3 Overvoltages 3.4 Current overload		> 1 min > 1 min > 1 min > 1 min	0.0 pu 0.8–0.9 pu 1.1–1.2 pu
4.0 Imbalance 4.1 Voltage 4.2 Current		steady state steady state	0.5-5% 1.0-3.0%
5.0 Waveform distortion 5.1 DC offset 5.2 Harmonics 5.3 Interharmonics 5.4 Notching 5.5 Noise	0–9 kHz 0–9 kHz broadband	steady state steady state steady state steady state steady state	0–0.1% 0–20% 0–2% 0–1%
6.0 Voltage fluctuations	< 25 Hz	intermittent	0.1–7% 0.2–2 P _{st} ^b

Tabla 1. Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos del sistema de potencia.[25]

1.2.1.4. Relación entre calidad de la potencia y los sistemas de puesta a tierra

La relación entre la calidad de energía y los sistemas de puesta a tierra son motivo de estudio orientadas a la mitigación de las perturbaciones de tipo transitorio, creadas por el impulso electromagnético generado durante la descarga a tierra de un rayo [26]. Estas perturbaciones se ven reflejadas como sobretensiones y sobrecorrientes, las cuales inciden fuertemente sobre la operación de las instalaciones eléctricas.

Las recomendaciones que se plantean para mejorar uno de los principales problemas de calidad de la energía en relacionan con los sistemas de puesta a tierra están descritos en la norma IEC 62305 [27]. Estas prácticas o recomendaciones se orientan a la puesta a tierra y equipotencialización de una red eléctrica durante la etapa de diseño y construcción de la instalación.

En la Figura 1 se muestra la pirámide de calidad de energía, donde se observa que la base de la calidad de energía son los sistemas de puesta a tierra, un sistema eléctrico con diseño seguro permitirá la disminución de fallas relacionadas con interrupciones, eventos transitorios y variaciones en los parámetros fundamentales.



Figura 1. Pirámide de la calidad de la energía [23]

1.2.2. Transitorios eléctricos

Los transitorios eléctricos o también llamados transientes se definen como perturbaciones aleatorias de alta energía y de muy corta duración, que no pueden ser detectados y/o despejados por los dispositivos de protección instalados, se dividen en

dos subcategorías: transitorios impulsivos y transitorios oscilatorios. El diccionario Standard IEEE define un transitorio como "una onda transitoria de corriente, voltaje o potencia en un circuito eléctrico". Utiliza los términos sobretensión, sobretensión de conmutación y transitorio para describir estos fenómenos.

1.2.2.1. Transitorios impulsivos

Un transitorio impulsivo es un cambio repentino en el valor nominal ya sea de voltaje, corrientes o ambos, es unidireccional en polaridad (principalmente positiva o negativa). Los transitorios impulsivos normalmente se caracterizan por su valor máximo, con un tiempo de duración de subida y bajada muy rápidos.

Estos fenómenos también deben describirse por su contenido espectral. La causa más común de transitorios impulsivos son los rayos. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de un transitorio impulsivo [28].

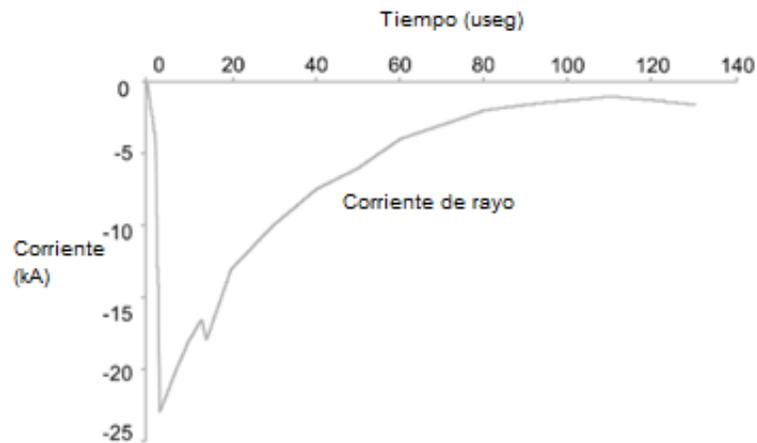


Figura 2. Gráfica del comportamiento de un transitorio impulsivo de corriente que puede ocurrir en un sistema eléctrico [25]

1.2.2.2. Transitorios Oscilatorios

Son eventos repentinos que afectan la condición de estado estable de la tensión o la corriente de una señal, tanto positivo como negativo de la señal, que oscila a la frecuencia natural del sistema, se produce un incremento en la tensión y luego un descenso de este valor de forma alternada y rápida. Estos transitorios ocurren cuando

se conmuta una carga inductiva o capacitiva, como un motor o un banco de capacitores. En la figura 3 se muestra un transitorio oscilatorio típico de baja frecuencia atribuible a la energización de los bancos de capacitores [28].

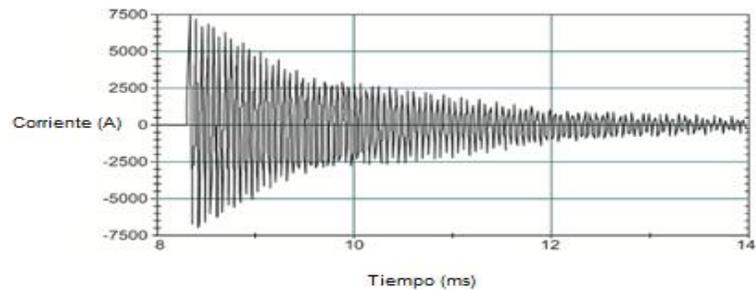


Figura 3. Gráfica del comportamiento de un transitorio oscilatorio por energización de capacitores [25]

1.2.3. Sobrevoltajes en los sistemas eléctricos

Es cualquier voltaje entre un conductor de fase y tierra o entre conductores de fase que tiene un valor pico que excede el pico correspondiente del voltaje más alto para la definición de equipo. Una sobretensión es un pulso u onda de voltaje que se superpone al voltaje nominal de la red.

1.2.3.1. Tipos de sobretensiones en los sistemas eléctricos

Cuatro tipos de sobretensión pueden perturbar las instalaciones eléctricas y las cargas:

- Sobretensiones de conmutación: sobretensiones de alta frecuencia o perturbaciones en ráfagas causadas por un cambio en el estado estacionario en una red eléctrica.
- Sobretensiones de frecuencia industrial: sobretensiones de la misma frecuencia que la red (50, 60 o 400 Hz) provocadas por un cambio permanente de estado en la red (tras una avería: avería de aislamiento, avería del conductor neutro, etc.).
- Sobretensiones provocadas por descarga electrostática: sobretensiones muy breves (unos nanosegundos) de muy alta frecuencia provocadas por la descarga de cargas eléctricas acumuladas (por ejemplo, una persona que camina sobre una alfombra con suelas aislantes se carga eléctricamente con una tensión de varios kilovoltios).
- Sobretensiones de origen atmosférico.

1.2.3.2. Acoplamiento resistivo e inductivo en sobrevoltajes transitorios

Los transitorios acoplados resistivamente son causados por diferencias en potencial entre dos tierras conectadas. La energía de los golpes de tierra fluye a través del camino de menor resistencia, y aumenta el potencial en locales puestas a tierra, cableado y circuitos electrónicos. Donde estos están unidos a tierras separadas por un metal línea de servicio, el potencial se comparte, creando transitorio sobretensiones cuando la corriente intenta fluir.

Los transitorios acoplados inductivamente son causados por captación electromagnética. Una descarga de rayo da lugar a campo electromagnético. Si los servicios metálicos, como las líneas eléctricas aéreas, pase a través de este campo, un voltaje será recogido a través de las líneas, o inducida en la línea [29].

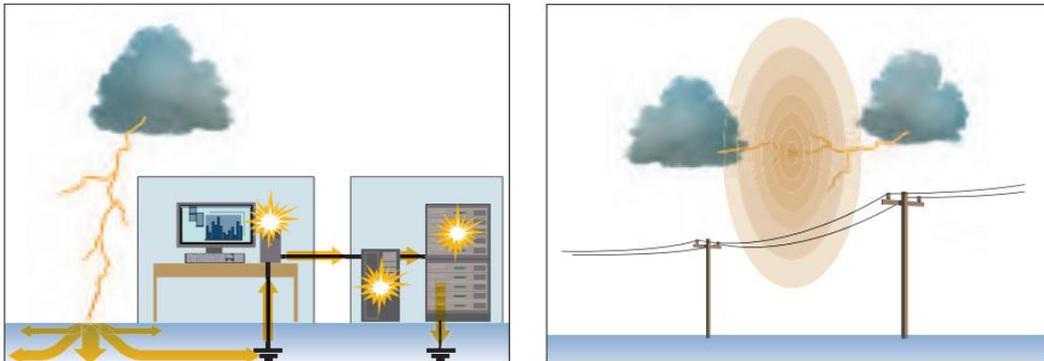


Figura 4. Fenómeno de descarga atmosférica a través de acoplamiento resistivo e inductivo [29]

1.2.4. Sistema de puesta a tierra

Un sistema de puesta a tierra (SPT, por sus siglas), cuya definición de la IEEE es: Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra.

El objetivo de la puesta a tierra, es “conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificios y superficies próximas del terreno no aparezcan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, se permita el paso a tierra de las corrientes de defecto o de las descargas de origen atmosférico”.

1.2.4.1. Filosofía subyacente a un SPT

El cambio actual en torno a los SPT radica en que deben ser diseñados para asegurar que los potenciales en su vecindad durante una falla están bajo los límites apropiados. El potencial alcanzado bajo condiciones de falla severa puede ser varios miles de voltios. Como la corriente de falla a tierra fluye en el terreno que rodea al electrodo, el potencial en el suelo y en su superficie se elevará. Esta situación se muestra en la Figura 5, en la cual se muestra la relación entre las variables de la elevación de voltaje en una superficie del suelo, en torno a electrodo vertical.

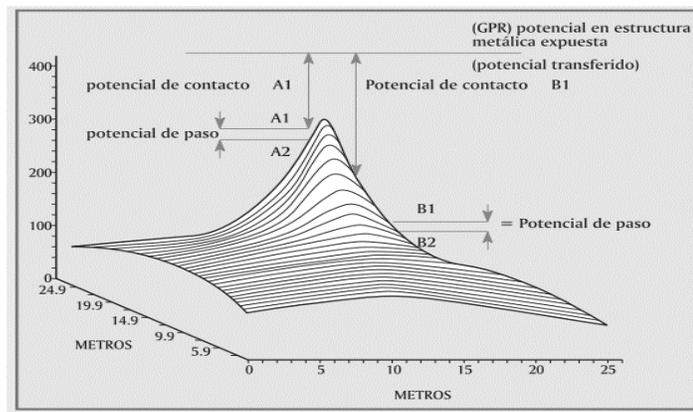


Figura 5. Potenciales de Contacto, de Paso y Transferidos en torno a una barra de tierra

1.2.4.2. Normativa de SPT

Las normativas proporcionan los límites de diseño que deben satisfacerse y explican cómo pueden diseñarse los sistemas de puesta a tierra para ajustarse a ellos.

Normativa internacional

IEEE Std. 80: 2013, Guía de seguridad en la puesta a tierra de subestaciones de CA

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.

IEEE Std. 142, Green Book IEEE Recommended Practice for Grounding Industrial and Commercial Power Systems.

IEEE Std 1100-2005, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment

IEC TR 61000-5-2:1997, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 2: Earthing and cabling

Normativa local

El Código Eléctrico Nacional Ecuatoriano como Normativa Técnica, entregado por el INEN cuya aplicación de pautas y recomendaciones se considera para el otorgamiento de permiso de construcción y aprobaciones eléctricas. Dentro de las Normas Técnicas Ecuatorianas se tiene la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 345.

1.2.4.3. Sistemas de puesta a tierra en sistemas de potencia

Hay varias formas en las cuales puede operar el sistema de potencia: aislado de tierra, y puestos a tierra, en donde surgen diferentes disposiciones como puestos a tierra sólidamente, puestos a tierra resistiva, puesta a tierra reactiva, comprendiendo a estos como puesto a tierra con baja impedancia y puesto a tierra con alta impedancia. En la Figura 6 se tiene las técnicas de puesta a tierra y sus impedancias equivalentes.

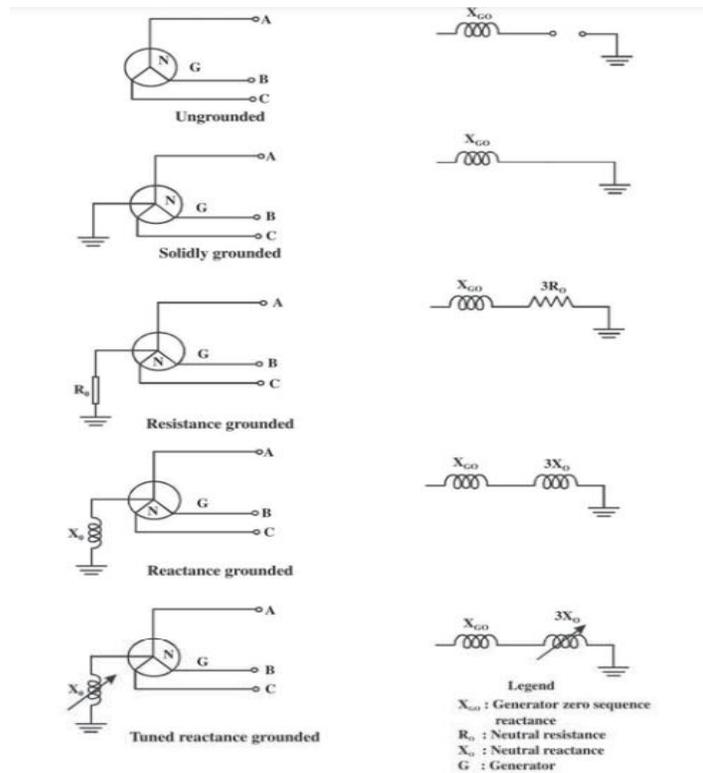


Figura 6. Técnicas de puesta a tierra y sus impedancias equivalentes

Sistemas aislados de tierra. - Este sistema no tiene una conexión a tierra intencional. La conexión a tierra en estos sistemas se realiza a través de vías de alta impedancia, que vienen a ser las capacidades distribuidas de los cables o líneas y a través de las impedancias de los pararrayos [30]. Ante una falla fase – tierra fluye una corriente que retorna vía los acoplamientos capacitivos de las otras dos fases como la Figura 7.

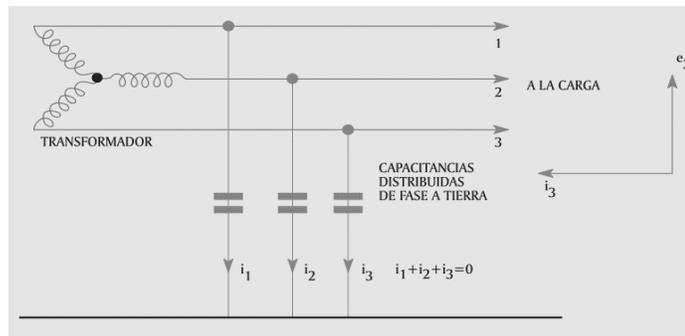


Figura 7. Corrientes capacitivas en un sistema aislado de tierra [30]

Sistemas puestas a tierra. – La característica de estos sistemas es que tiene al menos un conductor o punto (usualmente el neutro o punto común de la estrella) intencionalmente conectado a tierra a través de un aterramiento físico de un equipo a través de un conductor a tierra.

Este sistema se adapta cuando hay necesidad de conectar al sistema cargas fase neutro, para prevenir que el voltaje neutro a tierra varíe con la carga. El tipo de puesta a tierra se clasifica según el tipo de conexión instalada. Los principales tipos son:

- Puestos a tierra mediante impedancia. – Se caracterizan por poseer resistores y/o reactores en la conexión entre el punto neutro y tierra para limitar la corriente de falla a un nivel controlado y amortiguar los sobrevoltajes transitorios.
- Puestos a tierra con baja impedancia o sólidamente puesto a tierra. - Esta es la técnica más común, particularmente en bajo voltaje. El neutro se conecta a tierra a través de una conexión sin ninguna impedancia.

1.2.4.4. Esquemas de conexión de puesta a tierra en instalaciones bajo voltaje

La denominación de estos esquemas se realiza con un código de letras que tienen el siguiente significado detallados en Tabla 2.

Tabla 2. Codificación de los esquemas de conexión de puesta a tierra

Primera letra	Tipo de sistema eléctrico con respecto a tierra, es decir la disposición del neutro del transformador.	T: Conexión directa a tierra. I: Aislado de tierra
Segunda letra	Referida a la situación de las masas de la instalación receptora con respecto a tierra	T: Masas conectadas a tierra, independientemente de la tierra de la alimentación. N: Masas conectadas al neutro de la alimentación.
Tercera letra	Indica la situación relativa del conductor neutro frente al de protección	S: Conductor neutro (N) y de protección (CP) separados. C: Conductor neutro y de protección combinado

Las combinaciones anteriores conducen a tres posibles esquemas que presentan diferentes características de instalación y funcionales.

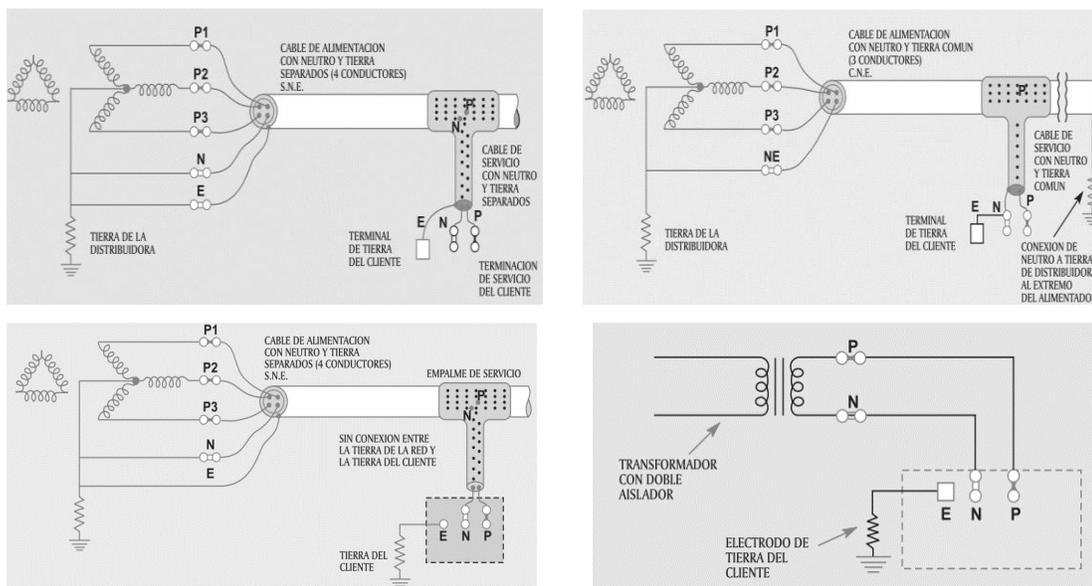


Figura 8. Sistema de conexión de tierra típicos

- **TN-S.-** El neutro de la fuente tiene un único punto de conexión a tierra en el transformador de alimentación. Los cables de alimentación tienen neutro separado del conductor de tierra de protección.

- **TN-C-S.** - En esta configuración, el neutro de la alimentación se pone a tierra en varios puntos. La alimentación en el interior de la instalación del cliente debiera ser TN-S, es decir, el neutro y la tierra deben estar separados, conectados sólo en la posición de servicio.
- **TT.**- Este es un sistema donde la alimentación se pone a tierra en un único punto, pero la pantalla del cable y las partes metálicas expuestas de la instalación del cliente están conectadas a tierra vía un electrodo separado que es independiente del electrodo de alimentación.
- **IT.** - Este es un sistema que no tiene conexión directa entre partes vivas y tierra.

1.2.4.5. Variables que intervienen en un sistema de puesta a tierra

Un sistema de puesta a tierra debe asegurar que se tenga un valor bajo de impedancia y que los voltajes de paso y contacto sean satisfactorios.

La tierra física presentará una impedancia al flujo de corriente que consiste de tres partes principales que son la resistividad del material del electrodo, la resistividad de contacto entre el electrodo y el terreno y finalmente una resistividad dependiente de las características del terreno mismo. La impedancia metálica del electrodo es usualmente pequeña y consiste de la impedancia lineal de las barras y/o conductores horizontales mientras que la resistencia de contacto se suele suponer que los electrodos de tierra están en perfecto contacto con el suelo que los rodea y basta asegurar que el material de relleno sea apropiado.

Resistividad del terreno

El factor de mayor importancia que afecta la impedancia del sistema de tierra es la impedancia del medio en el cual está situado el electrodo, es decir, el terreno. La resistividad del terreno se expresa en [Ω -m]. Algunos valores típicos de resistividad se dan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resistividades típicas de suelos

Valores típicos de resistividad de diferentes suelos			
Tipo	Resistividad (ohm-metro)		
Agua de mar	0,1	-	1
Tierra vegetal/arcilla húmeda	5	-	50
Arcilla, arena y grava	40	-	250
Creta (tiza) porosa	30	-	100
Piedra caliza cristalina	300	+	
Roca	1 000	-	10 000
Roca ígnea	2 000	+	
Concreto seco	2 000	-	10 000
Concreto húmedo	30	-	100
Hielo	10 000	-	100 000

En la práctica no existe los terrenos totalmente uniformes. Por lo que se requiere conocer el terreno hasta una cierta profundidad, que corresponde a aquella hasta la cual pueden fluir las corrientes de falla a tierra. Puede ser estar compuesto por una delgada capa de terreno superficial, y capas sucesivas que puede tener rocas a su vez menos grietas, ser más sólida y se esperaría que tuviese una resistividad mayor.

Medida de la resistividad del terreno

El método descrito como el método Wenner, es el más aplicado y usa estacas equidistantemente espaciadas. La prueba se realiza tradicionalmente usando un medidor de tierra de cuatro terminales. Cuatro estacas se clavan en el suelo como se muestra en el diagrama, separadas una distancia “a” metros. La profundidad de cada estaca se trata de que no exceda “a” dividido por 20 y normalmente es inferior a 0,3 metros. Las dos estacas exteriores se conectan a los terminales de corriente C1 y C2 del instrumento y las estacas interiores, a los terminales de potencial P1 y P2.

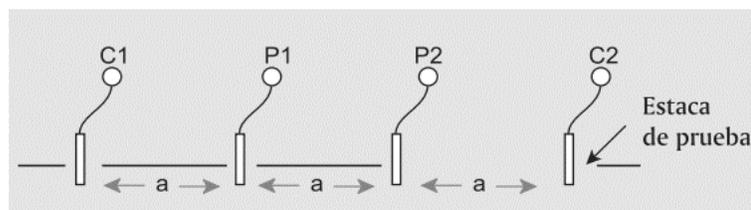


Figura 9. Medida de la resistividad de un terreno

Si “R” es la lectura de resistencia del instrumento, en ohms, para una separación de “a” metros, entonces la resistividad aparente está dada por la siguiente ecuación:

$$\rho = 2 \pi R a [\Omega - m] \quad \text{Ec. 1.1}$$

El término “resistividad aparente” se usa ya que la fórmula anterior supone que el terreno es uniforme hasta una profundidad “a” metros bajo el punto central del esquema de medida. Se recomienda obtener información respecto de la estructura real del suelo tomando una serie de lecturas, incrementando “a” en pasos de 1 metro hasta una separación de 6 metros, luego en pasos de 6 metros hasta una separación de 30 metros. Para instalaciones de área muy grande, especialmente donde hay roca abajo, puede ser aconsejable lecturas a 50 m, 80 m y aún 100 m de separación de estacas.

Durante la realización de la medida se debe dibujar una curva de resistividad vs separación como se muestra en la Figura 10. Esta curva proporcionará información respecto de la estructura general del terreno en la localidad, identificando lecturas extrañas y ayudando a decidir cuántas medidas se requieren. Si hay grandes fluctuaciones en los valores medidos, es probable que las condiciones del suelo sean variables, la tierra ha sido compuesta o existen tuberías enterradas en el área.

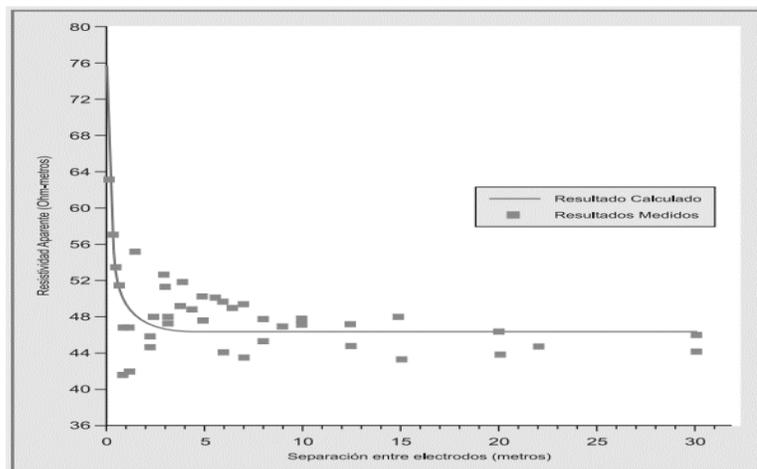


Figura 10. Resistividad aparente del suelo graficada en función

1.2.4.6. Consideraciones al diseño de la malla de tierra

Un diseño detallado del sistema de puesta a tierra depende de cumplir con los criterios de voltajes de paso y contacto admisibles y del tiempo tomado por el sistema de protección para desconectar el circuito fallado; estos valores obtenidos dependen de la norma aplicada.

Voltaje en un electrodo alrededor de la superficie del terreno

El comportamiento del voltaje que se mide en la superficie del terreno y alrededor de una varilla cuando está profundizada un valor “h”. El potencial de tierra $\phi(V)$ disminuye conforme aumenta la distancia $x(m)$ desde la pica; La elevación máxima U_{tk} del potencial de tierra se muestra también en la Figura 11.

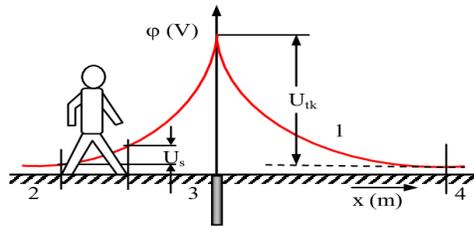


Figura 11. Distribución de potencial en la superficie de un terreno alrededor de un electrodo vertical

Un ejemplo de un perfil de voltaje en la superficie del suelo se muestra en la Figura 12. Una inspección de este perfil muestra que el potencial de superficie en el área sobre el electrodo principal esta entre 70 y 90% del GPR.

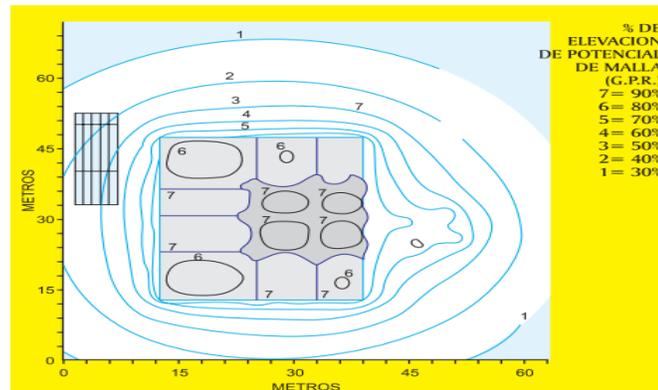


Figura 12. Potencial en la superficie del suelo en torno y sobre la superficie de la malla

1.2.4.7. Criterios y definiciones de voltajes tolerables

La Figura 13 muestran cinco situaciones básicas que involucran a una persona e instalaciones puestas a tierra durante una falla. Para un contacto de pie a pie, el circuito accidental equivalente es el de la Figura 15, y su voltaje de activación U es igual a E_s (voltaje de paso). Para los tres ejemplos de contacto de manos a pies, se aplica la Figura 14, y U es igual a E_t (voltaje de contacto), E_m (voltaje de malla) o $E_{trrd} - GPR$ (voltaje transferido), respectivamente.

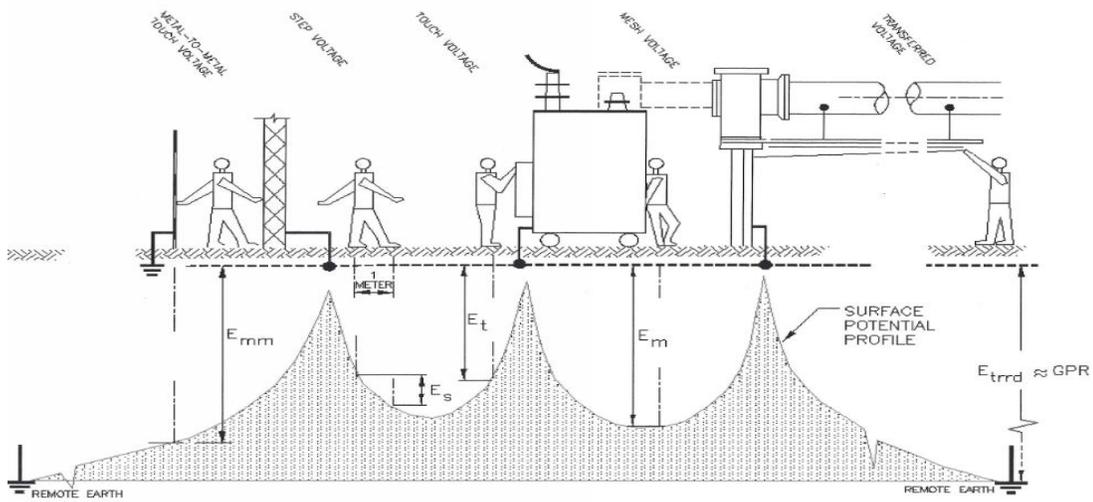


Figura 13. Situaciones que involucran riesgo a una persona y el sistema de puesta a tierra durante una falla

Subida del potencial de malla de tierra (GPR).

Es la máxima elevación de potencial de una puesta a tierra respecto de una puesta a tierra remota que se asume ideal $V = 0V$, cuando fluye a través de ella una corriente desde o hacia el terreno. En modo normal sin falla, el GRP es 0 voltios. Se calcula así:

$$GPR = I_{fg} Z_g [V] \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde:

I_{fg} = corriente de falla a tierra

Z_g = impedancia de la malla de tierra

Voltaje de grilla (Mesh Voltage)

Es el voltaje más grande que se puede producir en un cuadro del mallado.

Voltaje transferido

Es realmente un voltaje de toque de una persona ubicada lejos (remota) de la subestación, en el caso de que exista una falla se eleva el voltaje y la persona quedaría expuesta al valor total de la elevación de voltaje de tierra en caso de falla.

Voltaje de toque metal – metal

Es la diferencia de voltaje entre dos superficies metálicas, cuando sean puenteadas por el cuerpo humano ya sea pie-pie o mano-pie. Por experiencia en las subestaciones el voltaje más crítico es el de mano-pie.

Voltaje de toque durante fallas a tierra

El voltaje de toque se produce cuando una persona está en contacto con una estructura conectada a tierra, la cual se encuentra a un potencial diferente al punto sobre el suelo en el que se encuentra una persona. En este caso la persona estará expuesta a un voltaje llamado voltaje de toque. En la Figura 14 se aprecia la exposición a un voltaje de toque.

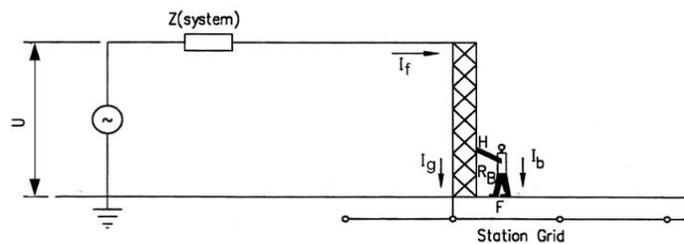


Figura 14. Exposición a un voltaje de toque

La Figura 14 muestra que la corriente de falla I_f , se descarga hacia el suelo a través del sistema de puesta a tierra de la subestación y a través de la persona tocando la estructura metálica aterrizada en el punto H. El punto H, es un punto que está al mismo nivel de potencial que la red por la cual circula la corriente de falla; y el punto F, es la pequeña área en la superficie de la tierra que está en contacto con los dos pies de la persona.

Voltaje de paso durante fallas a tierra

Se produce cuando una persona camina sobre un área cualquiera, experimenta un voltaje entre sus pies en el momento de una falla, se lo conoce como “voltaje de paso”, cuando se mide esta diferencia de potencial a 1 metro entre pie y pie [31].

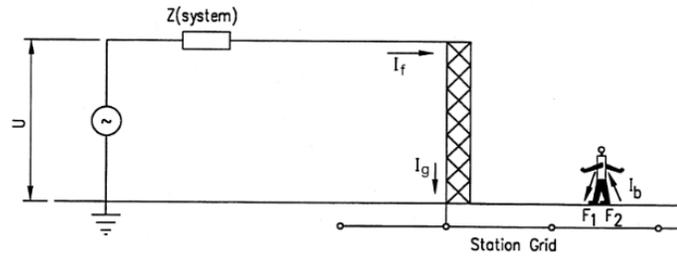


Figura 15. Exposición a un voltaje de paso

La Figura 15 muestra que la corriente de falla I_f , se descarga hacia el suelo a través del sistema de puesta a tierra de la subestación. La corriente I_b circula desde un pie F1 a través del cuerpo de la persona hasta el otro pie F2. Los puntos F1 y F2 son las áreas de la superficie de la tierra que están en contacto con cada uno de los pies de la persona.

Voltaje inducido debido a fallas a tierra

El espacio entre las fases y el conductor de puesta a tierra también puede causar otro problema. El flujo magnético, que se genera cuando la corriente de falla a tierra fluye a través del sistema puede inducir voltajes en cualquier conductor en bucle cercano con el que tenga un acoplamiento. No es necesario que este lazo esté en contacto físico con los conductores eléctricos. La Figura 16 muestra esta condición.

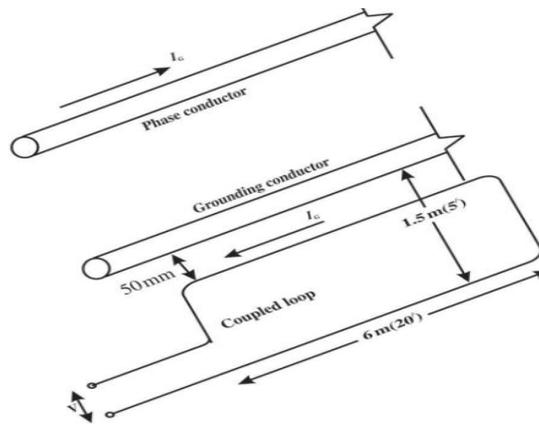


Figura 16. Ejemplo de un voltaje inducido por falla a tierra

En los casos en que las corrientes de falla a tierra altas sean del orden de 50 kA (típicamente subestaciones del tipo con conexión a tierra sólida), el potencial peligroso puede aparecer a través de los extremos abiertos del lazo y representar peligro eléctrico.

Valores máximos admisibles de voltaje de paso y contacto

Según la IEEE 80-2013, la seguridad de una persona depende de evitar que se absorba la cantidad crítica de energía de choque antes de que se elimine la falla y se desenergice el sistema. El voltaje máximo de conducción de cualquier circuito accidental no debe exceder los límites definidos a continuación. Para tensión de paso el límite es:

$$E_{paso50kg} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ para un peso corporal de 110 lb} \quad \text{Ec. 1.3}$$

$$E_{paso70kg} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ para un peso corporal de 155 lb} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Simultáneamente para los voltajes de toque permisibles son:

$$E_{toque50kg} = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ para un peso corporal de 110 lb} \quad \text{Ec. 1.5}$$

$$E_{toque70kg} = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ para un peso corporal de 155 lb} \quad \text{Ec. 1.6}$$

1.2.4.8. Sistema de puesta a tierra para alta frecuencia

El sistema de puesta a tierra para altas frecuencias se refiere a la protección de tierra ante fenómenos como una descarga atmosférica, la cual es tan veloz, que realmente se asemeja una onda de muy alta frecuencia.

Un sistema de tierra para un pararrayo tipo Franklin, deberá estar unida a la tierra de baja frecuencia construida para los sistemas eléctricos. El objetivo principal es disponer de un solo sistema equipotencial.

1.2.5. Diseño y análisis de los sistemas de puesta a tierra con métodos numéricos

Entre las variables que influyen en el diseño de un STP se analizó la resistividad del suelo y la geometría de la malla, que determinan parámetros críticos que deben ser controlado, entre los cuales se encuentran: la corriente límite tolerable por el cuerpo,

los voltajes de seguridad, el máximo potencial eléctrico de un electrodo de puesta a tierra con respecto a un punto de tierra lejano (GPR), el voltaje de malla, voltaje de paso, voltaje de toque, voltaje transferido.

En el análisis de los STP es importante determinar la distribución de potencial en las regiones de este, para lo que se puede utilizar métodos analíticos basados generalmente en la norma IEEE 80-2013 y los métodos numéricos. Dentro de los métodos numéricos se encuentra el de elementos finitos (FEM, finite element method por sus siglas en inglés). Aplicando el método FEM se logra resolver sistemas electromagnéticos complejos de modo gráfico, donde la solución obtenida es una distribución gráfica de los potenciales; este método es apto para resolver potenciales en los SPT.

1.2.5.1. Método de elementos finitos (FEM)

El método de elementos finitos (FEM) es una técnica numérica para encontrar soluciones aproximadas al problema del valor límite. Al usar FEM para modelar el sistema de rejilla de puesta a tierra, se suelen hacer dos suposiciones: la resistencia es un parámetro que no depende de la corriente en la red excepto en casos de frecuencia que va de 50 Hz a 60 Hz y que la región es una superficie plana infinita. La Figura 17 da una ilustración FEM en el modelado sistema de rejilla de puesta a tierra, donde d_1 es la distancia de la rejilla al punto final del modelo semiesférico, d_2 es la distancia de la rejilla a los puntos donde el potencial eléctrico tiende a cero, R_1 es la resistencia en el interior la superficie semiesférica y R_2 es la resistencia fuera de la superficie semiesférica [32].

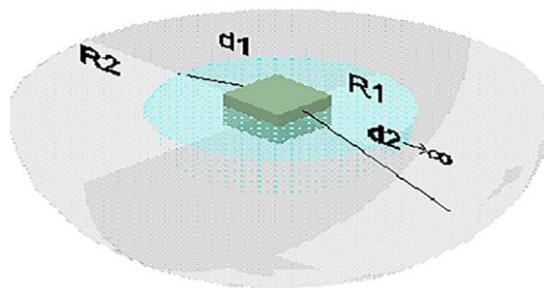


Figura 17. Diagrama del método de elemento finito

Estimación de voltajes de paso y de toque usando FEM

El potencial en la red de puesta a tierra (U_g) y el potencial en el límite (U_b) se puede evaluar a partir de la resistencia de tierra y de la corriente máxima de falla de la siguiente manera:

$$U_g = R_G \times I_G \quad \text{Ec. 1.7}$$

$$U_b = R_2 \times I_G \quad \text{Ec. 1.8}$$

donde I_G es la corriente de falla máxima en kA y se puede determinar usando el método de la guía IEEE 80 -2013.

Una vez que se conocen las distribuciones potenciales reales en el suelo, El voltaje de contacto y paso usando FEM se puede obtener directamente midiendo los potenciales en los nodos y tomando en cuenta de qué nodo lleva el mayor potencial de toque y paso. De ahí los voltajes de paso y contacto usando FEM se pueden obtener como:

$$V_{touch}(FEM) = \max(U_g) \quad \text{Ec. 1.9}$$

$$V_{step}(FEM) = \max(U_b) \quad \text{Ec. 1.10}$$

1.2.6. Descargas atmosféricas y su efecto en los sistemas eléctricos

1.2.6.1. Base conceptual del fenómeno de las descargas atmosféricas

Descarga atmosférica y su origen

Los rayos o descargas atmosféricas producen sobretensiones transitorias, resultado de la transmisión de la carga eléctrica almacenada en la nube a otra nube o a tierra, se caracteriza por ser de alta frecuencia, provocando que su onda circule por los conductores y estructuras conductivas de una instalación acarreado problemas térmicos, sobretensiones conducidas e inducidas y finalmente la elevación del potencial de la tierra producto de la circulación del rayo en el suelo.

Según estudios realizados estas descargas atmosféricas pueden generar transitorios de corriente y de tensión elevados con picos de intensidad hasta de 200 kA, los cuales dependerán del factor tiempo, ya que, toda la energía se disipa en microsegundos.

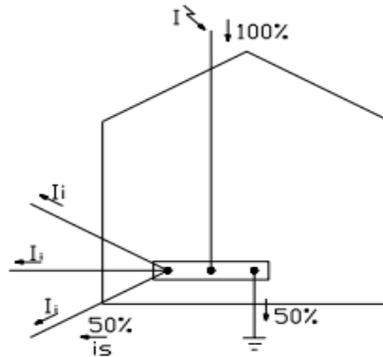


Figura 18. Diagrama de disipación de energía de una descarga atmosférica

Como se aprecia en la Figura 18, generalmente el 50% de la potencia de un rayo se disipa en el suelo, mientras que el restante es disipado en otros sistemas como son el sistema eléctrico, la estructura metálica y los sistemas de comunicaciones [33]

Forma de onda de un rayo

El flujo de carga crea una forma de onda de corriente de frente abrupto que dura varias decenas de microsegundos. El flujo suele ser de cargas negativas, aunque a veces también puede haber flujo de cargas positivas. aunque a veces también puede haber flujo de cargas positivas. Estas últimas suelen ser de menor magnitud.

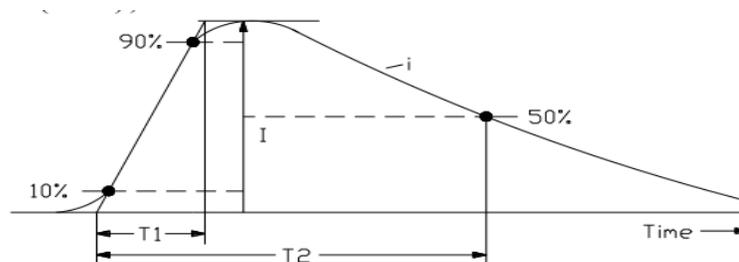


Figura 19. Forma de onda de la corriente de un rayo [33]

La Figura 19 muestra una forma de onda típica de un rayo según la norma IEC 61312-1, la forma de onda de la descarga en la cual T1 es el tiempo constante del frente de

subida de la onda, mientras que T2 es el tiempo constante de la cola. T2 se considera que abarca el 50% del pico de corriente. La relación de corriente a el tiempo se llama pendiente con su valor de (di/dt) y su unidad kA/us.

Nivel cerámico

Los niveles isoceraunicos se determinan por el número medio anual de días u horas de una tormenta en un sitio establecido. El nivel isoceraunico es el número promedio de días de tormenta eléctrica en un año. Se lo puede determinar a través de los servicios meteorológicos y también a través de soluciones modernas como es la base de datos de la Nasa LIS 0.1 (Lightning Imaging Sensor, por sus siglas en inglés) la cual es una poderosa base de datos con la recopilación de datos de climatología de relámpagos de muy alta resolución[34]

Sin embargo, en Ecuador el análisis de descargas atmosféricas ha sido excluido de planes de monitoreo digital, por parte de la principal entidad encargada del clima en nuestro país, INAMHI. A su vez estudios independientes han elaborado mapas de nivel cerámico y de densidad de descargas atmosféricas, en la Figura 20 se colocó como delimitación el área de prestación del servicio de la E.E. Quito.

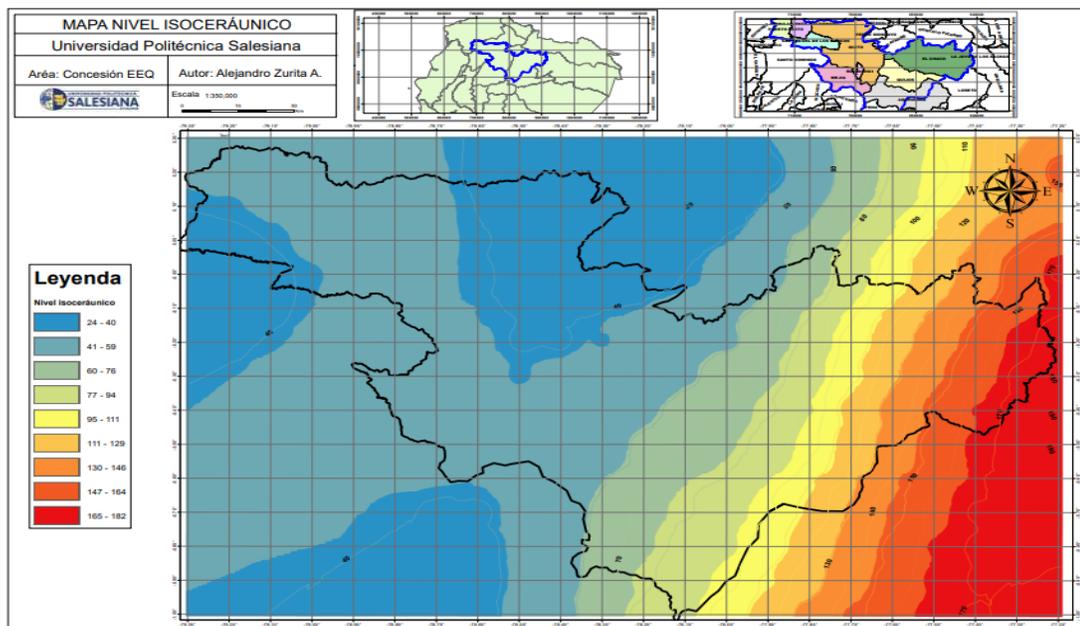


Figura 20. Mapa de nivel Cerámico en área de prestación de EEQ [35]

1.2.6.2. Marco Normativo de protección contra rayos

Acerca del marco normativo para protección contra sobrevoltajes transitorios de descargas atmosféricas, existen organismos nacionales como internacionales que determinan normas y recomendaciones para prevenir y proteger su incidencia.

- Estándar normativo internacional

A nivel europeo e internacional, la comisión Internacional de Electrotecnia (IEC), por medio de su Comité Técnico TC81 (Protección contra rayos), entregó su trabajo en cuatro partes IEC 62305-1 a 62305-4 [36]

La norma americana NFPA 780, es el estándar para la instalación de sistemas de protección contra rayos, se refiere exclusivamente a la forma de aplicación de protección de edificaciones, frente a la caída de un rayo, aplicado para los Estados Unidos de Norteamérica (USA).

- Estándar normativo local

En Ecuador no se cuenta con una normativa aplicada, más sin embargo al ser un aplicante de los normativos norteamericanos, prácticamente la normativa americana tiende a ser un referente para el diseño de protecciones contra descargas atmosféricas acompañado de puntos importantes tomados del estándar IEC 62305.

- Análisis de otras normativas aplicables

AS 1768: 1991 Norma australiana sobre protección contra el rayo

IEEE 142: 1991 Libro verde del IEEE (Capítulo 3).

1.2.6.3. Sobretensiones por descargas atmosféricas

Las sobretensiones producto de descargas atmosféricas pueden propagarse de 2 modos diferentes: el común o asimétrico y el diferencial o simétrico.

- Sobretensión transitoria en modo común o asimétrico: La perturbación se produce entre un conductor activo y el de tierra (fase/tierra o neutro/tierra). Este tipo de

sobretensiones es peligroso para los receptores en los que la masa está conectada a la tierra, debido a los riesgos de ruptura de la rigidez dieléctrica de los materiales.

- Sobretensión transitoria en modo diferencial o simétrico: La perturbación se da entre conductores activos (fase/neutro, fase/fase). Este tipo de sobretensiones son particularmente peligrosas para los receptores electrónicos.

1.2.7. Norma IEC-62305 protección contra descargas atmosféricas

La norma IEC 62305, la cual es la mayormente aplicada en Europa y alrededor de la mayoría de países del mundo, trata sobre el tema de Protección Contra Rayos. El contenido de la misma trata sobre los diseños y pasos a seguir para proteger la vida del humano contra descargas atmosféricas, a través de la seguridad de los edificios o áreas de trabajo. La norma se compone de 4 partes:

1. 62305-1: Principios 2 generales
2. 62305-2: Manejo de riesgos.
3. 62305-3: Análisis de daño físico a las estructuras y riesgo humano.
4. 62305-4: Protección de sistemas eléctricos y electrónicos

En el diagrama de la Figura 21 , se aprecia la conexión de sus partes.

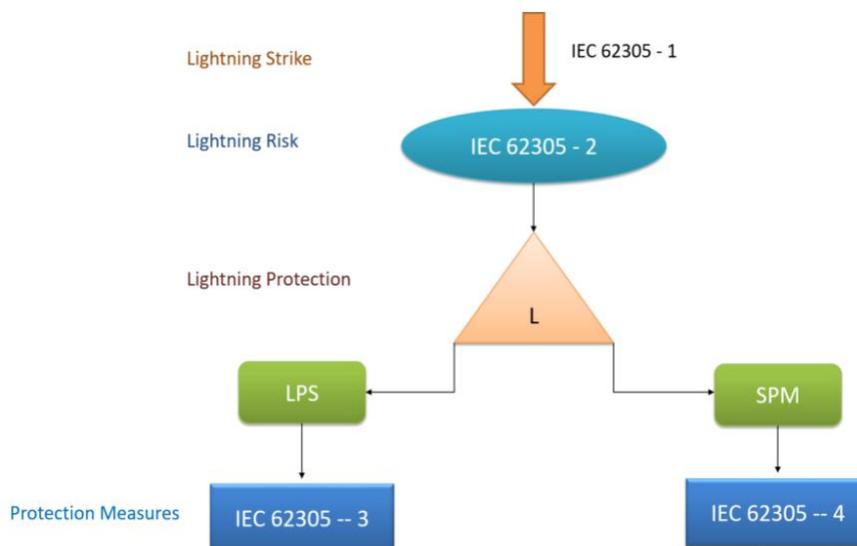


Figura 21. Conexión entre las partes de la norma IEC 62305

1.2.7.1. Niveles de protección, Norma IEC 62305-3

Los niveles de protección contra rayos (NPR, por sus siglas) permiten el diseño de medidas de protección contra descargas eléctricas atmosféricas de acuerdo con el conjunto de parámetros de la corriente de rayo.

Para cada NPR se genera un sistema fijo de parámetros máximos y mínimos de corriente de rayo como se muestran en la Tabla 4 [37]. Un sistema de protección contra rayos que cumpla con la normatividad existente, la cual establece como primer paso realizar un análisis de riesgo, definir un NPR (Nivel I, II, III, IV).

Tabla 4. Valores máximos de parámetros del rayo de acuerdo con el NPR [37]

Primera descarga corta			NPR			
Parámetro	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Corriente pico	I	KA	200	150	100	
Carga corta	Q_{corta}	C	100	75	50	
Energía específica	W/R	kJ/Ω	10 000	5 625	2 500	
Descarga corta subsecuente			NPR			
Parámetro	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Corriente pico	I	KA	54	40,5	27	
Pendiente Promedio	di/dt	kA/μs	120	90	60	
Parámetros de tiempo	T_1/T_2	μs/μs	0,4/50			
Descarga larga			NPR			
Parámetro	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Carga larga	Q_{larga}	C	100	75	50	
Parámetro de tiempo	T_{larga}	s	0,5			
Rayo			NPR			
Parámetro	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Carga	Q_{rayo}	C	300	225	150	

1.2.8. Equipamiento de un sistema de protección contra descargas atmosféricas

Las funciones de protección de protección externa se encargan de recibir, conducir y dispersar en el terreno la corriente del rayo de manera fiable y segura, sus medidas que componen este tipo la comprenden las siguientes partes; instalación captadora, instalación derivadora, instalación de la puesta a tierra, distancia de separación.

1.2.8.1. La instalación captadora.

Su función. - impedir las descargas directas de rayo en el área a proteger.

Sus elementos. - todos los elementos o partes metálicas descubiertas o desnuda sobre las que el rayo puede impactar.

Su instalación. - mediante puntas franklin o jaulas de Faraday por encima o al lado de la edificación que debe ser protegida.

1.2.8.2. La instalación derivadora

Su función. - unir eléctricamente la instalación captadora y el sistema de puesta a tierra.

Sus elementos. - conductores de cobre instalados intencionalmente o mediante elementos naturales de la estructura (p.ej. columnas de hormigón armado, paneles de hormigón prefabricado, estructuras metálicas de acero)

Su instalación. - mediante bajantes paralelas repartidas adecuadamente cuya longitud hacia el SPT sea lo mínima posible (recto, sin bucles)

1.2.8.3. La puesta a tierra de sistema de protección contra rayos

Su función. - realizar la compensación de potencial entre los derivadores y, por otro, realizar un control del potencial en las proximidades de las paredes del edificio.

Sus elementos. – Electrodo de puesta a tierra y conductor de sobre tipo malla enterrado

Su instalación. - Se cuenta con dos disposiciones del Tipo A y tipo B. La disposición de las tomas de tierra tipo A describe electrodos en forma de líneas individuales dispuestas horizontalmente (tomas de tierra superficiales) o verticalmente (tomas de tierra de profundidad) que, en cada caso, deben conectarse con un derivador.

1.2.9. Métodos de protección contra descargas atmosféricas

El método de protección aérea tiene que ver con un método electrogeométrico del tipo analítico para probar el apantallamiento de una estructura y prevenir que el impacto del rayo sea directamente en la estructura que comprende tres tipos que son el método de la esfera rodante, el método del ángulo de protección y el método del enmallado.

1.2.9.1. Método de la esfera rodante

Consiste en diseñar la protección mediante el radio de una esfera que se hace rodar bajo las puntas Franklin. Tiene el mismo criterio que la norma NFPA780, pero con mayor explicación. En la norma IEC- 62305-3, se dispone de la teoría y las reglas a seguir para este tipo de protección. Se define 4 niveles, con lo cual el diseño se debe ajustar al nivel que deseamos proteger, así pues, el nivel más exigente es el uno y así sucesivamente hasta llegar al IV, en la Tabla 5, se aprecia los valores de la esfera rodante para cada nivel de protección.

Tabla 5. Valores máximos de radio de la esfera rodante y del tamaño de la malla

Clase de SPCR	Radio de la esfera rodante r(m)	Tamaño de la malla (m)
I	20	5x5
II	30	10x10
III	45	15x15
IV	60	20x20

1.2.9.2. Método del ángulo de protección

Al disponer de mástiles, o puntas, se toma el criterio que el área de protección estará bajo un cono de determinado ángulo, para ubicar la clase de protección. Este es el método más adecuado para edificios con formas simples, aunque está limitado a una altura máxima según el nivel de protección aplicado.

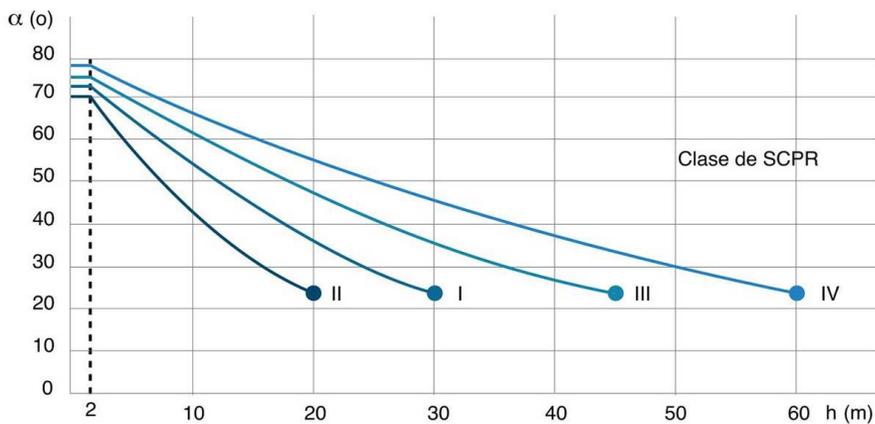


Figura 22. Ángulos de protección (α) correspondientes a las clases de los SPCR

1.2.9.3. Método del enmallado

Básicamente se forma sistemas cuadrados en forma de malla, con conductor normalmente de cobre, formando una jaula tipo Faraday. Como se aprecia en la Figura 23, los valores formados por la malla se toman de la clase de protección que se desee.

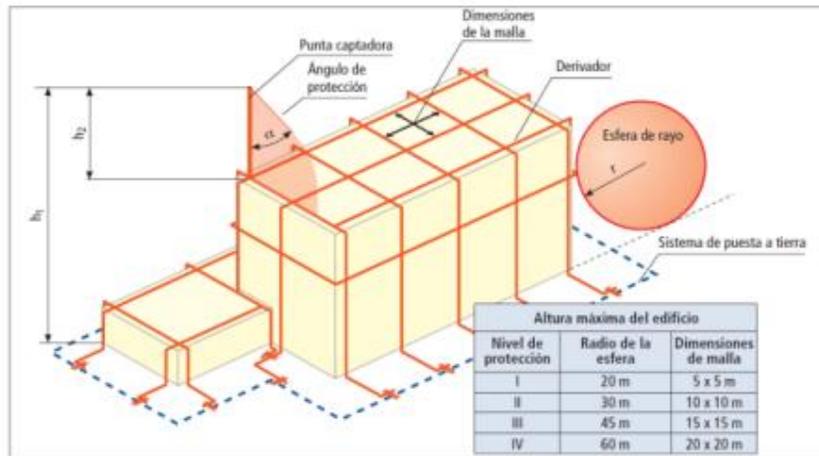


Figura 23. Método del enmallado tipo Jaula de Faraday

1.2.10. Descargadores de sobretensiones (DPS)

Las especificaciones necesarias de los dispositivos de protección o descargadores (DPS) que se requieren en una instalación de un sistema de protección contra rayos y sobretensiones en el marco del concepto de zonas de protección contra rayos se recogen de la normativa IEC 60.364-5-53/A2 y su clasificación, Tipo 1, 2 y 3, en función de las exigencias de carga y lugar de instalación.

Tabla 6. Requisitos de los DPS dependiendo de las zonas de protección

Tipo/Denominación	Norma	E DIN VDE 0675-6 con A1, A2 ... etc (Ya retirada)	IEC 61643-1: 2005	EN 61643-11: 2002
Descargador de corriente de rayo – Descargador Combinado		Descargador de clase de exigencias B	DPS clase I	DPS Tipo 1
Descargador de sobretensiones para cuadros de distribución, sub distribuciones, instalación fija		Descargador de clase de exigencias C	DPS clase II	DPS Tipo 2
Descargador de sobretensiones para tomas de enchufe/ Equipo final		Descargador de clase de exigencias D	DPS clase III	DPS Tipo 3

1.2.10.1. Protección escalonada de los DPS

La protección de las líneas de energía de baja tensión consiste, básicamente, en disponer una protección escalonada con dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) como se muestra en la Figura 24.

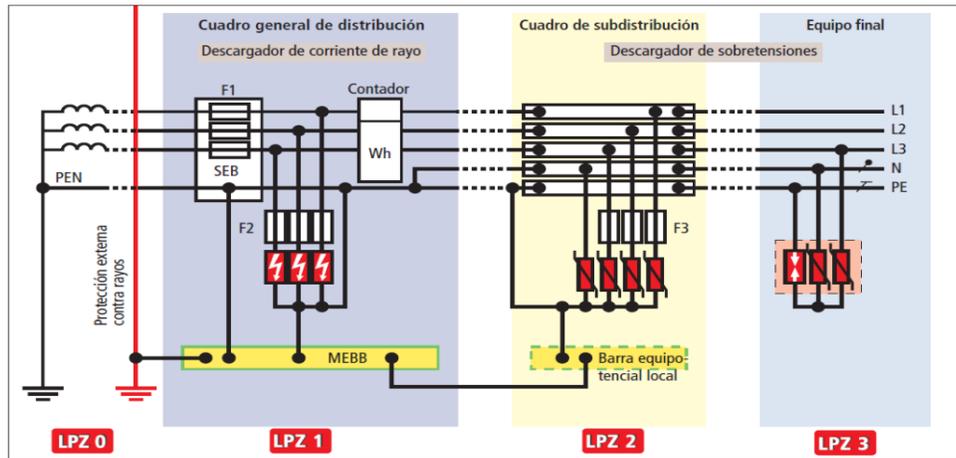


Figura 24. Diagrama de localización y clasificación de los DPS

DPS Tipo 1. – Entrega las máximas prestaciones en términos de derivación. Se instalan como primer escalón de protección, en la intersección de la zona de protección contra rayos (ZPR) 0A a 1 y superiores, como efecto “rompeolas” capaces de derivar varias veces, sin destruirse corrientes de rayo de la forma de onda 10/350 μ s.

DPS Tipo 2. – Es el segundo escalón de protección, en la intersección de la zona de protección contra rayos (ZPR) 1 a 2 y superiores. Está destinado a la protección frente a sobretensiones (originadas por descargas de rayo indirectas, conmutaciones en alta, acoplamiento inductivos). Su capacidad de derivación es de algunas decenas de kA con la forma de onda 8/20 μ s. Su principal ubicación son cuadros de distribución.

DPS Tipo 3. – Se ubican en la intersección de la zona de protección contra rayos (ZPR) 2 a 3, su función es aportar una protección específica a los equipos finales entre los conductores L-N en el sistema eléctricos principalmente por procesos de conmutación.

1.3.Fundamentación metodológica

La presente investigación es descriptiva, la cual especifica el rendimiento del sistema de puesta a tierra de la planta minera en base a determinadas características e información medida y calculada. En base a ello se interpreta la influencia de los parámetros variables que afectan el sistema de puesta a tierra y el apantallamiento de la planta. Con los resultados de la investigación se describen las alternativas de solución y mitigación de los riesgos a los problemas encontrados.

El diseño de la propuesta es del tipo aplicada experimental, en la cual se basa en mediciones y análisis de los esquemas eléctricos de la planta minera para en base a simulaciones computacionales determinar los parámetros del sistema de puesta a tierra que cumplen y los que no cumple con los requisitos mínimos de la normativa, en nuestro caso la IEEE 80-2000, la IEC 62305 y la NFPA 780.

De las técnicas e instrumentos se realiza el uso de software computacional para la simulación de la red eléctrica de la planta minera, basados en el los paquetes de análisis de transientes y evaluación del sistema y parámetros de puesta a tierra de ETAP.

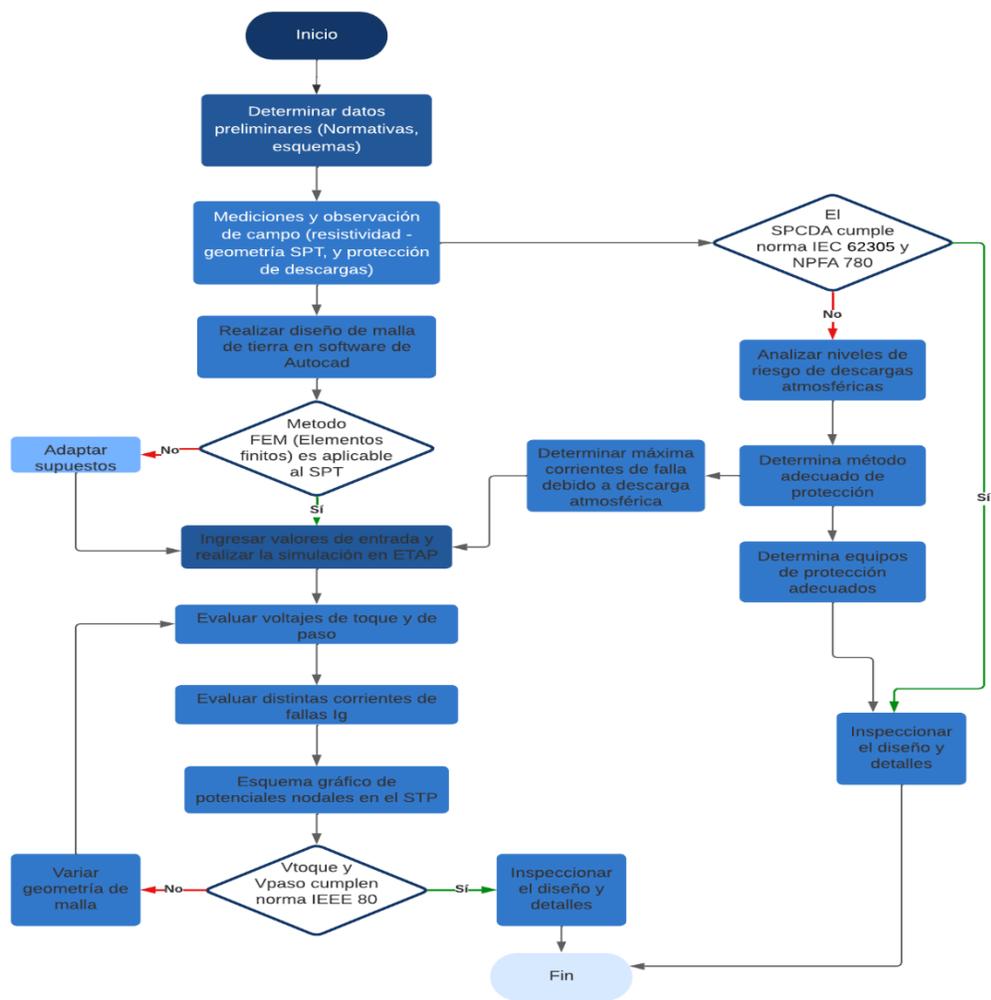


Figura 25. Diagrama de Flujo del Proceso de Investigación

1.3.1. Métodos de investigación

1.3.1.1. Método Inductivo

Se emplea el método inductivo para determinar el estado actual del sistema de puesta a tierra y el funcionamiento de las protecciones ante fallas eléctricas, perturbaciones y descargas atmosféricas de la planta minera. En base al método determinamos los puntos de la red eléctrica donde es necesario repotenciar con equipos de protecciones.

1.3.1.2. Método Deductivo

Se emplea el método deductivo para interpretar el conjunto de datos obtenidos de las mediciones en campo de la resistividad y resistencia del terreno, así como extraer las

conclusiones de las simulaciones en cuanto a voltajes de paso, de toque y de elevación de los límites de potenciales ante cada uno de las perturbaciones y fallas sometidas en la red eléctrica de la planta minera. Con el método se permite determinar el mejor método de apantallamiento eléctrico que requiere ser implementado y puesto a prueba.

1.3.1.3. Método Analítico

Se emplea toda la fundamentación teórica y recomendaciones expuestas en las normativas de puesta a tierra y de sistema de protección atmosféricas a fin de cumplir con los procedimientos de medición y validación de los datos obtenidos. El uso de formulaciones matemáticas y la interpretación de modelos matemáticos que emplean el software ETAP permiten validar los datos obtenidos.

1.3.1.4. Método Sintético

Se emplea el método sintético para determinar las correcciones específicas que requieren ser implementadas en la planta minera a fin de cumplir con la normativa y los requerimientos mínimos de protección. En esta parte se proporciona detalles de los equipos y se precisa hacia que problema se soluciona con cada una de las propuestas.

1.3.2. Tipos de investigación

1.3.2.1. Investigación Bibliográfica

Mediante el tipo de investigación bibliográfica, se consigue información de los esquemas eléctricos de conexiones y disposición de la planta minera. Se analiza y recopila información de las revistas indexadas referentes a los sistemas de puesta a tierra y protecciones atmosféricas. Se recopila toda la información referente a guías y estándares principalmente de las normativas de la IEEE, IEC, NFA, INEN y NEC.

1.3.2.2. Investigación Descriptiva

En este tipo de investigación se plantea realizar la descripción y análisis de los problemas que afectan a la red eléctrica de la planta minera en torno a las fallas y perturbaciones en su sistema de puesta a tierra. Se describe de manera secuencial el

procedimiento para el levantar la información de campo como son las resistividades, geometrías de la malla, normas, tablas, datasheets, protocolos, diseños de implementación, para ser analizados frente a valores reales y simulados.

1.3.3. Técnicas e instrumentos de la investigación

1.3.3.1. Análisis documental

Se realiza la revisión de toda la información relacionada al sistema de puesta a tierra y apantallamientos. Se usa el paquete informático Mendeley el cual brinda la facilidad de clasificar en categorías a todos los documentos digitales.

1.3.3.2. Medición de campo

Se adquiere una gran cantidad de datos entre los cuales se tiene las resistividades del suelo, geometrías de las mallas, calibres de conductores de protección. Los instrumentos usados son los equipos de medición eléctrica como son medidores telurómetros, analizador de red, calibrador y flexómetros.

1.3.3.3. Simulación

La técnica de la simulación permite ejecutar el modelo computarizado de sistema de puesta a tierra que incorpora el instrumento del software ETAP, para conducir una gran cantidad de experimentos basados cambios a las variables en entrada. Con esta técnica entendemos el comportamiento del sistema y analizamos de manera gráfica los valores de sobrevoltajes, potenciales máximos y mínimos que entrega el sistema modelado.

1.3.4. Conclusiones del capítulo I

En el apartado de fundamentación teórica se realizó el análisis en torno a los trabajos de investigación afines a la propuesta, se analizó diferentes estudios en cuanto al diseño, rendimiento y evaluación de los sistemas de puestas a tierra en plantas industriales y subestaciones eléctricas. Los trabajos en su mayoría toman en cuenta como referencia el uso de la norma IEEE 80 para comparar y establecer los valores límites a los potenciales generados en las mallas de tierra. Del mismo modo se

plantearon los escenarios de simulación en distintos softwares donde se evaluaron los alcances y tiempos de respuesta computacionales.

Con respecto a los sistemas de protección ante descargas atmosféricas los trabajos analizados toman en cuenta de manera principal a la norma IEC 62305 y la NPFA 780 para establecer los diseños de apantallamiento y protección contra descargas atmosféricas. Se esbozó acerca de las características del equipamiento de protección y determinó como se aplica la estimación del riesgo de descargas eléctricas.

En la fundamentación metodológica se determinó el tipo de investigación y la metodología, en donde se describe el diseño de la investigación a realizar del tipo aplicada – experimental, realizando de primera parte mediciones de campo y análisis de información documental para determinar la resistividad y geometría del sistema de puesta a tierra; posteriormente se usa la técnica de la simulación a través del software ETAP, las mismas que permiten encontrar los valores que determinan el rendimiento del actual sistema de puesta a tierra. Con los resultados obtenidos se procede a interpretarlos para determinar las posibles soluciones para generar la propuesta de rediseño o repotenciación de los sistemas de protección. En cuanto al sistema de protección contra descargas atmosféricas, se plantea un análisis del riesgo de descargas eléctricas en la planta y se realiza un modelamiento de la localización de los puntos de captación y derivación del sistema de protección.

CAPITULO II. PROPUESTA

2.1 Título

Análisis del sistema de protección de puesta a tierra actual y diseño del sistema de apantallamiento para protección ante descargas atmosféricas de la planta minera de flotación de la Compañía Agroindustrial El Corazón.

2.2. Objetivos

Realizar un análisis del rendimiento del sistema actual de protección de puesta a tierra de la planta minera y considerando la necesidad de incorporar un sistema de apantallamiento para la protección ante descargas atmosféricas en la planta minera de la Compañía Agroindustrial El Corazón.

2.3. Descripción de la propuesta

Se plantea un análisis integral al sistema actual de puesta a tierra de la nueva planta de producción de la empresa minera. Como punto de partida se propone recopilar información de la construcción de la malla de tierra existente, así como realizar el estudio de la resistividad del terreno. Posteriormente se realiza el diseño de la malla en AutoCAD para ingresar los valores al software ETAP en el cual se realiza una simulación empleando los modelos del método de elementos finitos. Se analiza los resultados de las condiciones actuales comparando con los valores requeridos en la norma IEEE-80-2013 [31]; posteriormente se establece las propuestas de mejora a la malla de tierra y se simula con las variaciones al sistema.

Como parte complementaria se diseña el sistema de apantallamiento de la planta, se inicia con un análisis de riesgos de ocurrencia de descargas atmosféricas para proceder con el diseño de los elementos de protección empleando el método de las esferas Rodantes. Como la planta minera no posee un sistema de apantallamiento este estudio servirá para su posterior implementación por parte de la empresa. Finalmente se analizará y discutirá todas las mejoras propuestas para establecer y concluir con las recomendaciones para los futuros trabajos que tenga que realizar la empresa.

2.4. Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados

2.4.1. Descripción de la planta minera

La Compañía minera en donde se ubica la planta de producción en estudio se encuentra en la Provincia de Imbabura, Cantón Cotacachi, Parroquia de García Moreno, comunidad “El Corazón”, a 60Km al Noroeste de la ciudad de Quito.

Se cuenta con dos plantas de producción de minerales. La primera es la planta de producción de minerales a través de procesos de cianuración y lixiviación, cuenta con una potencia instalada de 850 KVA; mientras que la segunda planta llamada de flotación es de producción de minerales a través de procesos de tratamiento de relaves, la cual cuenta con una potencia de 1 MVA. Las plantas se encuentran separadas una distancia de 300 metros. Ambas se conectan al sistema de distribución de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ), mediante el Alimentador Primario “A” perteneciente a la Subestación Los Bancos con un nivel de voltaje de 13.8 KV [38].



Figura 26. Localización geográfica de la planta minera en Geo portal EEQ

La disposición física de la infraestructura de la planta de flotación se muestra en la Figura 27 en la cual se realizará el estudio del sistema de puesta a tierra y el diseño del apantallamiento.

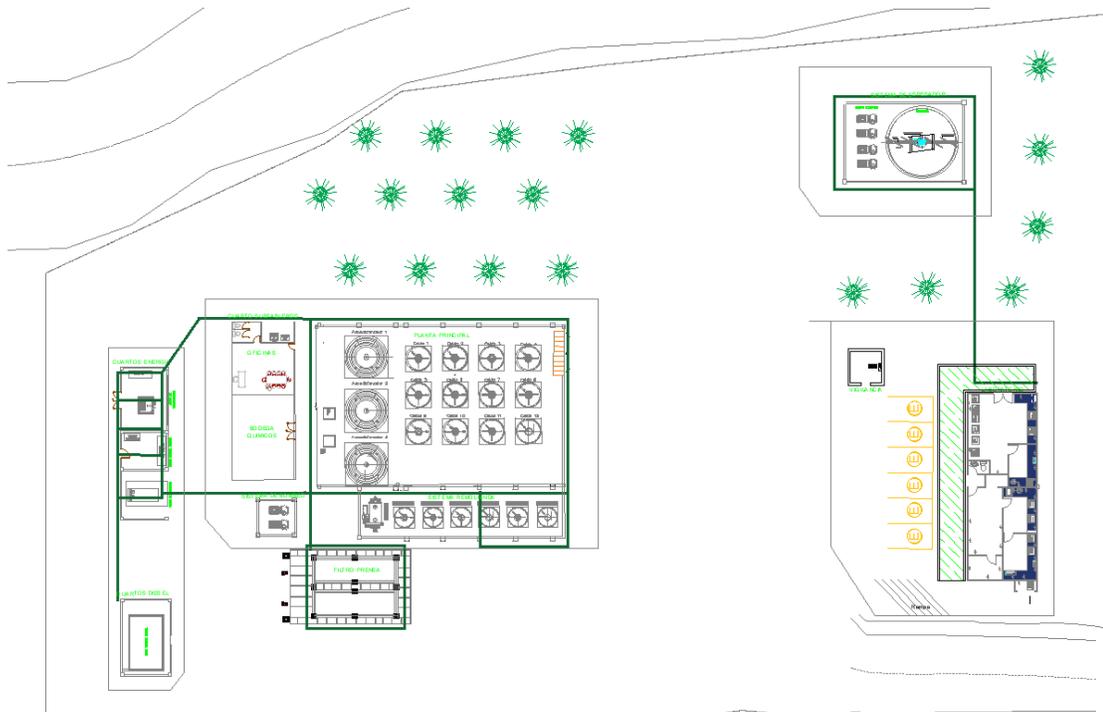


Figura 27. Disposición física de planta de flotación AIC

2.4.2. Información eléctrica de la planta de flotación

La planta está conformada por una cámara de transformación compuesta por celdas de media tensión y un transformador de potencia de 1 MVA. A su vez se dispone también de un grupo electrógeno que sirve como sistema de generación de emergencia con una potencia de 950 KVA. Las especificaciones técnicas de los equipos se detallan en las Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9.

Tabla 7. Especificaciones de transformador de media potencia

Parámetro	Especificación
Marca	INATRA
Modelo	Convencional
Potencia	1000 KVA
Voltajes nominales	22800-13200/440V
Grupo Conexión	Dyn5
Impedancia cortocircuito	7.2%

Tabla 8. Especificaciones de celda de media tensión

Parámetro	Especificación
Marca	TEAN
Tipo	SYStem-6 IPR
Voltaje nominal	24 KV
Corriente	630A
Impulso de Rayo Nominal en Voltaje soportado (valor de pico)	125 KV
Frecuencia	60 Hz

Tabla 9. Especificaciones de grupo electrógeno de emergencia

Parámetro	Especificación
Marca	DOOSAN
Modelo	YN-935DS
Potencia	935 KVA STAND BY
Voltajes nominales	440 V

Acerca de la red de distribución que alimenta a la planta, es a través del alimentador “A” de la S/E Los Bancos cuyos parámetros son detallados en la Tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones de alimentador EEQ

Parámetro	Especificación	Unidad
Voltaje nominal	13.2 KV	KV
Longitud	36	Km
Conductor	3 x 4/0 Al - ACSR	AWG

El esquema inicial del diagrama unifilar de la planta (Anexo 1) fue entregado por el Área de Mantenimiento eléctrico de la empresa, para posteriormente ser actualizado e interpretado por los autores en base a información de campo obtenida a partir de inspecciones visuales y recolección de archivos e información bibliográfica.

De los parámetros eléctricos del alimentador hacia la planta que ha entregado al EEQ se tiene la potencia de cortocircuito. El valor de corto circuito proporcionado por los técnicos de EEQ Los Bancos es de 12,5 kA, con una relación X/R de 10.

Cálculo de la corriente de cortocircuito en baja tensión

Uno de los datos importantes para el análisis de SPT es la corriente de cortocircuito en baja tensión a frecuencia industrial. Para lo cual se usa mediante los valores característicos del transformador.

Usando la fórmula:

$$I_{cc} = \frac{S * 100}{\sqrt{3} * V * \%Z} \quad \text{Ec. 2.1}$$
$$I_{cc} = \frac{1000 * 100}{\sqrt{3} * 440 * 7.2}$$
$$I_{cc} = 18.2 \text{ KA}$$

2.4.3. Estado actual del sistema de puesta a tierra

El actual sistema de la planta de flotación, consta de tres mallas de tierra construidas en tres espacios de tiempo. La primera malla fue construida para el centro de energía que cumple la función de malla de servicio y de protección, sobre ella se incorpora la cámara de transformación, el centro de control de motores y el cuarto del grupo electrógeno. La segunda malla fue construida para aterrizar la estructura del galpón de la planta y la tercera malla para el aterrizamiento y protección de un tanque espesador de material de relave. En la Figura 28, se puede observar la geometría de los SPT, y la disposición física de los conductores y electrodos a lo largo de la planta.

Los conductores son de cobre desnudo del calibre 2/0 AWG, equivalente a 67.4 mm², mientras que las varillas propuestas son de acero recubierto de cobre, de 5/8", equivalente a 1.6 mm y 2.4 metros de largo. En el plano en AutoCAD se indican las distancias propuestas entre electrodos, entre uniones de conductores y la longitud de cada sección de conductor.

Se señala también que de acuerdo a información proporcionada por el Área de Mantenimiento Eléctrico, las tierras del centro de energía junto con la estructura de la planta están unidas equipotencialmente con conductor de cobre calibre 2 AWG,

mientras que la tercera malla está separada una distancia de 36 metros y es independiente a las demás.

2.4.3.1. Descripción de los sistemas de puesta de tierra actuales

SPT 1. – Corresponde a la malla 1, tierra de servicio para el aterrizamiento de los neutros y la tierra de protección para disipar corrientes de falla de equipos. Se encuentra sobre el centro de energía. Su geometría es del tipo no uniforme y está conformada por los elementos de la Tabla 11. De la malla se extiende una toma de tierra para el tanque y el surtidor de combustible. Esto se tiene para cumplir con la norma que en presencia de vapores inflamables o combustibles todo elemento metálico tiene que estar puesto a tierra.

SPT 2. – Corresponde a la malla 2 de la estructura del galón. Su función es de protección de la estructura ante descargas atmosféricas y también para drenar la corriente estática. Su geometría es del tipo rectangular no uniforme y está conformada por los elementos de la Tabla 11.

SPT 2. – Corresponde a la malla 3 de la estructura del tanque de espesamiento de relaves y del laboratorio. Su geometría es del tipo circular y está conformada por los elementos de la Tabla 11.

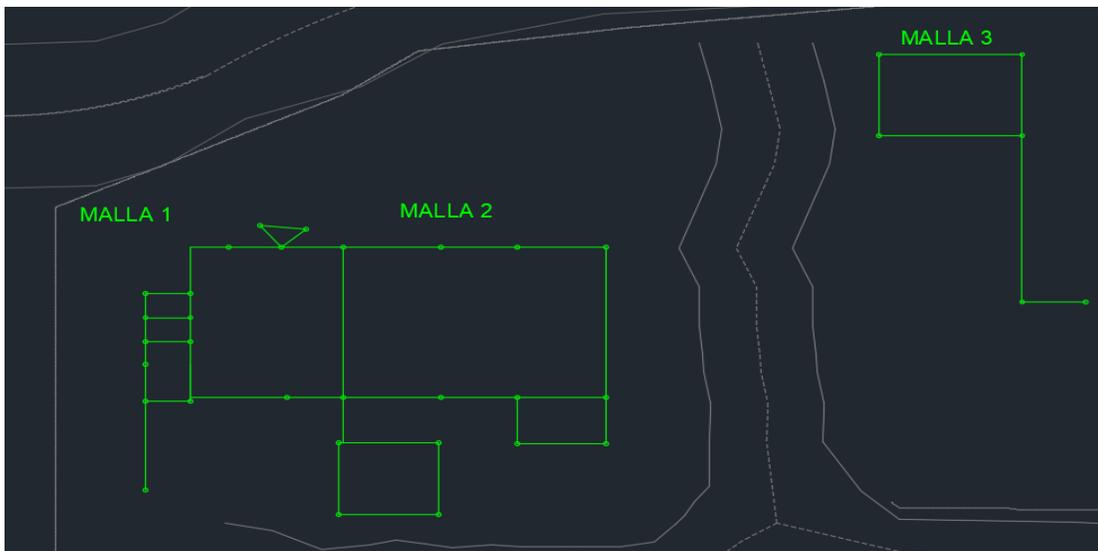


Figura 28. Esquema del sistema de puesta a tierra de la planta de flotación

En la se representa el sistema de tierras en la ubicación real de las instalaciones de la planta; la cual para visualización se encuentra a una escala de 1/2000. El mismo diseño realizado en AutoCAD es el que se carga en el software ETAP donde se realiza los cálculos de rendimiento.

Tabla 11. Parámetros de las SPT mallas de puesta a tierra de la planta

	MALLA 1	MALLA 2	MALLA 3	
Parámetro	Valor	Valor	Valor	Unidad
Capa superficial	0,15	0,15	0,15	[m]
Profundidad malla	0.7	0.7	0.7	[m]
Diámetro varilla	5/8	5/8	5/8	[in]
Longitud varilla	2.44	2.44	2.44	[m]
Numero de varillas	14	15	6	[und]
Calibre cable	2/0	2/0	2/0	[AWG]
Área malla	49.3	516.56	115.4	[m ²]

2.4.4. Determinación de la resistividad del terreno

Para el análisis computacional del sistema de puesta a tierra requerimos en análisis de la resistividad del terreno, de manera anticipada se presume que el suelo no es uniforme, por análisis geológico de los técnicos Geólogos de la empresa. El terreno es del tipo de depósitos aluviales, blando con matriz limosa (Silt Alluvium, por sus siglas en inglés) y mientras se profundiza tiende a ser pedregoso, es decir presenta distintas capas que puede afectar la resistividad del mismo.

En el estudio actual se usa un modelo de dos capas para calcular la resistividad, el cual es el modelo que se usa en el software ETAP. Por lo que se realiza medidas de resistividad del terreno con el instrumento telurómetro de marca Metrel Modelo MI3295. El método de medición usado es de Wenner de 4 picas enterradas completamente sus 0.3 m en direcciones ortogonales y diagonales como se indica en la Figura 29. Se realizan un conjunto mediciones empezando por un distanciamiento de 1 metro hasta llegar a los 10 metros. El equipo de medición calcula automáticamente la resistencia del terreno (tierra física) tabulados en la Tabla 12.

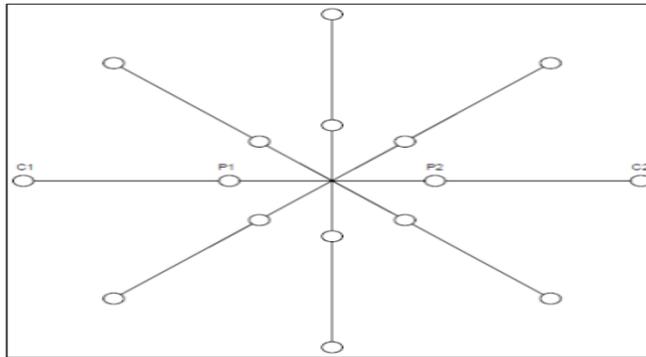


Figura 29. Direcciones y sentido de las mediciones de resistividad

Tabla 12. Valores de resistencia del terreno obtenidas del equipo Fluke

Distancia a (m)	Dirección 1 R (Ω)	Dirección 2 R (Ω)	Dirección 3 R (Ω)	Dirección 4 R (Ω)
1	12,35	13,96	14,18	13,92
2	6,14	5,65	5,58	6,44
3	3,96	3,88	3,56	3,52
4	4,49	4,40	4,58	4,49
5	4,45	4,54	3,91	4,45
6	4,02	3,54	3,70	3,54
7	3,25	3,22	2,99	3,03
8	3,67	3,38	3,60	3,45
9	2,61	2,30	2,51	2,66
10	3,17	3,01	2,82	2,76

Con los valores de la Tabla 12 y con la fórmula del método para hallar la resistividad aparente del terreno donde:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad \text{Ec. 2.2}$$

En donde: a (m) es la distancia entre electrodos auxiliares, b (m) es la profundidad de enterramiento de los electrodos auxiliares, R (Ω) es la resistencia aparente entregada por el instrumento y ρ es la resistividad aparente del suelo, en Ω-m.

Tabla 13. Valores de resistividad aparente del terreno calculados

Distancia a (m)	Dirección 1 ρ (Ω -m)	Dirección 2 ρ (Ω -m)	Dirección 3 ρ (Ω -m)	Dirección 4 ρ (Ω -m)
1	90,3	102,0	103,6	101,7
2	80,6	74,2	73,4	84,7
3	76,2	74,7	68,6	67,8
4	114,3	112,0	116,6	114,3
5	140,7	143,6	123,9	140,7
6	152,5	134,2	140,3	134,2
7	143,7	142,2	132,2	133,6
8	185,0	170,2	181,3	173,9
9	148,0	130,3	142,1	151,0
10	199,5	189,5	177,6	173,6

Resistividad del terreno con el modelo de 2 capas

Con los valores calculados en la Tabla 13, se puede apreciar que existe variabilidad en los valores de resistividad con respecto a la distancia entre las picas, lo que conlleva a afirmar que el terreno no es homogéneo. La resultante en el módulo de ETAP que la realiza mediante el método gráfico de SUNDÉ [39]. Derivado de las mediciones realizadas se introduce los datos del suelo en el software que arroja el gráfico de resistividad como muestra la Figura 30.

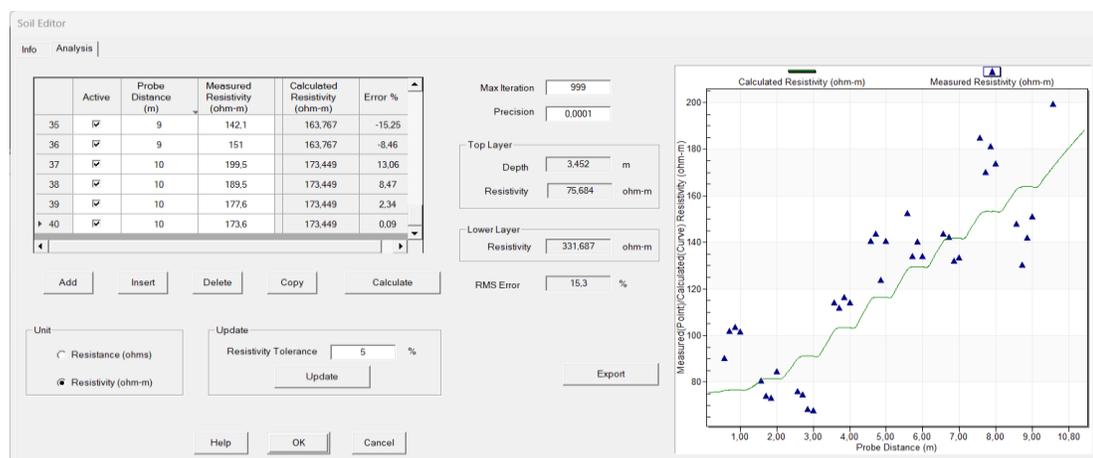


Figura 30. Mediciones de resistividad del suelo graficadas en software ETAP

Con el diagrama grafica con la relación entre la resistividad (ρ) vs el espaciamiento (a) se obtiene los valores de resistividad tanto de la sección superior como inferior y su

profundidad se encuentra cada una de estas capas. El software ETAP nos entrega los valores calculados de $\rho_1 = 75,68 \text{ ((}\Omega\text{-m)}$, $\rho_2 = 331.68 \text{ ((}\Omega\text{-m)}$ y $h = 3.45 \text{ (m)}$ que graficados se muestra en la Figura 31.

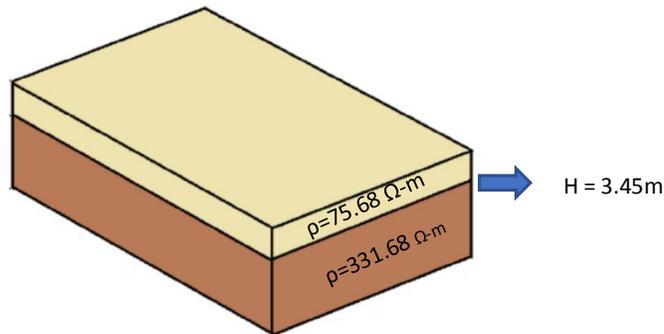


Figura 31. Diagrama del modelo de suelo de 2 capas

Para un mejor diseño del sistema de puesta a tierra se hace necesario ingresar al programa los datos del material que está en la superficie del sistema de tierra. Para nuestro caso optamos por elegir el material del tipo hormigón el cual presenta una resistividad aproximada de $2500 \Omega\text{-m}$ de acuerdo con la base de datos del software y se digita el espesor de la capa de este, en este caso 0.15 metros.

2.4.5. Modelamiento del sistema actual de puesta a tierra

Para el cálculo del rendimiento del sistema actual de puesta a tierra y poder determinar los potenciales peligrosos, utilizamos el programa Electrical Transient Analyzer Program (ETAP), que cuenta con un módulo especializado llamado Ground Grid Systems, que emplea el FEM - Método de elementos finitos que nos entrega el valor de la resistencia de la malla y las distribuciones gráfica de los potenciales absolutos, de paso y contacto y el campo electromagnético asociado; comparamos los valores tolerables con los criterios de la norma IEEE 80-2013.

El contenido del reporte que entrega la simulación comienza con un resumen del número de conductores y varillas empleados en el estudio, la longitud total del conductor utilizado y la longitud total de las varillas involucradas. Una vez capturada la información de cada uno de los elementos que conforman el sistema de puesta a tierra, se visualiza en 3D modelo construido como se aprecia en la Figura 32.

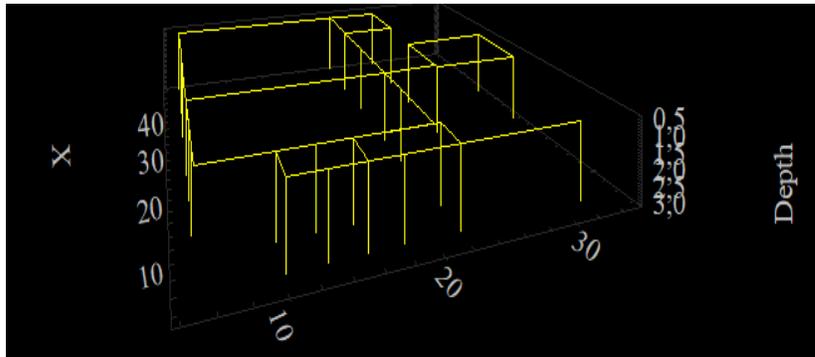


Figura 32. Vista en 3D de la geometría de malla de puesta a tierra en ETAP

Determinación de la corriente de la malla

La corriente que circula por la malla no es la corriente simétrica de falla a tierra ($I_f = 3I_0$), sino es un porcentaje que depende de los siguientes factores [31]:

D_f : Factor de decremento para tener en cuenta la componente DC

S_f : Factor de división de corriente

C_p : Factor de crecimiento futuro de la subestación, considera el incremento futuro de la corriente de malla

$$I_G = C_p * S_f * D_f * I_f \quad \text{Ec. 2.3}$$

En el caso de la planta, los criterios para el análisis de los sistemas eléctricos en baja tensión se tienen en cuenta los valores:

$I_f = 5600$ A. Es determinado por simulación en ETAP por medio del módulo de análisis de cortocircuito.

$S_f = 30\%$. La mayor parte de la corriente de falla por los conductores mismos y solo una parte se dirige hacia la malla.

$C_p = 100\%$, ya que se asume no habrá incremento de carga ni capacidad adicional.

$D_f = 123\%$, para la relación valor de $X/R = 10$ de la corriente de falla y duración de 0.5s

Realizando el cálculo:

$$I_G = C_p * S_f * D_f * I_f = 1 * 0,3 * 1,23 * 5600 = 2066 \text{ A}$$

Determinación de los potenciales de tierra

La determinación de la resistencia de puesta a tierra se basa en los valores de la resistividad del terreno, la longitud total de cobre que se usa en la malla y se encuentra enterrado, el área que ocupa la malla y la profundidad que se entierra los electrodos y el cable.

Mientras que con el valor de la resistencia y el valor de la corriente de tierra se obtiene los potenciales de la malla, teniendo el máximo GPR así:

$$GPR = R_G * I_G \quad \text{Ec. 2.4}$$

El valor del GPR depende de la resistencia de malla y la distribución de la corriente a lo largo de la malla. Este valor es calculado en el software ETAP para todos los puntos de la malla y se establece los valores de paso y de toque.

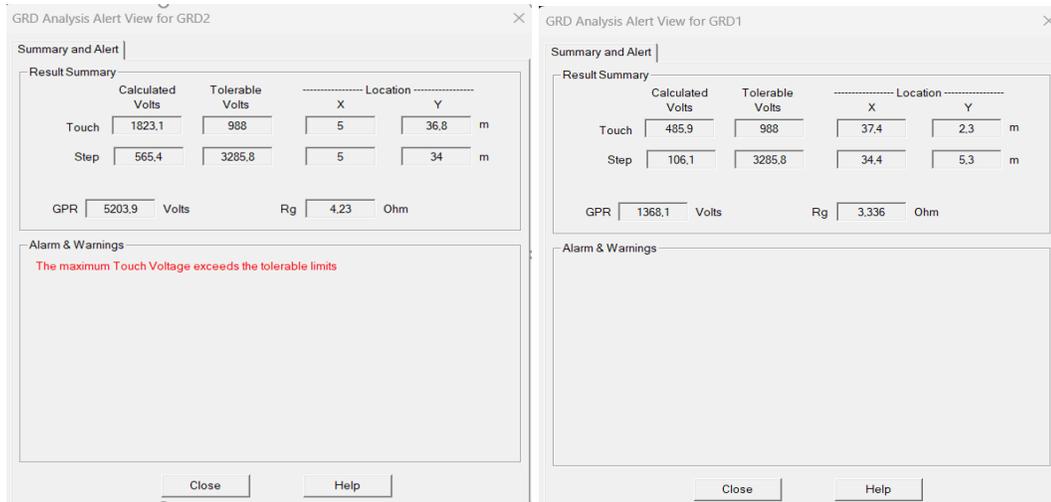
Modelado de malla y cálculo de resistencia y potenciales en ETAP

Como se tiene 3 mallas con su propósito de construcción, se realiza el modelado y la carga de los parámetros para cada una. Se ingresa los conductores y varillas y su ubicación en el plano X, Y, Z. Se ingresa los parámetros de entrada que incluyen peso promedio, temperatura ambiente, duraciones de corriente de falla, corriente de falla, factor de división de corriente y relación X/R) y parámetros de trazado (solo para el método de elementos finitos). Los valores ingresados para cada malla son:

Tabla 14. Parámetros de los estudios de caso para SPT en cada malla

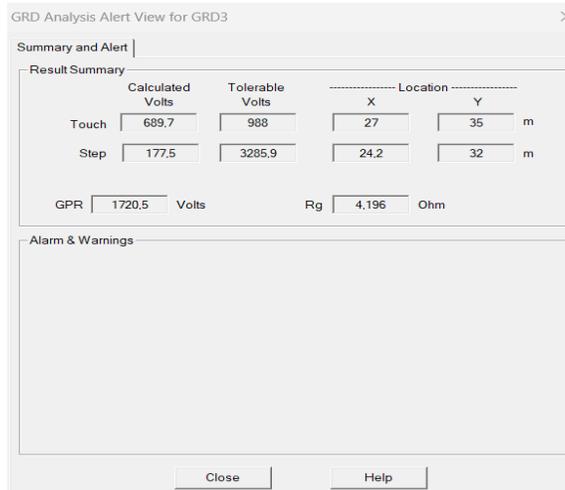
Parámetro	Malla 1	Malla 2	Malla 2
Peso de la persona	70 kg	70 kg	70 kg
Temperatura ambiente	40 °C	40 °C	40 °C
Medición fuera del borde de malla	3m	3m	3m
Duración de despeje de falla	0,5 s	0,5 s	0,5 s
Factor de separación (Sf)	30%	20%	20%
Factor de crecimiento (Cp)	100%	100%	100%
Corriente de falla (Ifg)	5600 A	2000 A	2000 A
X/R	10	8	8

En el cálculo de la puesta a tierra en el programa con los parámetros de entrada de la Tabla 14, se encuentra el resumen del sistema en el que se muestra la resistencia a tierra de las mallas, el voltaje GPR y los voltajes de toque y paso tolerables y calculados, que indican que se supera el voltaje de toque tolerable para una persona de 70 Kg. Los valores de la resistencia entregada se muestran en la Figura 33.



a) Malla 1

b) Malla 2



c) Malla 3

Figura 33. Resultados de análisis de resistencia y valores de toque, paso y GPR de SPT

En la simulación realizada, se obtiene el valor de la resistencia de la malla 1 con un valor que corresponde a $4,23 \Omega$, el mismo que cumple con la normativa Ecuatoriana NEC para cámaras de transformación y subestaciones y está acorde la norma IEEE-80-

2013. La malla 2 obtiene un valor de 3.33Ω mientras que la malla 3 tiene un valor de 4.196Ω .

La necesidad de graficar los diferentes niveles de potencial surge debido a que, en una cuadrícula, la densidad de corriente de fuga es más pequeña cerca del centro y más alta en los bordes y las esquinas, lo que produce diferentes niveles de potencial, los mismos que al ser graficados se observa si no existen condiciones de peligro en de la red [18]. Toda la información mencionada se ingresa al software ETAP, empleando el Método de los Elementos Finitos. En la Figura 34 se indica los resultados que arroja la simulación que corresponde al perfil de potencial absoluto en la malla 1.

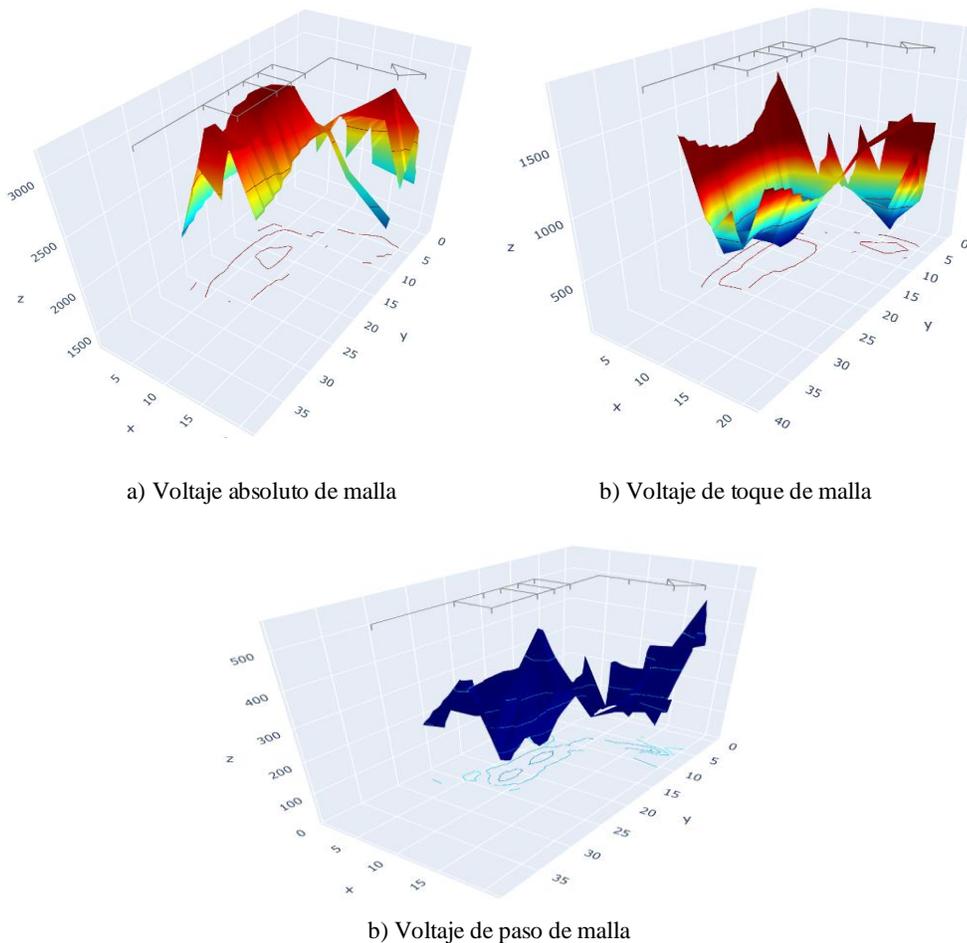
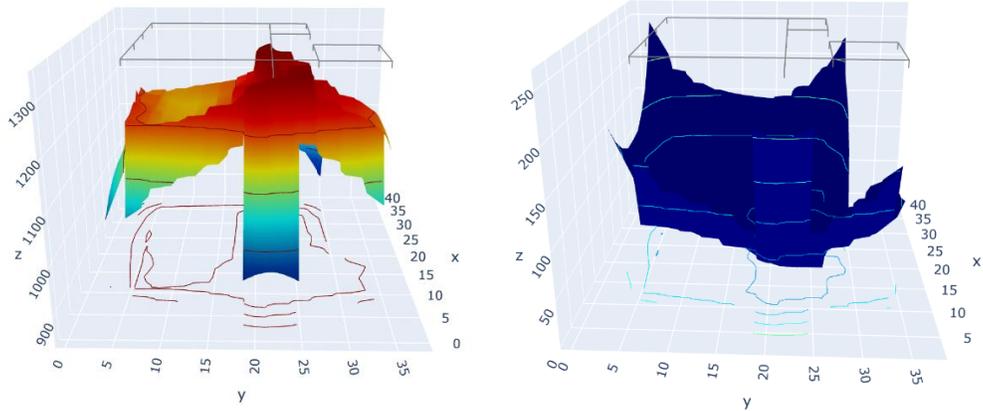


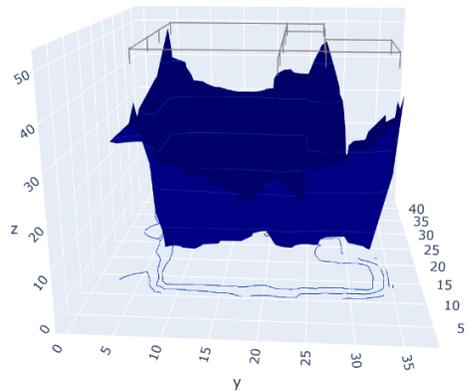
Figura 34. Perfiles de voltajes absolutos, de toque y de paso de la malla 1 en 3D

Con respecto a los voltajes de voltajes absolutos, de paso y de contacto, en la malla 2 se muestran en la Figura 35.



a) Voltaje absoluto de malla

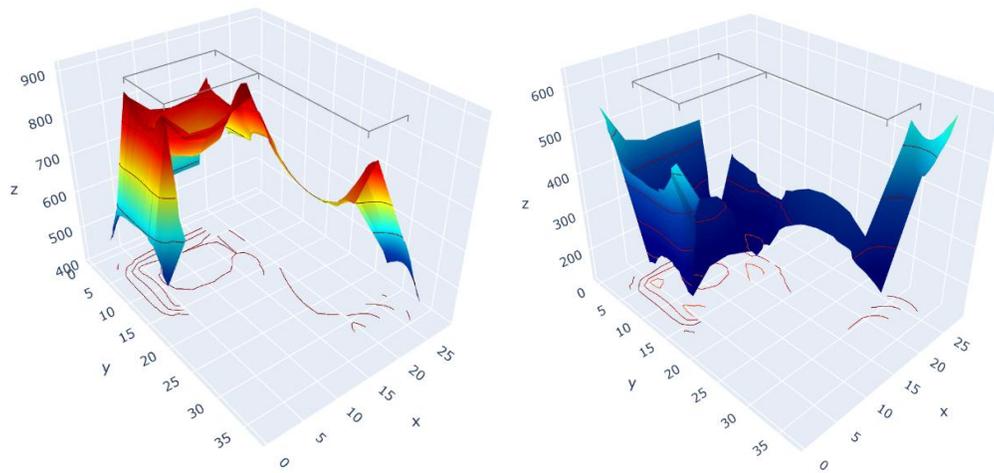
b) Voltaje de toque de malla



c) Voltaje de paso de malla

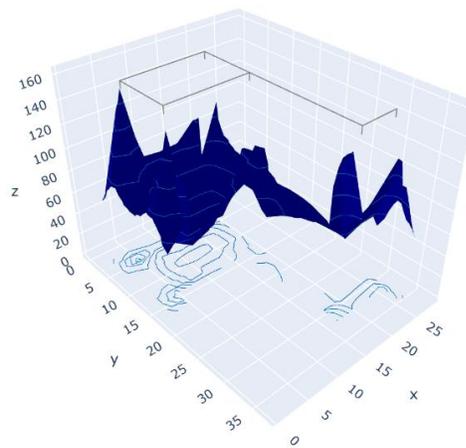
Figura 35. Perfiles de voltajes absolutos, de toque y de paso de la malla 2 en 3D

Mientras que para la malla 3, se muestra los voltajes de voltajes absolutos, de paso y de contacto en la Figura 36.



a) Voltaje absoluto de malla

b) Voltaje de toque de malla



c) Voltaje de paso de malla

Figura 36. Perfiles de voltajes absolutos, de toque y de paso de la malla 3 en 3D

2.4.6. Diseño del sistema de apantallamiento ante descargas atmosféricas

2.4.6.1. De la densidad de descargas a tierra

El nivel de riesgo requiere la información de la incidencia de una descarga eléctrica para determinar si es necesario o no implementar el SPCDA (sistema de protección contra descargas atmosféricas). Para este propósito se deben manejar el concepto de que: es necesario tener una cantidad tangible de descargas eléctricas mas no, solo los

días de tormenta al año, es por esto que se calcula la DDT (Densidad de descargas a tierra) de la siguiente manera:

$$N_k = 0.12 T_d \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

N_k es el número de descargas atmosféricas a tierra por kilómetro cuadrado por año llamado DDT (Densidad de descargas a tierra).

T_d Es el valor ceráunico promedio, es decir el promedio de días con tormenta en un año.

La base de datos utilizada para determinar la DDT y el T_d es del trabajo de los mapas Isoceraunico y del mapa de densidad de descargas atmosféricas para el área de la EEQ realizado por [35], en el cual se usa y aplica los datos del sensor satelital LIS.

En nuestro caso la planta al ubicarse en la dirección $0^{\circ}15'34''\text{N } 78^{\circ}48'10.4''\text{ W}$, tenemos la correlación en el mapa de la Figura 20 con un T_d aproximado de 40. Y mediante la fórmula se tiene:

$$N_k = 0.12 (40) = 4.8$$

Que comprobando en el mapa de densidad de descargas atmosféricas viene a ser el valor del nuestro DDT correspondiente de 4.8 descargas/km²-año.

2.4.6.2. Del modelado de la infraestructura de la planta

Se recopila la información de la infraestructura, el tipo de construcción y se realiza y se crea un modelo en 3D de la edificación mediante el software AutoCAD 3D como se muestra en la Figura 37. En el modelo establecido es posible aplicar el modelo electrogeométrico para el sistema de protección externo contra descargas atmosféricas, se tiene los siguientes datos representativos de la estructura:

- Lado de la estructura L (m) = 89
- Ancho de la estructura W (m) = 59
- Altura máxima de la estructura H (m) = 13m

- Sobresaliente sobre la estructura Hp (m) = 5m
- Materia de la estructura = Metal

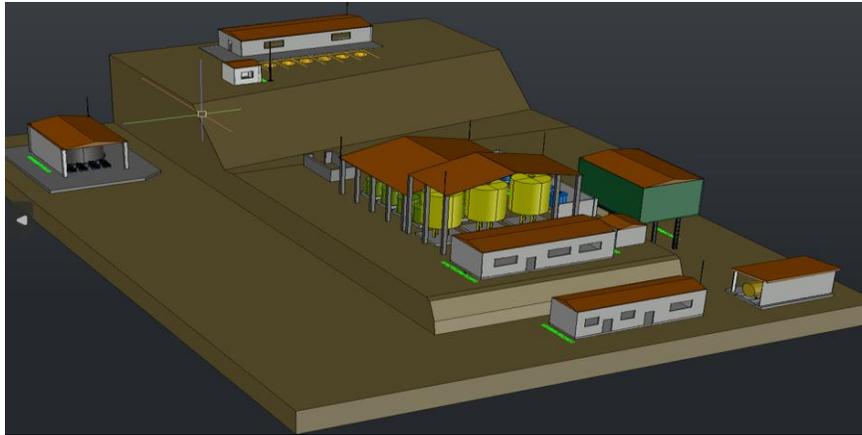


Figura 37. Modelo 3D de la planta de flotación

2.4.6.3. Determinación de la necesidad de un SPCDA

La gestión de riesgo nos indica si se requiere o no instalar un SPCDA. Realizando el análisis del nivel de riesgo en el aplicativo IEC Risk Assessment Calculator V 1.0.3, el cual ejecuta los cálculos de la norma IEC 62305-2. Ver (Anexo 2) Gestión de Riesgo. Empleando los datos de la instalación y los calculados se obtienen los siguientes valores de la componente de riesgo:

Tabla 15. Resultado de la gestión de riesgo aplicando la norma IEC 62305-2

EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LA ESTRUCTURA				
RESULTADO DE RIESGO EN PERDIDAS DE VIDAS				
R1	VALOR CALCULADO DEL RIESGO	<	RT	VALOR TIPICO RIESGO TOLERABLE
	0,000018	<		0,00001
DEBIDO A QUE R1 < RT EL RIESGO ESTA DENTRO DE MARGENES REQUERIDOS				
RESULTADO DE RIESGO EN PERDIDAS SERVICIO PÚBLICO				
R2	VALOR CALCULADO DEL RIESGO	<	RT	VALOR TIPICO RIESGO TOLERABLE
	0,000716	<		0,001
DEBIDO A QUE R2 < RT EL RIESGO ESTA DENTRO DE MARGENES REQUERIDOS				
RESULTADO DE RIESGO EN PATRIMONIO CULTURAL				
R3	VALOR CALCULADO DEL RIESGO	<	RT	VALOR TIPICO RIESGO TOLERABLE
	0,000000	<		0,001
DEBIDO A QUE R3 < RT EL RIESGO ESTA DENTRO DE MARGENES REQUERIDOS				
RESULTADO DE RIESGO EN PERDIDAS ECONOMICAS				
R4	VALOR CALCULADO DEL RIESGO	>	RT	VALOR TIPICO RIESGO TOLERABLE
	0,000690	>		0,0001
DEBIDO A QUE R4 > RT ES NECESARIA PROTECCION CONTRA RAYOS DE LA ESTRUCTURA				

Como se aprecia en la Tabla 15, el valor del riesgo en pérdidas de vida y económica está por arriba del riesgo aceptable por lo que se recomienda un SPCDA.

2.4.6.4. Determinación del nivel de protección NPR

El nivel de protección es la capacidad que tiene el SPCDA de proteger la instalación contra los efectos de una descarga atmosférica, se deriva de la eficiencia que se requiera para proteger debidamente la estructura. Se parte de la premisa de la siguiente tabla:

Tabla 16. Relación entre el NPR y la eficiencia del SPCDA

Nivel de protección	Eficiencia del SPCDA
I	0,98
II	0,95
III	0,9
IV	0,8

En la Tabla 4 del Capítulo I, se puede observar la magnitud de los parámetros de la descarga, asociada a cada uno de los niveles de protección, dado por la norma IEC 62305. Considerando los riesgos en la instalación se requiere una eficiencia de 98% por lo que el nivel de protección adecuado es el Nivel I.

2.4.6.5. Del modelo electrogeométrico para el sistema de protección

El método de la esfera rodante se ha elegido para proteger la estructura. Se busca lograr el adecuado sistema de captación con la condición de que ningún punto del volumen a proteger está en contacto con una esfera de radio rodando sobre el suelo, alrededor y en la parte superior de la estructura en todas las direcciones posibles. El radio R de la esfera rodante depende del nivel de riesgo NPR y de la clase del SPCR como se determina en la Tabla 17. Como el nivel de protección requerido es Nivel I, el radio de la esfera a usar es de 20 metros.

Tabla 17. Relación entre NPR y Radio de la Esfera rodante, Norma IEC 62305

Nivel de protección	Radio de la esfera rodante (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60

La esfera de radio rueda alrededor y sobre la estructura. Un impacto de rayo se podría producir donde la esfera toque a la estructura, entonces en estos puntos se requiere colocar sistemas de captación (o bien tolerar a los rayos). La colocación de puntas captadoras en la estructura de la planta y la aplicación del método de la esfera rodante de manera gráfica sobre los planos 2D de la estructura, considerando asegurar que en una zona no protegida no haya ninguna saliente ni que la esfera llegue a tocar el suelo, se muestra en la Figura 38.

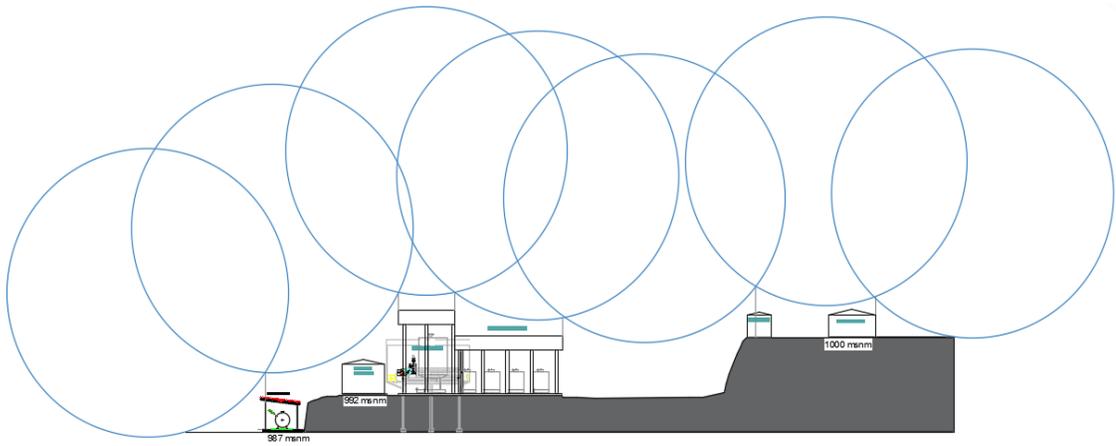


Figura 38. Aplicación del método de la esfera rodante en la vista lateral de la planta

Sin embargo, el objetivo del método radica en aplicar sobre todo el área de la planta, por lo que una simulación en 3D de la planta, junto con la colocación adecuada de las puntas captadoras permite establecer de manera gráfica el lugar de ubicación de las puntas captadoras.

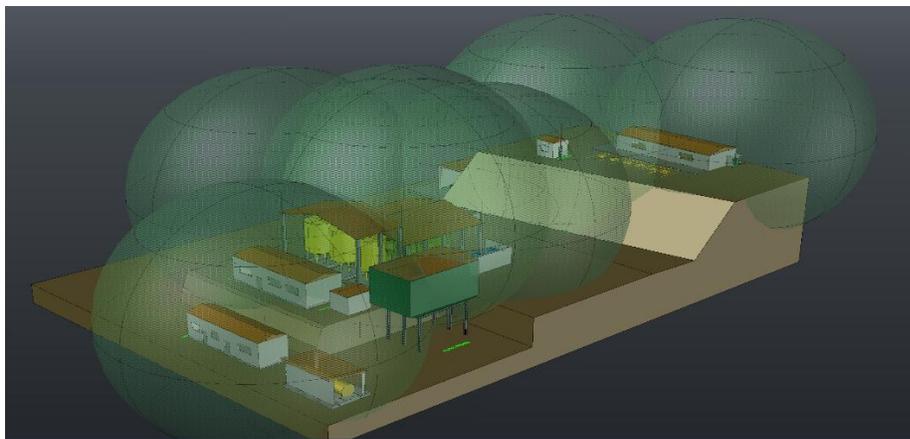


Figura 39. Aplicación del método de la esfera rodante en el modelo 3D de la planta

2.4.6.6. Del cálculo de equipos de protección externa del SPCDA

Como se realiza el método de protección basado en esferas rodantes, se requiere el uso del equipo captador mediante puntas Franklin con mástiles fijado en las estructuras. La disposición de los captadores se indica en el Anexo 3.

El detalle de los captadores propuestos se indica en la Tabla 18, donde se indica la descripción de la captadora, el tamaño de la punta con su mástil, la altura del conjunto y la altura final sobre el piso; se debe tener en cuenta que el terreno es en un desnivel como se aprecia en la Figura 38, entonces las alturas entre ella varían.

Tabla 18. Detalle de los captadores pararrayos a instalarse en la planta

Nro.	DESCRIPCIÓN	TAMAÑO	ALTURA EQUIPO	ALTURA PISO
P1	Punta captadora Franklin + Mástil	Ø16x 2000 + Mástil Ø1 1/2" x 3000	5 m	9 m
P2	Punta captadora Franklin + Mástil	Ø16x 2000 + Mástil Ø1 1/2" x 2200	4.4 m	16.4 m
P3	Punta captadora Franklin + Mástil	Ø16x 2000 + Mástil Ø1 1/2" x 2200	4.4 m	16.4 m
P4	Punta captadora Franklin + Mástil	Ø16x 2000 + Mástil Ø1 1/2" x 2200	4.4 m	16.4 m
P5	Punta captadora Franklin + Mástil	Ø16x 2000 + Mástil Ø1 1/2" x 2200	4.4 m	16.4 m
P6	Punta captadora Franklin + Mástil	Ø16x 2000 + Mástil Ø1 1/2" x 2200	4.4 m	11,4 m
P7	Punta captadora Franklin + Mástil	Ø16x 2000 + Mástil Ø1 1/2" x 2200	4.4 m	11,4 m
P8	Punta captadora Franklin + Mástil	Ø16x 2000 + Mástil Ø1 1/2" x 2200	4.4 m	9.4 m
P9	Punta captadora Franklin + Mástil	Ø16x 2000 + Mástil Ø1 1/2" x 2000	7 m	7 m
P10	Punta captadora Franklin + Mástil	Ø16x 2000 + Mástil Ø1 1/2" x 2000	4.4 m	9.4 m

2.4.6.7. Del cálculo de equipos de protección interna del SPCDA

El sistema de Protección interior que forma parte del SPCDA previene descargas eléctricas peligrosas que podrían presentarse en el interior de la estructura a causa de la circulación de corrientes de rayo en el sistema de protección interno o en otras partes conductoras de la estructura.

El sistema de protección interna comprende los sistemas equipotenciales y los sistemas de aislamiento eléctrico entre las partes.

Sistemas Equipotenciales

Todas las partes metálicas de la estructura como las canalizaciones metálicas, bandejas porta cables, blindajes de cables, armaduras, marcos, gabinetes se deben conectar equipotencialmente mediante uniones sólidas o por medio de puentes equipotenciales. Las mallas de tierra deben ser equipotencializadas.

Dispositivos de protección DPS

La planta alimenta a un conjunto de cargas eléctricas distribuidas en toda el área descrita anteriormente y las zonas a proteger con sus elementos son:

- Zona 0. Corresponde a la acometida de entrada de la línea de alimentación en media tensión de 13,2 KV. Forma parte la acometida subterránea, y los dispositivos de seccionamiento y protección a la entrada del transformador.
- Zona 1. Con el cuarto tipo subestación cerrada donde se encuentra el transformador trifásico de 1000 KVA del tipo convencional, con sus celdas de protección.
- Zona 2. Que incluye la distribución principal donde se encuentran el conjunto de tableros eléctricos adosados que compone los tableros de transferencia automática de 1400 Amperios, el tablero de distribución principal con 6 circuitos de distribución y un tablero de compensación de reactivos de 350 KVAR. En la misma zona se encuentran los tableros de distribución secundaria se cuenta con 7 subtableros, y dos subtableros con voltaje de 220VL-L para los servicios generales.
 - Zona 3. La compone las cargas sensibles individuales donde se encuentra el laboratorio con los equipos electrónicos de medición.

El nivel de protección de la estructura es NPR I, y se mantiene un sistema TN-S de interconexión del sistema de tierra y neutros.

De acuerdo a lo anterior se requiere dimensionar un DPS de media tensión para protección de entrada del transformador y un conjunto de DPS para baja tensión del

Tipo I y II en los tableros secundarios de 440V y el DPS Tipo III para el cuadro eléctrico del Laboratorio.

Selección DPS para protección transformador en media tensión (13.2KV)

La selección del DPS de media tensión nos basamos en las normas IEC 60099-4 o ANSI/IEEE C62.11. Siguiendo la metodología de [40] y [41] donde:

Corriente nominal del DPS. - para un transformador tipo pedestal o convencional en cámara eléctrica se debe usar un DPS de ciclo pesado de 10 kA.

Máxima tensión continua de operación (MCOV). - La máxima regulación permitida del sistema es 10% por lo que la máxima tensión durante la operación normal del equipo será:

$$MCOV = \frac{V_m}{\sqrt{3}} = \frac{13.2 \text{ KV} * 1.1}{\sqrt{3}} = 8.38 \text{ KV} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Máxima tensión de operación bajo falla (V_{TG}). -El sistema que ingresa a la cámara de tres conductores con baja resistencia a tierra y puesto a tierra en los extremos, por lo que la magnitud de la sobretensión sobre la tensión fase-tierra nominal de sistema, $E_{LG} = 1.4$

$$V_{TG} = E_{LG} * MCOV = 1.4 * 8.38 \text{ KV} = 11.74 \text{ KV} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Se determina la curva del TOV típica para el DPS de la Figura 40.

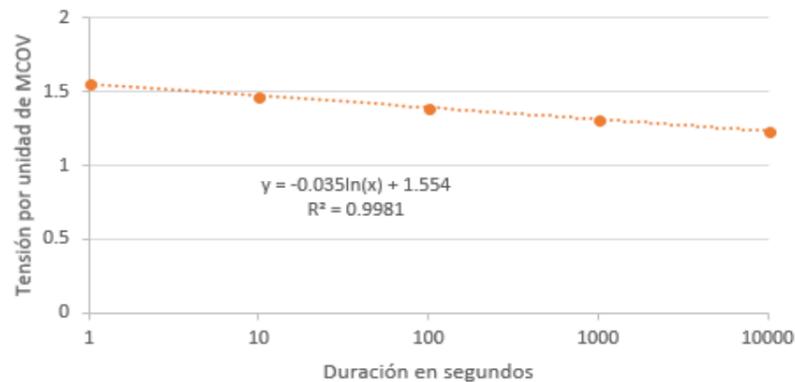


Figura 40. Curva de TOV típica para DPS ciclo pesado 10 KA

Con la línea de la gráfica se estima k_t , asumiendo que $t=0.2$ s como el tiempo de despeje de una falla. Por lo tanto:

$$K_t = -0.035 * \ln(0.2) + 1.554 = 1.61 \quad \text{Ec. 2.8}$$

El valor de:

$$MCOV_2 = \frac{V_{TG}}{K_t} = \frac{11.74 \text{ KV}}{1.61} = 7.29 \text{ KV} \quad \text{Ec. 2.9}$$

El MCOV más alto es 8.38 kV, por lo que se utiliza 8.40 kV que es el valor estandarizado inmediatamente superior. El DPS seleccionado tiene las siguientes características de la Tabla 19.

Tabla 19. Especificaciones de DPS de media tensión para protección transformador 1000 KVA 13.2/440V

Característica	Parámetro
Tipo	Polimérico Oxido de Zinc (ZnO)
Voltaje nominal del DPS (V_m)	8.40 KV
Corriente nominal de descarga del DPS	10 KA con duración 8/20 us
Tensión Residual al impulso tipo Rayo (LPL)	39.53 KV
Tensión Residual al impulso tipo maniobra (FOW)	41.5 KV
Servicio	Liviano
Tipo de acuerdo a su instalación	Distribución

De la evaluación de la coordinación del DPS, se tiene por placa que el transformador de 1000 KVA tiene un BIL de 75 KV y el nivel de aislamiento por onda recortada del transformador es 105 kV.

El DPS se instala muy cerca de los bornes del transformador. Se verifica la coordinación entre el aislamiento del DPS y el transformador de la siguiente forma:

$$PR_{L1} = \frac{CWW}{FOW + V_{lead}} = \frac{105}{41.5} = 2.53 \quad \text{Ec. 2.10}$$

$$PR_{L1} = \frac{BIL}{LPL} = \frac{75 \text{ KV}}{39.5 \text{ KV}} = 1.87 \quad \text{Ec. 2.11}$$

Los valores calculados son mayores a 1.2, por lo que la coordinación del aislamiento del DPS con el transformador es aceptable.

Selección DPS para protección aparamenta en baja tensión (440V)

El tamaño del dispositivo de protección contra sobretensiones (SPD) depende de la clase y la ubicación. De la tabla que relaciona el NPR y la clase del SPCDA, como se calculó un NPR de 1, le corresponde una clase I de SPCDA.

Tabla 20. Correspondencia entre los NPR y las clases de los SPCR

NPR	Clase de SPCDA
I	I
II	II
III	III
IV	IV

El análisis de protección interna con DPS requiere dividir a la planta en zonas de protección. Al haber analizado la clase del SPCDA según el estándar IEC 62305-2, teniendo la clase I, le corresponde la clase de protección tipo Clase I con las siguientes características que de acuerdo a la tabla donde se muestra los parámetros del primer impulso de corriente que genera la descarga atmosférica en relación a la clase, para la planta industrial se tiene una $I_{imp} = 200$ KA con 10/350 us.

Tabla 21. Parámetros del primer impulso de corriente de un rayo de acuerdo a la clase de SPCDA [42]

Clase	I	II	III + IV
I [KA]	200	150	100
T1 [us]	10	10	10
T2 [us]	350	350	350
W/R [MJ/ Ω]	10	5.6	2.5

La norma IEC 62305 establece que aproximadamente el 50 % de la corriente del rayo es conducida por el sistema de protección exterior sistema de protección hacia tierra y el restante 50 % de la corriente del rayo restante fluye hacia el edificio a través de los conductores del sistema eléctrico [42]. Por lo tanto, siempre es necesario instalar una protección interior contra rayos.

Determinación de los tipos de DPS de acuerdo a la zona de protección

Como se tiene 3 zonas de protección en el recinto, y la zona de protección 1 y 2 se encuentran en el mismo lugar, se instala un sistema de protección de tres niveles

combinado, se requiere un DPS tipo I, II combinado y un DPS tipo III para los equipos de laboratorio como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Determinación del tipo de DPS en relación al nivel de protección y el lugar de instalación

Tipo DPS	Designación	Nivel Protección	Lugar de instalación
Tipo 1 y 2	DPS combinado	≤ 2.5 KV	Tablero Principal (TDP-440V)
Tipo 2	DPS para dispositivo	≤ 2.5 KV	Tablero secundario de transformador 75 KVA (TDS-01-220V)
Tipo 3	DPS para dispositivo	≤ 1.5 KV	Aguas arriba del equipo fotoespectrofotómetro

CAPITULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Análisis de Resultados

3.1.1. Medición de la puesta a tierra

Para comprobar el resultado de la resistencia de puesta a tierra, se realizó una medición en el sitio con el medidor de resistencia de puesta a tierra. El protocolo de medición de puesta a tierra, incluyó el método de los tres puntos, bajo las siguientes condiciones meteorológicas:

Temperatura: 27°C

Humedad relativa: 78%

Presión atmosférica: 1000 hPA

Se obtuvo información de la resistencia de la malla 1, la malla 2 sin ser conectadas y también de las mallas 1 y 2 interconectadas con su unión equipotencial mediante cables de cobre desnudo #2 AWG. Se comprueba que, si se puede realizar la unión de estas mallas, ya que el calibre 2 AWG es el calibre mínimo de puesta a tierra y es apto cuando la distancia entre dos puntos o mallas es superior a 6 metros [43].

Los resultados obtenidos se comparan con los resultados de la simulación en ETAP en la siguiente tabla:

Tabla 23. Resultados de mediciones y cálculos de las mallas de SPT de la planta

	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 1y2
Resistencia medida [Ω]	4,64	1,48	6,26	0,49
Resistencia ETAP [Ω]	4,23	3,33	4,19	2,05

Considerando que es factible separar las mallas de tierra físicamente para su revisión y mantenimiento, se realiza las mediciones. En la Malla el valor medido nos entrega un valor de 4,64 Ω , y su valor calculado den ETAP es de 4,23 Ω , comprobando la efectividad de la simulación. Mientras que en la malla 2 su valor medido es de 1,48 Ω

y el calculado de $3,33 \Omega$, ya teniendo una desviación entre los dos valores. Al momento de unir la Malla 1 y 2 como se tiene físicamente en la planta los valores medidos por el equipo es de $0,49 \Omega$ y el valor calculado de $2,71 \Omega$; ambos valores difieren en mayor proporción. Realizando un análisis a la posible causa o parámetro que nos entregue tales desviaciones, se investigó y observó que la infraestructura de la planta es completamente metálica desde su techo hasta las columnas que se dirigen al suelo, esto actúa como un conductor y electrodo natural de puesta a tierra. Por esta razón la resistencia de puesta a tierra medida es inferior.

En el software de modelamiento y simulación de puesta a tierra, se tendría que adecuar un parámetro adicional en la malla 2 para determinar el aporte a la malla que haría la propia estructura.

3.1.2. Modelamiento del suelo

Para el análisis computacional del sistema de puesta a tierra requerimos en análisis de la resistividad del terreno, de manera anticipada se presume que el suelo no es uniforme, por análisis geológico de los técnicos Geólogos de la empresa. El terreno es del tipo de depósitos aluviales, blando con matriz limosa (Silt Alluvium, por sus siglas en inglés) con una resistividad de su formación por tablas entre $20-100 \Omega\text{-m}$ y mientras se profundiza tiende a ser pedregoso con valores de $300 - 500 \Omega\text{-m}$., es decir presenta distintas capas que puede afectar la resistividad del mismo.

La toma de datos y valores en los puntos realizados a diferente distancia entre los electrodos nos permitió obtener los valores de la resistencia física del terreno (R). Se escogió realizar mediciones desde 1 hasta 10 metros de separación entre las picas, debido a la limitación del área del terreno de 60×40 metros. El espesor y la profundidad del estudio que realizamos depende de la distancia de separación a (m) de los electrodos. La resistencia obtenida R (Ω) representa la resistencia del suelo a las profundidades h (m) del terreno expresados en la Tabla 24.

Tabla 24. Relación distancia entre electrodos vs Profundidad suelo y resistencia

Distancia a (m)	Resistencia promedio R (Ω)	Profundidad h (m)
1	13,6	0,8
2	9,8	1,5
3	4,8	2,3
4	4,1	3,0
5	4,4	3,8
6	4,0	4,5
7	3,4	5,3
8	3,3	6,0
9	3,0	6,8
10	2,7	7,5

La profundidad del enterramiento simétrico de las picas fue de 0.3m. Ya que es la medida estándar del tamaño de las picas de los instrumentos de medición de resistividad del terreno.

El análisis de la resistividad del suelo en el software ETAP que realiza la interpolación de los valores obtenidos y calcula la curva de resistividad de la formación se muestra en la Figura 41. Con la curva de resistividad el programa procede a aplicar el método de Sunde y nos entregó el modelo de dos capas para nuestro estudio del SPT donde ETAP nos entrega los valores calculados de $\rho_1 = 75,68$ (Ω -m) hasta una profundidad de 3,45 metros y de $\rho_2 = 331.68$ (Ω -m) de manera continua. Comparando los valores medidos de la resistividad con las tablas del tipo de formación, comprobamos que tenemos un suelo donde a medida que nos profundizamos su resistividad aumenta.

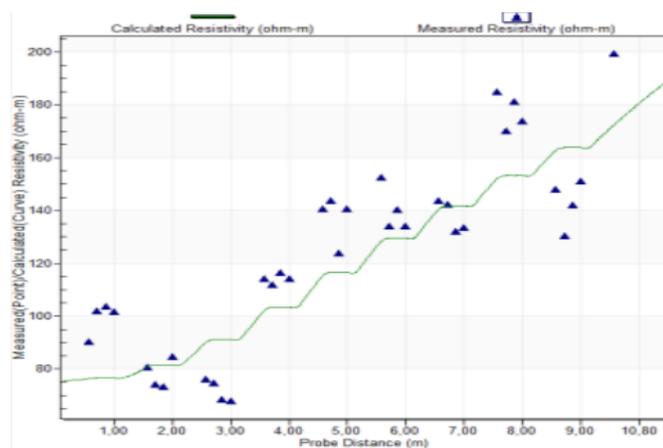


Figura 41. Valores medidos y cálculo de la resistividad de la formación usando ETAP

3.1.3. Resultados del análisis de las mallas

A través de los resultados obtenidos, observamos que cada una de las mallas actuando de manera individual tienen una resistencia bajo los 5Ω , lo cual es un valor aprobado en temas de regulación y control para puestas a tierra de instalaciones industriales. Sin embargo, también es necesario analizar los voltajes absolutos, de toque y de paso que se pueden generar en las mallas ante eventos de falla.

Con la información recopilada necesaria, se emplea el método de elementos finitos en ETAP para generar las gráficas en 2D y en 3D de las tensiones mencionadas mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 25. Datos de voltaje de toque, de paso y GPR para configuraciones de malla actuales

	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 1 y 2	LIMITE TOLERABLES
GPR [V]	5203,9	1358	1720	3383,9	.
Voltaje toque [V]	1823,1	485,8	689,7	1103,01	988
Voltaje de paso [V]	565,4	106,1	177,5	244,9	3285

De acuerdo a la Tabla 25, en la malla 1, se presenta un voltaje de toque de 1823,1 V que sobrepasa al límite tolerable de 988 V, esto es importante reducir ya que, al pertenecer la malla al cuarto del transformador tipo subestación, este debe cumplir con los lineamientos de la norma IEEE 80. Las mallas 2 y malla 3 están dentro de los parámetros tolerables y cumplen con el estándar de voltajes de toque y paso.

En la planta actualmente se encuentra conectadas las mallas 1 y 2, para hacer una conexión equipotencial. Los resultados respecto a los nuevos voltajes de malla son de voltaje de toque 1103 V y voltaje de paso de 244,9 V y el GPR de 3383 V. Con estos valores se evidencia que se disminuye el voltaje de toque en la malla, pero aún no se logra reducir por debajo del límite tolerable.

3.1.3.1. Del mejoramiento del sistema de puesta a tierra

Con la finalidad de mejorar los perfiles de voltaje de paso ante fallas de frecuencia industrial 60 Hz, se propone unir la malla 3 y hacer un sistema completo equipotencial. Se procedió a realizar la equipotencialidad en ETAP de las tres mallas y se obtiene los valores mostrados en la Tabla 26, se muestra la disminución del voltaje de toque por debajo de límites tolerables.

Tabla 26. Datos de voltaje de toque, de paso y GPR para el SPT equipotencializado

	Malla 1, 2, 3	LIMITE TOLERABLES
GPR [V]	2225	.
Voltaje toque [V]	900	988
Voltaje de paso [V]	175	3285

Con respecto a la distribución de potenciales en la malla de tierra, en la Figura 42, se muestra la distribución de potencial en el terreno. Con valores máximos de 2225 V, y con los voltajes mayores concentrados en los conductores largos y hacia el perímetro de la malla. Mientras que en la Figura 43 se muestra el perfil de voltaje en 3D donde se visualiza un voltaje uniforme de potencial sobre los 2000 V. Esto contribuye a la equipotencialidad de los perfiles de voltaje y evitar riesgos a personas o equipos por diferencias de potencial en las estructuras. A Su vez el perfil del voltaje de toque disminuye en toda la malla de acuerdo a la Figura 44.

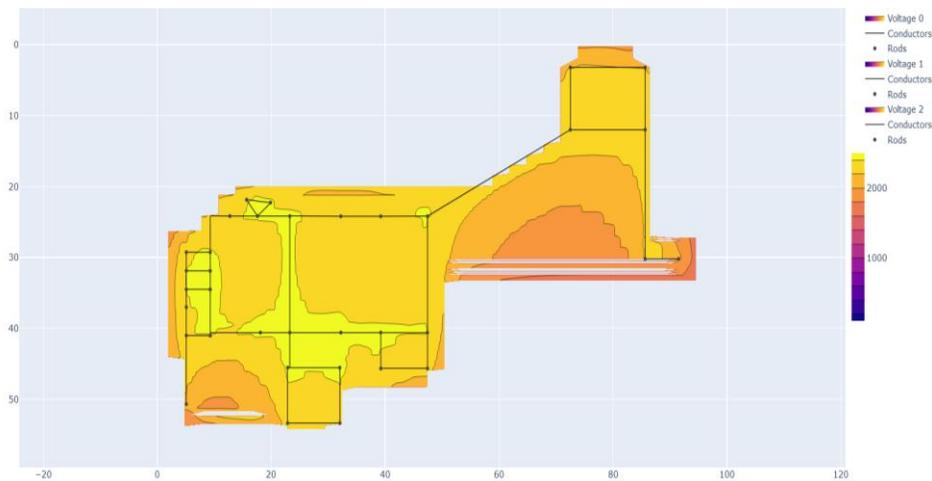


Figura 42. Perfil de potencial absoluto en 2D de la malla equipotencializada

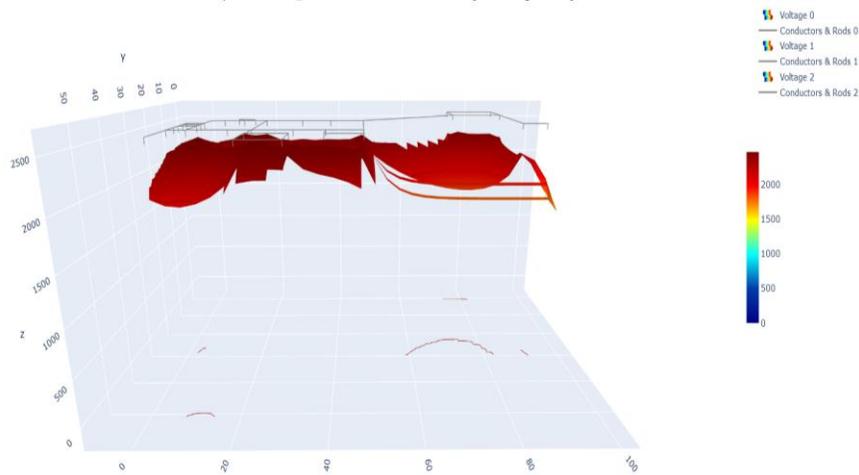


Figura 43. Perfil de potencial absoluto en 3D de la malla equipotencializada

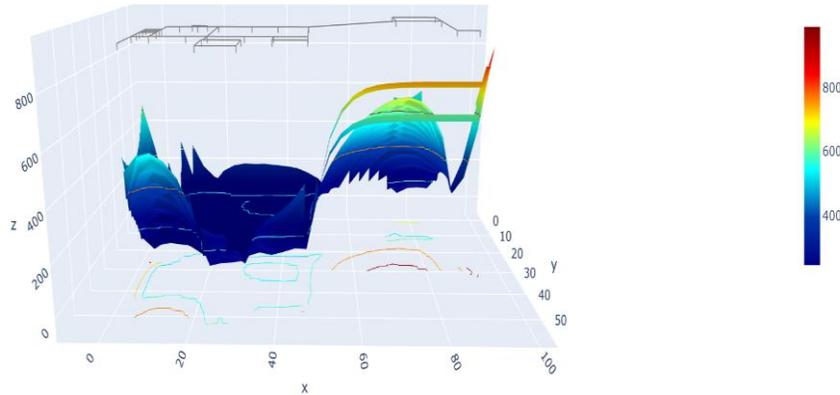


Figura 44. Perfil de voltaje de toque en 3D de la malla equipotencializada

3.1.3.2. Del mejoramiento de la malla de puesta a tierra para descargas atmosféricas

La planta analizada no cuenta con un sistema adecuado de protección contra descargas atmosféricas. Al momento de recibir una descarga eléctrica sobre alguna de las estructuras, esta se redirige a través de la misma y se drena a través de las puestas a tierra existentes. Sin embargo, con la propuesta realizada del sistema de protección contra descargas atmosféricas (SPCDA), en su apartado de protección externa con respecto a la malla de tierra para los bajantes de los pararrayos, se propone la implementación del sistema de aterrizamiento tipo pata de ganso que propone la norma IEC 62305-3 en cada uno de los bajantes de los pararrayos como se muestra en la Figura 45.

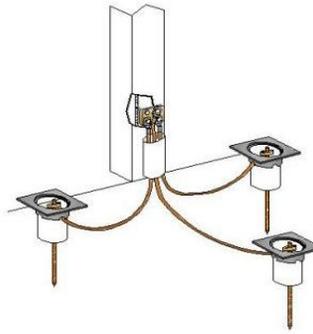


Figura 45. Puesta a tierra tipo pata de ganso para bajante de pararrayo sugerido

Las ventajas que ofrece el sistema pata de ganso como el modelo del Anexo 4, soldado en cada una de las columnas tipo bajante de cada pararrayo son:

- Permite reducir la impedancia de descarga, logrando drenar la corriente en distintas vías.
- Permite regular el potencial en las inmediaciones y en la malla, lo que repercute en menores tensiones de paso durante la falla.

Aplicando el sistema de aterrizamiento en la malla 2 que corresponde a la estructura y en los demás bajantes se procede a determinar la respuesta del sistema. Si bien en cierto el ETAP no permite realizar un análisis transitorio para corrientes de falla en el orden de los (us) que es la duración de un rayo; el software nos sirve para tener una orientación en cuanto a los potenciales de contacto que tendrá la estructura o como se disipará la corriente con las propuestas de aterrizamiento a implementarse.

Análisis del sistema de malla sin SPCDA

Aplicando una corriente de falla de 20 KA, que sería una corriente severa que podría circular por la malla a tierra y tendrá que drenarse hacia el suelo, en el software ETAP se tiene los siguientes resultados.

Tabla 27. Datos de voltaje de toque, de paso y GPR para el SPT de la malla ante I=20 KA

	Malla 2	LIMITE TOLERABLES
GPR [V]	34203	.
Voltaje toque [V]	12146	988
Voltaje de paso [V]	2652	3285

Como indica la Tabla 27, el GPR de la malla se incrementa a más de 36 KV, sin embargo, el voltaje de toque es el que repercute en daño a la integridad de las personas. Se tendría la siguiente gráfica, donde se evidencia que se tendrá valores de 9800 V en los bordes de la malla, en sus condiciones de frontera.

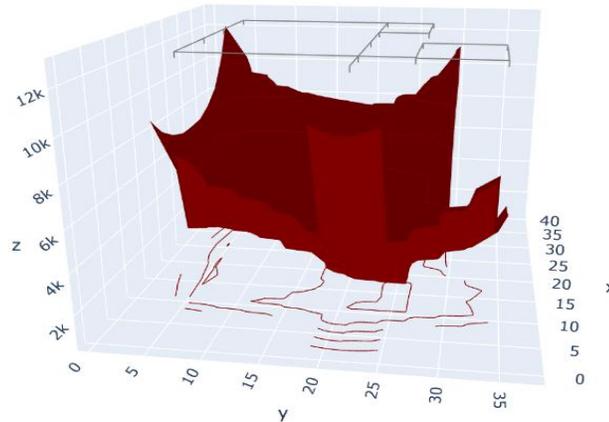


Figura 46. Perfil de voltaje de toque en 3D de la malla 2 ante descarga atmosférica 20 KA

Análisis del sistema de malla de SPCDA con toma de tierra

Al realizar el aterrizamiento por la toma de tierra de pata de ganso en cada columna bajante como muestra la Figura 47.

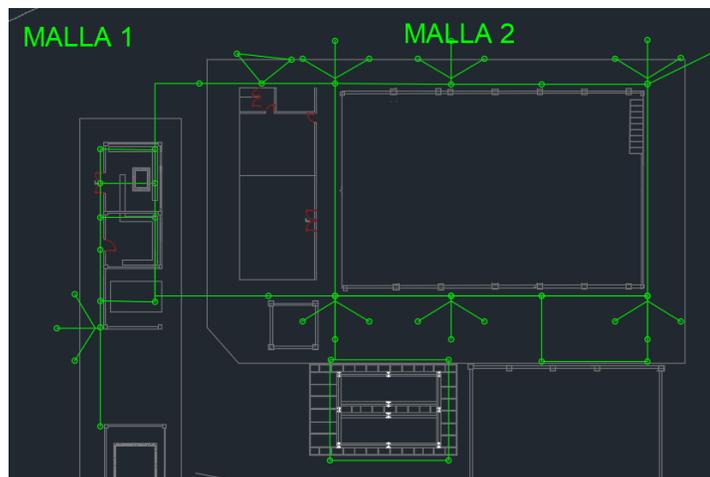


Figura 47. Ubicación de las tomas de tierra pata de ganso en la Malla 2 y demás bajantes

Tabla 28. Datos de voltaje de toque, de paso y GPR para el SPT de la malla con tomas pata ganso ante I=20 KA

	Malla 2	LIMITE TOLERABLES
GPR [V]	31827	.
Voltaje toque [V]	9003	988
Voltaje de paso [V]	2330	3285

La Tabla 28 indica que se reducen los voltajes GPR, de paso y de toque. A su vez la resistencia también disminuye a 3.04Ω . Estos valores en ETAP suelen ser representativos ya que no se toma en cuenta la inductancia de los cables que ante una descarga atmosférica que tiene una alta frecuencia, la misma inductancia de la malla de tierra contribuye a incrementar la impedancia y por ende hay mayor restricción al drenaje de la corriente a tierra.

3.1.4. Estructura metálica como componente natural del SPCDA

Como se calculó de manera inicial la protección contra descargas atmosféricas requiere un NPR = 1, para proteger los cuartos de energía, las bodegas de químicos y los laboratorios de análisis. Estos requieren sus bajantes a la puesta a tierra tipo pata de ganso para disipar la energía del rayo de manera adecuada.

El área de cobertura del SPCDA diseñado abarca toda la superficie de la planta. Al tener una estructura metálica se analizó la posibilidad de usar la misma como un sistema natural de bajantes, y la misma armadura de columnas estructurales conectarla a los electrodos del SPT, cumpliendo con la norma IEC 62305-1.

La Estructura metálica tiene columnas estructurales vinculadas entre sí por correas metálicas, realizando la colocación de electrodos tipo pata de gallina se logra bajar la resistencia de puesta a tierra de la estructura y se consigue a su vez mejorar las tensiones de paso y contacto que se tendría en caso de una descarga atmosférica.

3.1.5. Evaluación del método electrogeométrico

El método de protección escogido contra descargas atmosféricas es el método de la esfera rodante. El nivel de protección NPR=1, exige una clase de protección Clase 1, con una esfera de 20 m de diámetro que se logró hacer rodar tangente entre cada una de las puntas captadoras del rayo, empezando su recorrido desde el suelo; de tal forma que toda la estructura que se encuentra por debajo del perímetro de la esfera es el espacio que está protegido contra descargas atmosféricas.

En la Figura 48, se muestra las esferas graficadas en color azul en las vistas laterales y frontal. Las esferas se encuentran tangentes a las puntas captadoras del rayo. La comprobación de la zona protegida se visualiza en color magenta, por lo que todas las estructuras de la planta están protegidas.

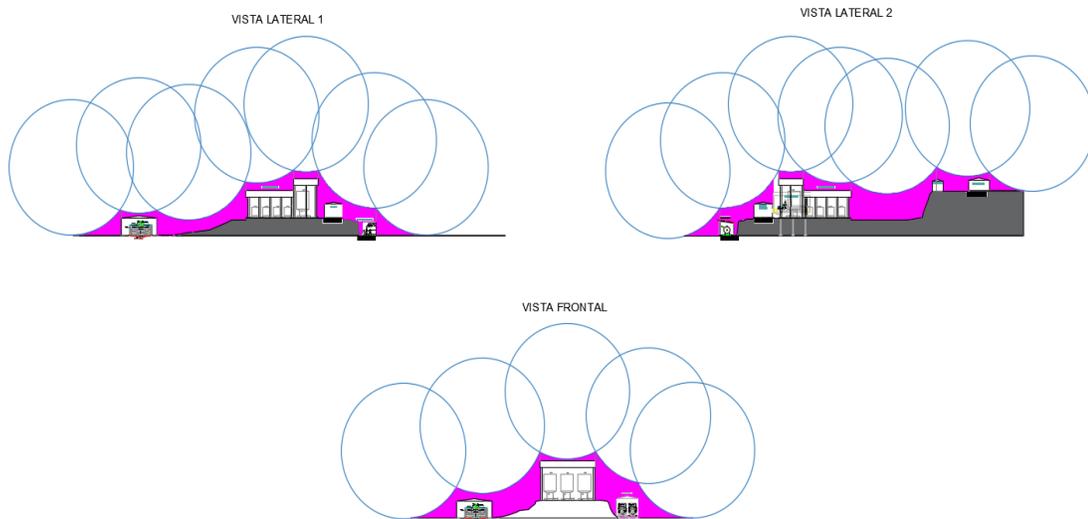


Figura 48. Vistas laterales y frontales de las zonas protegidas de la planta

CONCLUSIONES

La realización del estado del arte y revisión del contenido bibliográfico permitió determinar las actuales investigaciones y normativas referente a los sistemas de puesta a tierra y los tipos y métodos de protección contra descargas atmosféricas. Dentro de la normativa aplicable se usó la norma IEEE 80-2013 para conocer los límites de valores tolerables de paso, de contacto y GPR. Con respecto al diseño de la malla y mediciones de resistividad del suelo se interpretó los procedimientos de la norma IEEE 81. En relación al diseño del sistema de protección atmosférica se revisó la norma IEC-62350 en sus cuatro módulos y la norma NFPA 780. La investigación bibliográfica se centró en la comparación de los distintos trabajos investigativos en cuanto a la aplicación de los modelos matemáticos y técnicas de simulación para analizar el rendimiento de los sistemas de puesta a tierra, teniendo en el presente trabajo un exhaustivo análisis del método de elementos finitos para evaluar el sistema de puesta a tierra usando software el ETAP.

Para el análisis del rendimiento actual del sistema de puesta a tierra y el desarrollo de la propuesta se adquirió información general de la planta minera como la potencia eléctrica de la cámara de transformación 1 MVA de la planta minera, los elementos de seccionamiento en MT/BT, el aporte de cortocircuito de la red eléctrica de distribución y su relación X/R. Para los análisis específicos se realizó un levantamiento de los planos y su infraestructura física, teniendo que la planta dispone de 3 mallas a tierra que sirven como tierra de servicio para los neutros de transformadores y el grupo electrógeno, la malla de protección para el aterrizamiento de todas las masas metálicas y una tercera malla aislada para protección de descargas atmosféricas y descarga electrostática, dos de las mallas se encontraron equipotencializadas. Diversas mediciones tanto de la resistividad del suelo fueron obtenidas para comprobar que el suelo presenta es no uniforme con mediciones que aumentan la resistividad conforme aumenta la profundidad del terreno, acerca de la resistencia de cada una de las mallas a tierra fueron obtenidas con valores menores a 5Ω , sin embargo todas las geometrías

físicas de las mallas no presentan formas regulares, lo que hizo necesario aplicar el método de elementos finitos para su análisis.

Con respecto a la simulación para determinar el rendimiento de las mallas, al tener geometrías de malla no uniformes se usó el módulo de ETAP (Ground Grid) con la técnica de modelado de elementos finitos. Se ingresó los parámetros de resistividad medidos obteniendo un modelo de dos capas de la formación donde la primera capa tiene una resistividad de $75,68 \Omega\text{-m}$ hasta una profundidad de 3,45 m; mientras que en adelante la resistividad es de $331,68 \Omega\text{-m}$. Seguidamente con las geometrías de las mallas ya determinadas se calculó sus resistencias de puesta a tierra, obteniendo en cada una de ella valores menores a los 5Ω . Los demás valores que requiere el modelo son los valores de la corriente de tierra efectiva, que ingresa en cada malla se obtuvo analizando con la corriente de falla del sistema y su factor de separación, con los cuales se obtuvieron los valores de GPR, de paso y de contacto de cada malla. Realizando la comparación con los límites tolerables según IEEE-80, la Malla 1 generó el más alto voltaje de toque con 1823 V, el cual no supera el límite tolerable de voltaje de contacto de 988 V. La propuesta para reducir el voltaje de toque se planteó entre incrementar la extensión y cuadrícula de cobre de la malla o a su vez realizar la unión conductora equipotencial entre las tres mallas. Con esta equipotencialidad se logró obtener un voltaje de malla uniforme con un GPR de 2225 V y la reducción del voltaje de toque a 900 V ante una falla a frecuencia industrial 60 Hz.

Con respecto al diseño del sistema de protección atmosférica, mediante la investigación a la planta, se evidenció que no se cuenta con un sistema adecuado de protección ante descargas atmosféricas. Se evidenció por observación directa y medición que la estructura se encuentra aterrizada a la malla de tierra en varias columnas de la estructura. Debido a la naturaleza de los procesos, el uso de químicos y laboratorios de muestras, la planta requiere un nivel de protección NPR=1, que involucra el más alto nivel de protección contra descargas. Fue necesario adecuar un diseño completo que involucra dimensionar los equipos para de la protección externa y su protección interna. Con respecto a la protección externa se planteó mediante el método electrogeométrico

basado en las esferas rodantes el uso de puntas Franklin captadoras de rayo con sus mástiles ubicados en los 10 puntos estratégicos de la planta. El ensayo y modelado 3D permitió determinar que se cubren todas las áreas de la planta ante descargas atmosféricas, del mismo modo se evaluó que la propia estructura de la planta con sus columnas son hábiles para su uso como bajantes hacia la toma de tierra. La propuesta adicional radica en la construcción de tomas de tierra tipo pata de ganso para todos sus bajantes con el fin de tener una mejor disipación de las corrientes de rayo y la generación de una mejor distribución de potencial a tierra.

Acercas de la protección interna ante descargas atmosféricas, el elemento principal es el SPD que se determinó el tamaño y la ubicación después de dividir a la planta en las tres zonas de protección. Se usaron los 3 tipos de DPS, en los cuales un DPS combinado tipo 1 y 2 se usa en el tablero principal de distribución, un DPS tipo 2 se usa en el tablero de distribución secundaria y finalmente el DPS tipo 3 se usa en las cargas sensibles del laboratorio. El uso de un solo DPS no puede prevenir el daño causado por un rayo directo, por lo que se hace necesario colocar los 3 DPS de manera escalonada, las sobretensiones inducidas en la línea eléctrica son reducidas hasta valores soportables por el equipamiento y las cargas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a empresa implementar un programa de mantenimiento del sistema de puesta a tierra para preservar la equipotencialidad de sus elementos y de sus mallas. Del mismo la medición de la resistencia de puesta a tierra de manera anual y la aplicación de la equipotencialización de las mallas y la construcción de las tomas de tierra tipo pata de ganso mejorará el rendimiento ante fallas a frecuencia industrial como ante descargas atmosféricas.

Se recomienda realizar un estudio de la protección catódica a la puesta a tierra, debido a que a nivel superficial se tiene un suelo muy húmedo con resistividad baja. Con el pasar del tiempo las uniones de las partes metálicas de la estructura y los puntos de tomas de tierra y uniones equipotenciales puede tender a corroerse.

Con respecto a la aplicación de los DPS, se recomienda su colocación de manera escalonada en el sistema. Es muy necesario su implementación y también como es una industria grande y susceptible a eventos de sobretensiones por acoplamiento inductivo y resistivo se recomienda colocar junto con los DPS los contadores de eventos transitorios para saber las veces que los equipos DPS han realizado su trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Yebra, *Sistemas eléctricos de distribución*, vol. 01. Barcelona: Editorial Reverte, 2009. Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available: https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=miQuEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=libro+de+deteccion+de+fallas+en+sistemas+electricos&ots=1aOsTVMiFi&sig=kvnIJMGiRe_siTuy6X9aqpTOsMY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [2] F. S. Canales Pérez, “Nociones Específicas para Puesta a Tierra en Instalaciones Mineras,” 2011, Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104264>
- [3] H. Vergaray Lozano, “Evaluación y mejoras de la puesta a tierra y protección contra rayos en el campamento de la compañía Minera San Simón,” Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2012. Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available: <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3260463>
- [4] M. M. Warnakulasuriya, H. M. Yasod Yushmika, P. A. Andrahennadi, and A. S. Rodrigo, “Design of Complex Grounding System in Uniform or Non-uniform Soil Structure: Development of Grounding Design Software,” in *2022 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn)*, IEEE, Jul. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/MERCOn55799.2022.9906254.
- [5] D. Morales, “Estudio de potencial eléctrico alrededor de un electrodo de puesta a tierra en un suelo de varias capas mediante el método de elementos finitos,” Escuela Politecnica Nacional, Quito, 2018. Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19741>
- [6] R. Lozano, “Optimización del diseño de puestas a tierra, utilizando elementos finitos en la SET constitución,” *Universidad Nacional del Centro del Perú*, 2020, Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6206>

- [7] R. Salazar, D. Monga, C. Changoluisa, D. Jiménez, and X. Proaño, “Determinación de los parámetros de un sistema de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico planteando un caso de expansión en una central de generación distribuida,” *Revista Técnica “energía,”* vol. 19, no. 1, pp. 34–41, Jul. 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.514.
- [8] P. Otero, S. Peñafiel, D. Vallejo, N. Granda, and J. Ramírez, “Simulación de Mallas de Puesta a Tierra Utilizando el Método de los Elementos Finitos en Tres Dimensiones,” *Revista Técnica “energía,”* vol. 17, no. 2, pp. 113–123, Jan. 2021, doi: 10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.437.
- [9] A. M. Hassan, E. N. Abdallah, and N. H. Abbasy, “Design and simulation of interconnected A.C substation grounding grid in oil & gas industries,” in *2012 Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers*, IEEE, Mar. 2012, pp. 188–193. doi: 10.1109/JEC-ECC.2012.6186981.
- [10] S. Chen, Y. Zhang, M. Zhou, X. Yan, W. Lyu, and D. Zheng, “Transient Response of Surge Protective Devices During the Potentials Transferred Between Independent Grounding Grids,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 2, pp. 630–638, Apr. 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2918713.
- [11] M. Reffin, N. Nor, N. Ahmad, and S. Abdullah, “Performance of Practical Grounding Systems under High Impulse Conditions,” *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 11, p. 3187, Nov. 2018, doi: 10.3390/en11113187.
- [12] M. Castro, S. Suárez, F. De Armas, and S. M. Dorta, “Niveles de aterramiento y rayo: simulación de sus efectos sobre el consumidor,” vol. XXVII, no. 1, 2006.
- [13] J. V. Revelo Soto, “Análisis del comportamiento de los electrodos de puesta a tierra ante altas frecuencias, aplicación a descargas atmosféricas,” Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020.

- [14] H. Gómez, E. Hernández, G. Moreno, and J. Valencia, “Respuesta transitoria de las puestas a tierra en la protección contra rayos. Software GTIERRAS,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 2005.
- [15] S. Braide, U. Chukwuma, and D. Idoniboyeobu, “Improved Lightning Protection for Low Voltage Power System using Equipotential Bonding Technique,” *American Journal of Engineering Research*, vol. 10, pp. 178–188, Jul. 2021.
- [16] K. Luewattana and P. Rattanasena, “Investigation of overvoltage on square, rectangular and L-shaped ground grids of high voltage substations by ATP/EMTP,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 11, no. 6, p. 4689, Dec. 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i6.pp4689-4697.
- [17] N. Bayramoglu, B. Esenboga, I. O. Aksu, and T. Demirdelen, “The Development of Lightning Protection and Grounding Systems: A Survey,” *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 54–60, May 2021, doi: 10.5152/tepes.2021.21015.
- [18] J. Capitan, “‘Protección Contra Descargas Atmosféricas y Sistema de Puesta a Tierra de Protección’ - Coca-Cola Andina Argentina,” *Universidad Nacional de Córdoba*, 2015.
- [19] J. Lujan, “ANÁLISIS DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO BASADOS EN LAS RECOMENDACIONES DE LA NFPA 780 PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA UBICADO A LA INTEMPERIE MEDIANTE PARARRAYOS TIPO FRANKLYN,” *Universidad Tecnológica del Perú*, Lima, 2018.
- [20] I. M. Y. Negara, D. Fahmi, D. A. Asfani, I. S. Hernanda, R. B. Pratama, and A. B. Ksatria, “Investigation and Improvement of Standard External Lightning

- Protection System: Industrial Case Study,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 14, p. 4118, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14144118.
- [21] A. Urgena and E. Elwell, “Designing Optimum Substation Lightning Shield Protection,” in *2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, IEEE, Oct. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/TD39804.2020.9299946.
- [22] T. E. Tsovilis, “Critical Insight Into Performance Requirements and Test Methods for Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 5, pp. 3055–3064, Oct. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3032763.
- [23] V. Mercado, J. Peña, and L. Pacheco, “Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra,” *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, 2017, Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/5075/507555007009/html/>
- [24] “IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment,” *IEEE Std 1100-2005 (Revision of IEEE Std 1100-1999)*, pp. 1–703, 2006, doi: 10.1109/IEEESTD.2006.216391.
- [25] “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,” *IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)*, pp. 1–98, 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486.
- [26] G. Malagón-Carvajal, W. Giraldo-Picón, G. Ordoñez-Plata, and J. C. Chacón, “Prácticas CEM enfocadas en la mitigación del Impulso Electromagnético del Rayo (IER): Earthing and Bonding; un enfoque de la IEC 62305,” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 26, no. 4, p. 13, Dec. 2013, doi: 10.18845/tm.v26i4.1577.
- [27] “International Standard - Protection against lightning,” *IEC62305 - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION*, 2010.

- [28] V. Mercado Polo, J. B. Peña, and L. Pacheco, “Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra,” *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, no. 2, pp. 167–176, 2017, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555007009>
- [29] ABB, “Transient overvoltage protection to IET wiring regulations 17th edition (BS 7671:2008+A1:2001),” *ABB - IET Wiring Regulations 17th Edition (BS 7671)*, 2012.
- [30] Procobre, *Sistemas de Puesta a Tierra*. 2010.
- [31] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” *IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)*, pp. 1–226, 2015, doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078.
- [32] T. R. Ayodele, A. S. O. Ogunjuyigbe, and O. E. Oyewole, “Comparative assessment of the effect of earthing grid configurations on the earthing system using IEEE and Finite Element Methods,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 970–983, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.JESTCH.2018.07.003.
- [33] K. Bhumkittipich, B. Topradith, and T. Suwanasri, “Analysis of Lightning Phenomena for Underground Petroleum Pipeline System,” *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 148–158, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.743.
- [34] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, and H. J. Christian, “LIS 0.1 Degree Very High Resolution Gridded Lightning Climatology Data Collection,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, no. 11. NASA Global Hydrology Resource Center DAAC, Huntsville, pp. 2051–2068, Nov. 01, 2016. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00193.1.
- [35] M. Zurita, “MAPA ISOCERÁUNICO GEORREFERENCIADO PARA LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES FRENTE A

- DESCARGAS ATMOSFÉRICAS,” Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2020.
- [36] C. Bouquegneau, “A critical view on the lightning protection international standard,” *J Electrostat*, vol. 65, no. 5–6, pp. 395–399, May 2007, doi: 10.1016/j.elstat.2006.09.009.
- [37] V. Grisales García and J. Moriano Cadena, “Diseño de un sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas: Caso bloque E de la Universidad Tecnológica de Pereira,” Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2013.
- [38] EEQ, “WEBGIS,” 2023. <https://geoportal.eeq.com.ec/webgis/> (accessed May 30, 2023).
- [39] L. Abril and F. Azogue, “Diseño y modelado del sistema de puesta a tierra y apantallamiento para la Estación Cotopaxi del Instituto Geográfico Militar.,” Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2021.
- [40] EPM, “Norma Técnica: selección de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS),” Medellín, 2019.
- [41] EPM, “ESPECIFICACIÓN TÉCNICAS PARA DESCARGADORES DE SOBRETENSIONES DPS EN MEDIA TENSIÓN,” Medellín, 2015.
- [42] Siemens, “Lightning current and overvoltage protection device,” 2010.
- [43] M. Mitolo, “On the New Terminology Introduced in Std. IEEE P3003.2 ‘Recommended Practice for Equipment Grounding and Bonding in Industrial and Commercial Power Systems,’” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 52, no. 2, pp. 1221–1225, 2016, doi: 10.1109/TIA.2015.2483706.

ANEXO 1

DIAGRAMA UNIFILAR PLANTA FLOTACIÓN

ANEXO 2

APLICATIVO GESTIÓN DE RIESGOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS



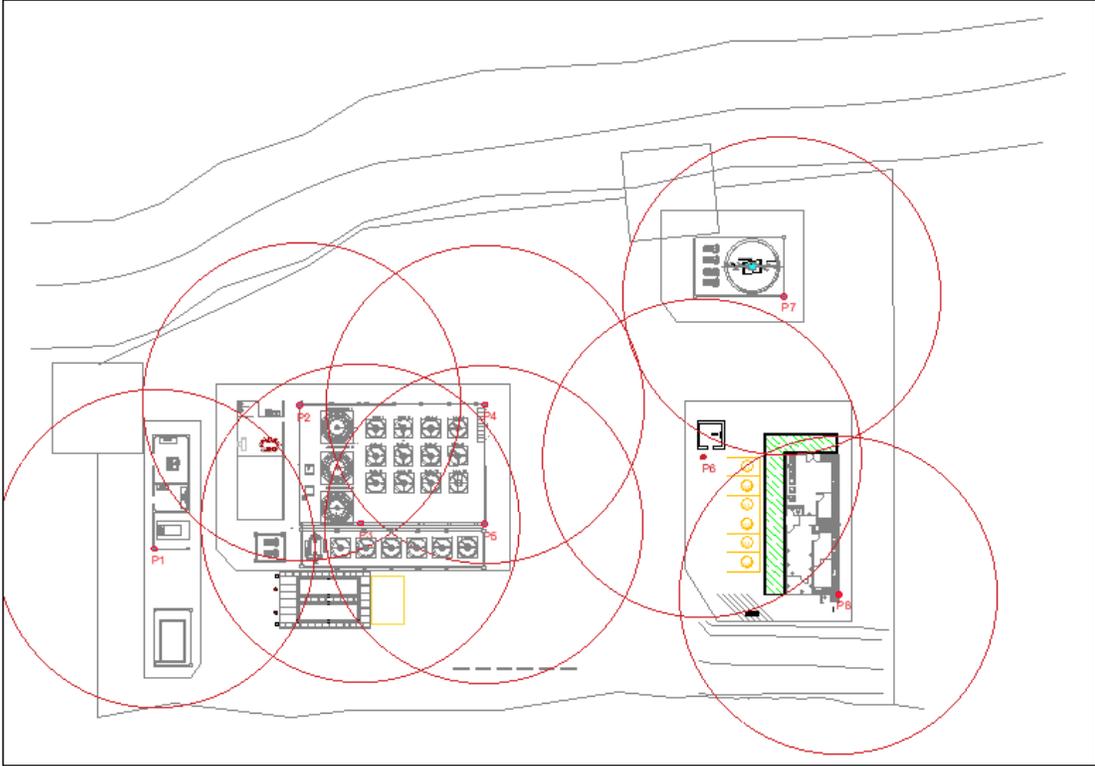
Diseñado por Ing. Gregor Rojas
Caracas-Venezuela

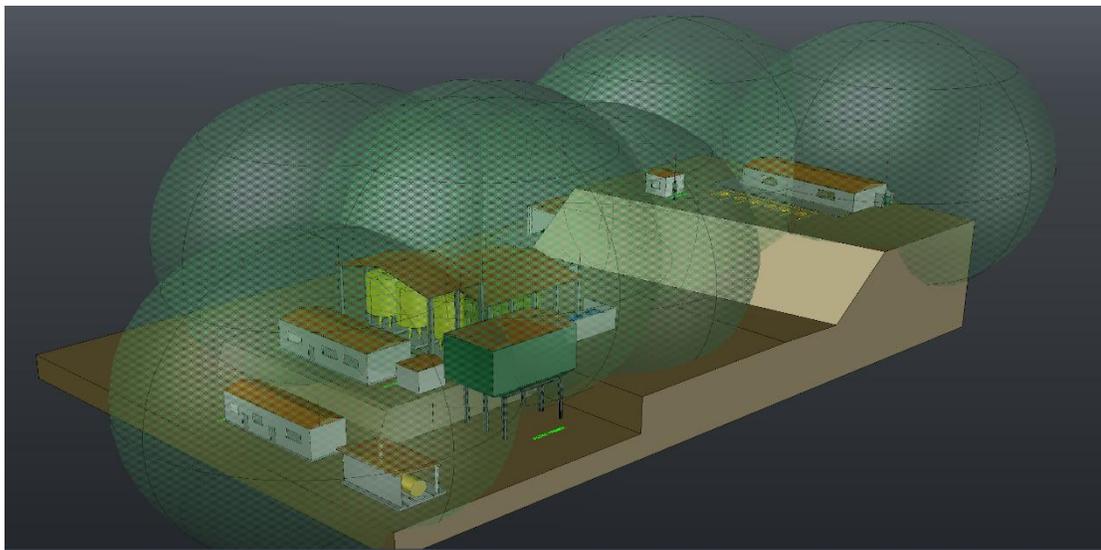
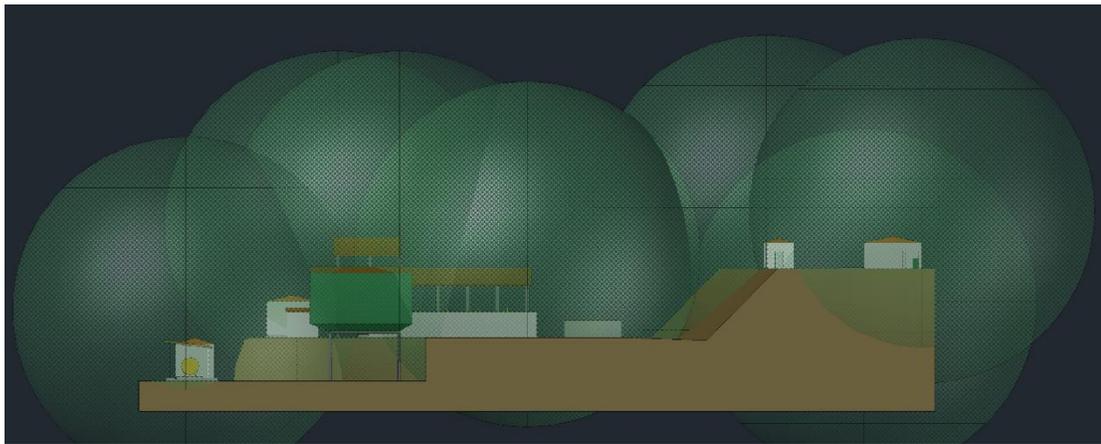
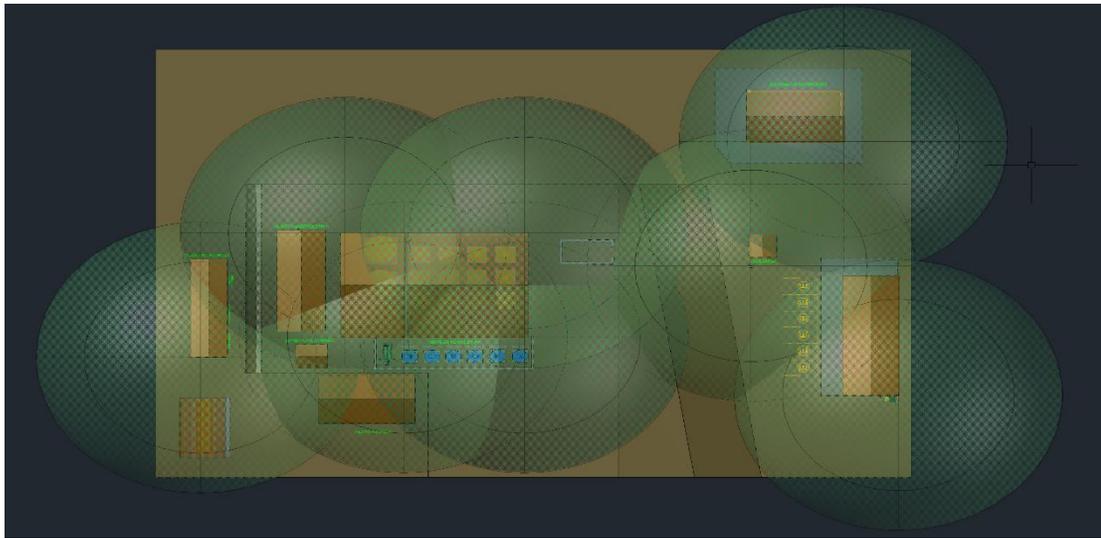
PROGRAMA DE CÁLCULO DEL RIESGO POR DESCARGAS ATMOSFERICAS BASADO EN IEC 62305-2 2006

CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA			
L	Ingrese el largo de la estructura L (m)	89	--
W	Ingrese el ancho de la estructura W (m)	59	--
H_s	Ingrese la altura máxima de la estructura H (m)	13	--
	Marque si la estructura posee parte sobresaliente.	<input checked="" type="checkbox"/>	## Imagen de estructura
H_p	Ingrese la altura máxima de la estructura sobresaliente H_p (m)	5	--
Cd/b	Seleccione la ubicación de la estructura	Rodeado por objetos o árboles de la misma o menor altura ▾	
Ce	Seleccione el ambiente donde se localizan las acometidas	Rural ▾	
r_o	Seleccione el tipo de suelo existente en el interior	Agrícola, hormigón ▾	
r_a	Seleccione el tipo de terreno existente en el exterior	Agrícola, hormigón ▾	
N_g	Ingrese la densidad de descargas atmosféricas a tierra (Rayos/km ² -año)	5	--
DDT	Mapa de Venezuela con densidad de descargas atmosféricas a tierra	Mapa y tabla con valores de referencia (DDT)	
CARACTERÍSTICAS DE LOS SERVICIOS			
ACOMETIDA DE POTENCIA			
	Marcar si la acometida de potencia proviene de una estructura adyacente	<input type="checkbox"/>	Imagen de estructura adyacente
L_a	Ingrese la longitud de la estructura adyacente L_a (m)	0	--
W_a	Ingrese el ancho de la estructura adyacente W_a (m)	0	--
H_a	Ingrese la altura de la estructura adyacente H_a (m)	0	--
ρ	Resistividad del suelo ρ (Ωm) (Considerar hasta un máximo de 500 Ωm)	200	--
Cd/a	Seleccione como es el lugar donde se encuentra el servicio	Aislado sin otros objetos en las proximidades ▾	
	Seleccione el tipo de la acometida	<input checked="" type="radio"/>	Aérea <input type="radio"/> Enterrada o Subterránea
H_c	Ingrese la altura de los conductores del servicio sobre el terreno H_c (m)	13	--
L_c	Ingrese la longitud de la acometida de servicio L_c (m)	15	--
ACCIONES PREVENTIVAS FRENTE AL RIESGO POR RAYO			
Marque las medidas adoptadas frente a los voltajes de paso y contacto (P _A)			
	Sin medidas de protección	<input checked="" type="checkbox"/>	Colocación de avisos o señalizaciones de advertencia <input type="checkbox"/>
	Aislamiento eléctrico de conductores expuestos (Bajantes)	<input type="checkbox"/>	Empleo de refuerzos estructurales (Cabillas) como bajantes <input type="checkbox"/>
	Equipotencialización efectiva del terreno	<input type="checkbox"/>	DPS previstos de conexión equipotencial (IEC 62305-3) <input type="checkbox"/>
Seleccione el nivel de protección de la estructura utilizado contra rayos (P _B)			
	No protegida por un SPCR (Sistema Protección Contra Rayo)	<input checked="" type="radio"/>	Protegida por un SPCR Nivel I <input type="radio"/>
	Protegida por un SPCR Nivel IV	<input type="radio"/>	Protegida por SPCR Nivel I y cabillas como bajantes <input type="radio"/>
	Protegida por un SPCR Nivel III	<input type="radio"/>	SPCR completo, techo metálico con armaduras metálicas continuas actuando como conductores de bajada <input type="radio"/>
	Protegida por un SPCR Nivel II	<input type="radio"/>	
Seleccione el nivel de protección interno utilizado contra sobrevoltajes (P _C)			
	Sin protección coordinada de dispositivos DPS	<input checked="" type="radio"/>	Protección interna coordinada con DPS Nivel I <input type="radio"/>
	Protección interna coordinada con DPS Nivel III o IV	<input type="radio"/>	Utilización de DPS con mejores características al Nivel I <input type="radio"/>
	Protección interna coordinada con DPS Nivel II	<input type="radio"/>	NOTA: Los DPS son Dispositivos Protección Contra Sobrevoltajes <input type="checkbox"/>
Seleccione el tipo de cableado interno			
K₉₃	Sin apantallar y sin precauciones de cableado para evitar bucles, área del lazo en el orden de 50 m ²	<input checked="" type="radio"/>	
K₉₃	Sin apantallar y con precauciones de cableado para evitar grandes bucles, área del lazo en el orden de 10 m ²	<input type="radio"/>	
K₉₃	Sin apantallar y con precauciones de cableado para evitar bucles, área del lazo en el orden de 0,5 m ²	<input type="radio"/>	
K₉₃	Apantallado con resistencia de la pantalla entre 5<R _s <20 Ω/Km, puesta a tierra en ambos extremos a la barra equipotencial	<input type="radio"/>	
K₉₃	Apantallado con resistencia de la pantalla entre 1<R _s <5 Ω/Km, puesta a tierra en ambos extremos a la barra equipotencial	<input type="radio"/>	
K₉₃	Marque la casilla si la pantalla del cable esta conectada en ambos extremos a la barra equipotencial donde se conecta el equipo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
K₉₁	Si la estructura a proteger posee pantallas metálicas continuas de espesor entre 0,1 mm y 0,5 mm marque la casilla	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
w	Ancho de la malla de la pantalla espacial o malla de conductores de bajada o distancia entre columnas metálicas cuando actúan como SPCR natural w (m)	0,03	--

ANEXO 3

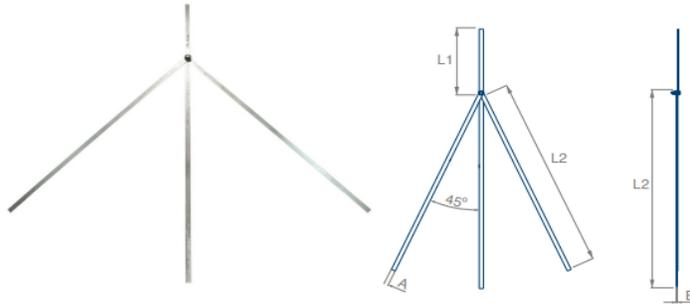
DISPOSICIÓN DE PUNTAS CAPTADORAS DE RAYOS





ANEXO 4

KIT TOMA DE TIERRA PATA DE GANSO



► KIT PARA TOMA DE TIERRA PATA DE GANSO

Kit de toma de tierra de pata de ganso de acero galvanizado o cobre estañado (1'5m y 3m).

► aplicaciones

Electrodo de tierra recomendado para terrenos de alta resistividad. Resulta adecuado, cuando bajo una capa de tierra de poco espesor existen estratos rocosos.

► características y beneficios

- Fabricado en acero galvanizado o cobre estañado.
- Electrodo de 1'5 y 3m.
- Fácil transporte gracias a su mecanismo de plegado.
- Fácil conexión al sistema de protección externa contra el rayo.
- Fácil instalación

► instalación

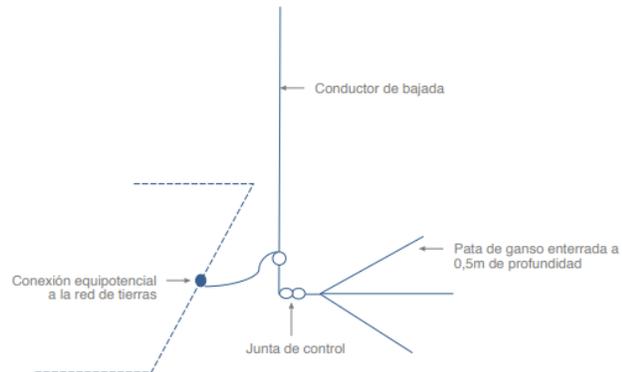
Realizar una zanja en el suelo de 50cm de profundidad y extensión suficiente para instalar los electrodos de forma horizontal. Los tres electrodos deben desplegarse y separarse entre sí un ángulo de 45°.

Rellenar la perforación añadiendo capas alternativas de compuesto mineral QUIBACSOL y tierra de relleno (utilizar tierra vegetal cuando la tierra extraída no ofrezca un nivel adecuado de conductividad).

Compactar el terreno procurando que la tierra de relleno y el QUIBACSOL aseguren un buen contacto con los electrodos.

Instalar un sistema de registro (arqueta y puente de comprobación) que permita realizar futuras revisiones.

► esquema de montaje



► normativas y ensayos

· IEC 62305 · N-FC 17.102:2011 · UNE 21186:2011 · IEC 62561/2

► especificaciones técnicas

Descripción	Ref.	Mat.	L1 (mm)	L2 (mm)	A (mm)	E (mm)	Peso (kg)
Kit pata de ganso ac. galv. l:1500mm	252034	ac.galv.	1500	1500	30	3	4,5
Kit pata de ganso ac. galv. l:3000mm	252035	ac.galv.	3000	3000	30	3	8,3
Kit pata de ganso Cu Sn l:1500mm	252051	CuSn	1500	1500	30	2	4,3
Kit pata de ganso Cu Sn l:3000mm	252052	CuSn	3000	3000	30	2	8,1

ANEXO 5

CONSTANCIA DE APROBACIÓN Y PUBLICACIÓN



Revista Latinoamericana de
Ciencias Sociales y Humanidades

Constancia de Aprobación

Por medio de la presente se da constancia que el artículo de investigación titulado *Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera* de los autores *Jefferson Marcelo Orbea Garcia, Edgar Roberto Salazar Achig y Carlos Iván Quinatoa Caiza* ha sido aprobado para su publicación en el Vol. IV, Número 2, en la Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, con ISSN en línea: 2789-3855, indexada en Latindex Catálogo 2.0, LatinRev, Livre, REBID, entre otros.

El artículo ha sido evaluado y aprobado mediante el sistema de evaluación por pares de doble ciego (*double-blind peer review*), y la revisión anti plagio vía software de índice de similitud, cumpliendo con los estándares de aprobación establecidos por el Comité Editorial.

Se expide la presente constancia a los 30 días del mes de junio del año 2023.

Podrá verificarse la publicación del artículo accediendo a <https://latam.redilat.org/>

Dr. Anton P. Baron
Editor en Jefe LATAM



Red de Investigadores Latinoamericanos



Constancia publicación

Por medio de la presente se da constancia que el artículo de investigación titulado *Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera* de los autores *Jefferson Marcelo Orbea Garcia, Edgar Roberto Salazar Achig y Carlos Iván Quinatoa Caiza*, ha sido publicado en el Vol. IV, Número 2, de la Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, con ISSN en línea: 2789-3855, indexada en Latindex Catálogo 2.0, LatinRev, Livre, REDIB, entre otros.

El artículo cuenta con Digitan Object Identificador en el cual se podrá verificar la publicación <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.838>
Se expide la presente constancia a los 15 días del mes de julio del año 2023.



Dr. Anton P. Baron
Editor en Jefe LATAM



Red de Investigadores Latinoamericanos

