

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.838>

## **Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera**

Analysis of the protection system for grounding and electrical shielding in a mining plant

**Jefferson Marcelo Orbea Garcia**

tbi.orbea.garcia.jefferson@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-9371-0296>

Universidad Técnica de Cotopaxi

Cotopaxi – Ecuador

**Edgar Roberto Salazar Achig**

edgar.salazar7619@utc.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-4770-1181>

Universidad Técnica de Cotopaxi

Cotopaxi – Ecuador

**Carlos Iván Quinatoa Caiza**

carlos.quinatoa7864@utc.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6369-7480>

Universidad Técnica de Cotopaxi

Cotopaxi – Ecuador

Artículo recibido: 30 de junio de 2023. Aceptado para publicación: 15 de julio de 2023.

Conflicto de intereses: Ninguno que declarar.

### **Resumen**


La presente 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 1823 V superando el límite tolerable de 988 V según IEEE-80. Se realizan las propuestas de equipotencialización de las mallas y analizando 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

## Abstract

The present research work deals with the analysis of the grounding protection and surge protection in the flotation plant of the Minera Agroindustrial El Corazón. The proposal arises from the need of the electrical department to identify disturbances and verify the correct operation of the grounding system (SPT) and the evaluation of the feasibility and design of a surge protection system. The SPT was studied with measurements of soil resistivity, geometry and resistance of the three meshes. A 2-layer soil model is established in the ETAP software, the geometries of each bag are loaded and the finite element technique is applied to obtain the resistance, touch and step voltages. The simulation shows that Mall 1 generates a touch voltage of 1823 V, which exceeds the IEEE-80 tolerable limit of 988 V. Proposals for bonding the meshes are made and graphs of potential gradients are analyzed. With the adjustments, equipotentiality is achieved throughout the installation and a maximum step voltage of 900V and a uniform potential distribution are obtained. Regarding the sizing of the lightning protection system, the risk level NPR=1 was determined. For external protection, the electrogeometric method of rotating spheres is used, placing sensor tips at different points of the plant, determining the bottoms and ground connections of the goose foot type to drain lightning currents. From the internal protection, the SPDs for medium voltage are studied and the SPDs types 1 and 2 combined, Type 2 and Type 3 are made on the MV side, which are installed in the determined low voltage areas.

*Keywords:* grounding system, finite elements, etap software, electrical shielding

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons . 

Como citar: Orbea Garcia, J. M., Salazar Achig, E. R., & Quinatoa Caiza, C. I. (2023). Análisis del sistema de protección de puesta a tierra y apantallamiento eléctrico en una planta minera. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 4(2), 3321–3339. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.838>

## **INTRODUCCIÓN**

La importancia de los sistemas de puesta a tierra y apantallamiento en las centrales de generación a nivel mundial se basa en la pronta reacción ante eventualidades como el rayo o sobrevoltajes que afecten al funcionamiento de los equipos instalados, sobre todo en este tipo de generadoras que buscan mantener su continuidad en el proceso de transformación de energía. Para de esta forma hacerlo confiable, seguro, selectivo y tan rápido como sea necesario.

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.

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 sí resguardará la integridad de las personas y los equipos.

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 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 en el sistema eléctrico.

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 sólo al aumento de voltaje a tierra que se tiene durante una falla, sino a la corriente y su duración a través de ella. 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. También 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.

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 la efectividad del sistema de puesta a tierra y su rendimiento se plantea al comparar los valores obtenidos con los estándares admitidos bajo la normativa IEEE-80.

### METODOLOGÍA

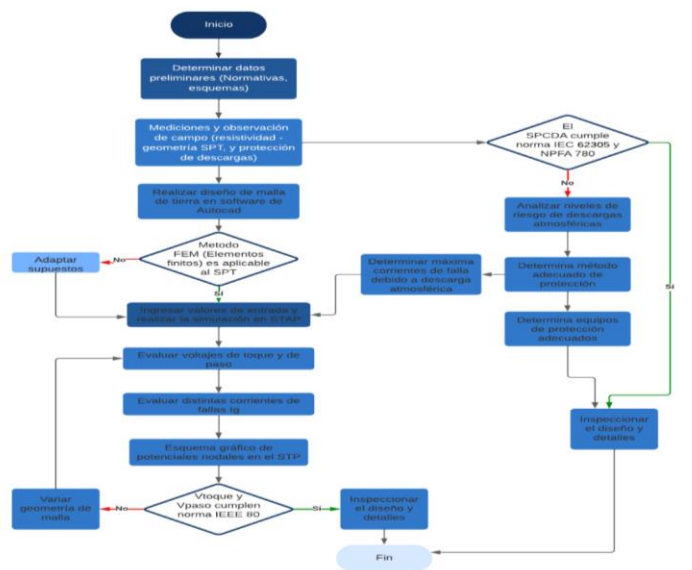
La presente investigación es descriptiva, la cual especifica el rendimiento del sistema de puesta a tierra de la planta minera en base a determinadas características e información medida y calculada. En base a ello se interpreta la influencia de los parámetros variables que afectan el sistema de puesta 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 los paquetes de análisis de transientes y evaluación del sistema y parámetros de puesta a tierra de ETAP.

**Figura 1**

*Diagrama de Flujo del Proceso de Investigación*



Los métodos y técnicas de investigación son fundamentales e indispensables para el desarrollo del presente estudio. A continuación, presentamos la metodología que se utilizó para obtener los resultados.

### **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.

### **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.

### **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.

### **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.

### **Investigaciones utilizadas**

#### **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.

#### **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.

### **Técnicas e instrumentos**

#### **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.

### 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.

### 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 en cambios a las variables de 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.

### RESULTADOS

#### 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 1**

*Resultados de mediciones y cálculos de las mallas de SPT de la planta*

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

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

### 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  $\Omega$ -m y mientras se profundiza tiende a ser pedregoso con valores de 300 – 500  $\Omega$ -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 x 40 metros. El espesor y la profundidad del estudio que realizamos dependen de la distancia de separación a (m) de los electrodos. La resistencia obtenida R ( $\Omega$ ) representa la resistencia del suelo a las profundidades h (m) expresados en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Relación distancia entre electrodos vs Profundidad suelo y resistencia*

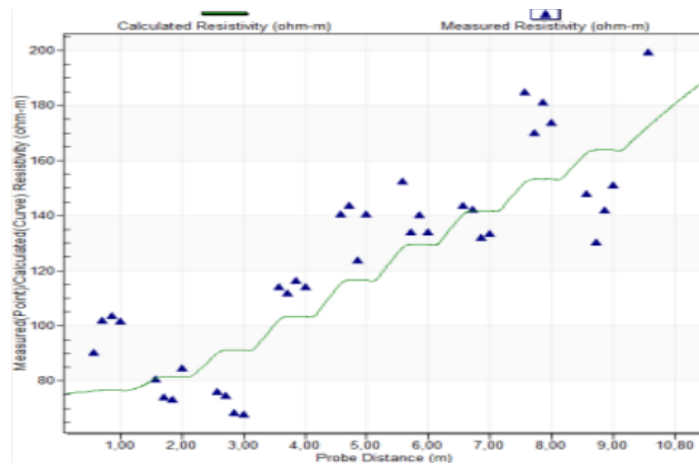
Distancia a (m)	Resistencia promedio R ( $\Omega$ )	Profundidad h (m)
1	13,6	0,8
2	9,8	1,5
3	4,8	2,3
4	4,1	3,0
5	4,4	3,8
6	4,0	4,5
7	3,4	5,3
8	3,3	6,0
9	3,0	6,8
10	2,7	7,5

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 siguiente figura. 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  $\rho_1 = 75,68$  ( $\Omega$ -m) hasta una profundidad de 3,45 metros y de  $\rho_2 = 331.68$  ( $\Omega$ -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 2**

Valores medidos y cálculo de la resistividad de la formación usando ETAP



**Resultados del análisis de las mallas**

A través de los resultados obtenidos, observamos que cada una de las mallas actuando de manera individual tiene una resistencia bajo los 5 Ω, 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 3**

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

	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 1 y 2	LÍMITE 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 3, 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 encuentran 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 244,9V y el GPR de 3383V. 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.

**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 obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 26, se muestra la disminución del voltaje de toque por debajo de límites tolerables.

**Tabla 4**

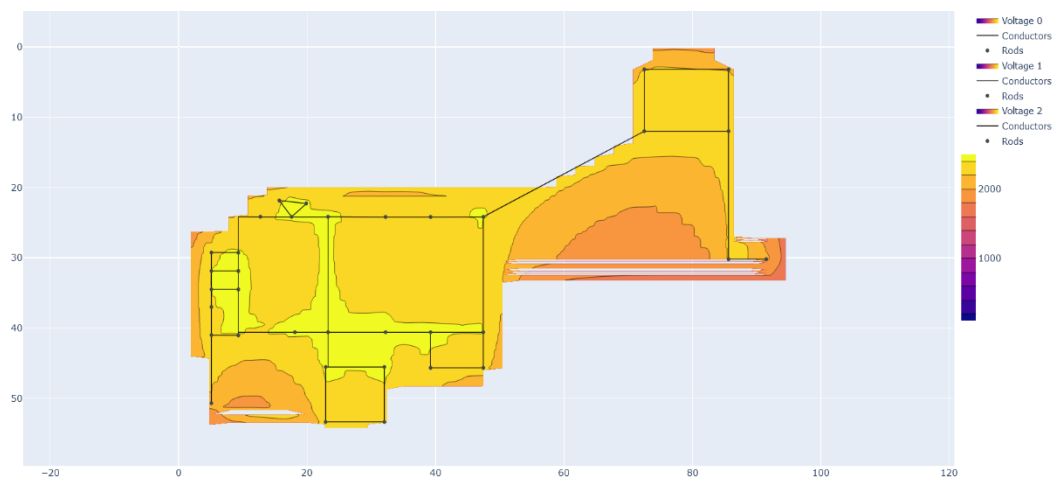
*Datos de voltaje de toque, de paso y GPR para el SPT equipotencializado*

	<b>Malla 1, 2, 3</b>	<b>LÍMITE TOLERABLES</b>
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 3, 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 3 se muestra el perfil de voltaje en 3D donde se visualiza un voltaje uniforme de potencial sobre los 2000 voltios. 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 4.

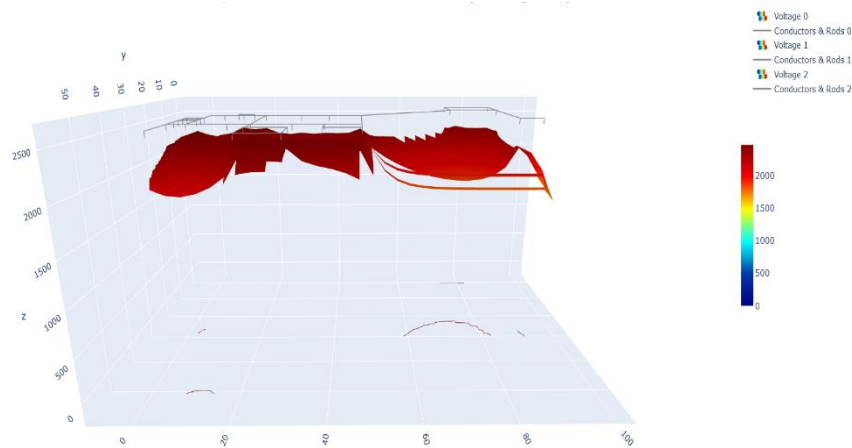
**Figura 3**

*Perfil de potencial absoluto en 2D de la malla equipotencializada*



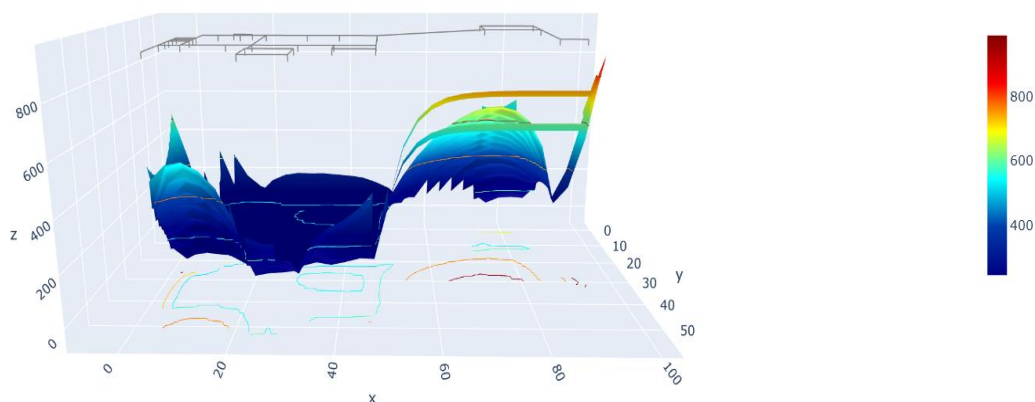
**Figura 4**

*Perfil de potencial absoluto en 3D de la malla equipotencializada*



**Figura 5**

*Perfil de voltaje de toque en 3D de la malla equipotencializada*

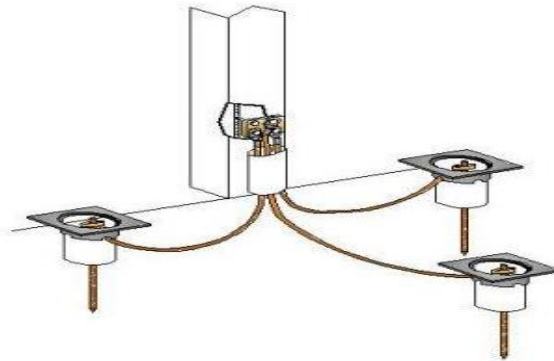


### **Del mejoramiento de la malla de puesta a tierra para descargas atmosféricas**

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, ésta 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 5.

**Figura 6**

*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 la corriente más severa que circulará por la malla a tierra y tendrá que drenarse hacia el suelo, en el software ETAP se tiene los siguientes resultados.

**Tabla 5**

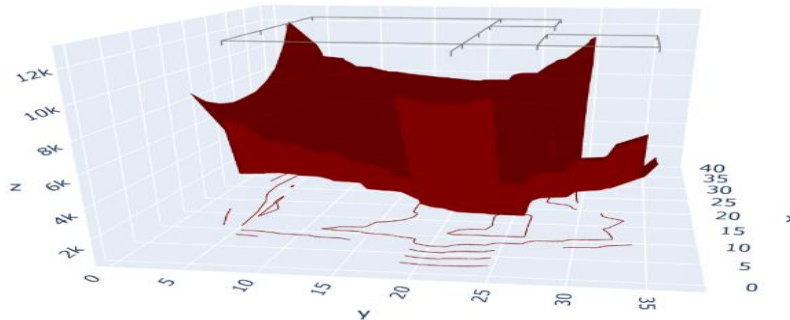
*Datos de voltaje de toque, de paso y GPR para el SPT de la malla ante descarga atmosférica 20 KA*

	<b>Malla 2</b>	<b>LÍMITE TOLERABLES</b>
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 7**

*Perfil de voltaje de toque en 3D de la malla 2 ante descarga atmosférica 20 KA*

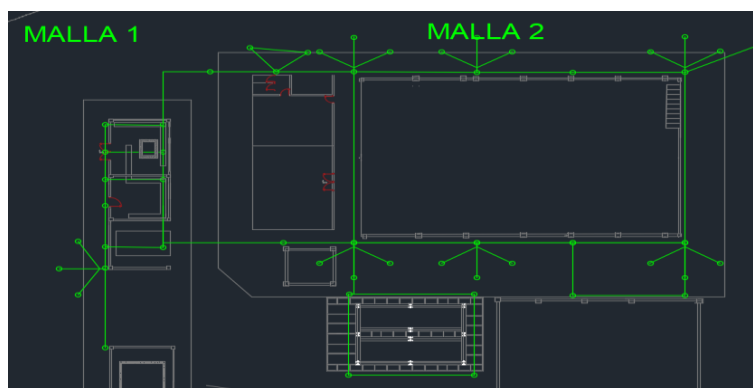


**Análisis del sistema de malla de SPCDA con toma de tierra**

Al realizar el aterrizamiento por la toma de tierra de pata de ganso en cada columna bajante como muestra la figura 7.

**Figura 8**

*Ubicación de las tomas de tierra pata de ganso en la Malla 2 y demás bajantes*



**Tabla 6**

*Datos de voltaje de toque, de paso y GPR para el SPT de la malla con tomas pata ganso ante descarga atmosférica 20 KA*

	<b>Malla 2</b>	<b>LÍMITE TOLERABLES</b>
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 3.04 Ω. 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.

### 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.

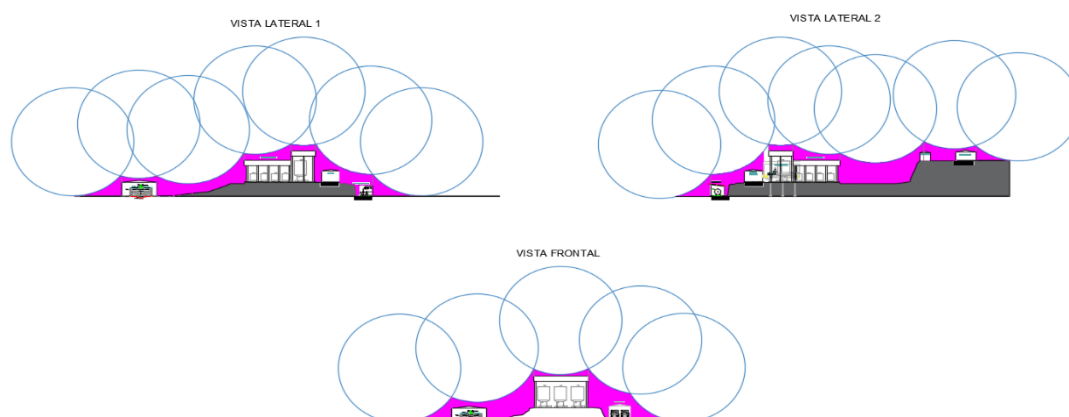
### Evaluación del método electrogeométrico

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 muestran 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 9

*Vistas laterales y frontales de las zonas protegidas de la planta*



### DISCUSIÓN

La presente investigación tuvo como objetivo general realizar un análisis del 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. Se planteó un análisis integral al sistema actual de puesta a tierra de la nueva planta de producción de la empresa minera. La

recopilación de información de la construcción de la malla de tierra existente, así como el estudio de la resistividad del terreno, nos sirvió para realizar el diseño de la malla en AutoCAD e ingresar los valores al software ETAP en el cual se realizó una simulación empleando los modelos del método de elementos finitos. Se analizó los resultados de las condiciones actuales comparando con los valores requeridos en la norma IEEE-80-2013 [31]; estableciendo las propuestas de mejora a la malla de tierra y simulando con las variaciones al sistema.

Como parte complementaria se diseñó el sistema de apantallamiento de la planta, mediante 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 deja en proyección otras propuestas como implementar un programa de mantenimiento del sistema de puesta a tierra para preservar la equipotencialidad de sus elementos y de sus mallas. Así como también, realizar un estudio de y protección catódica a la puesta a tierra, debido a que a nivel superficial se tiene un suelo húmedo con resistividad baja y con el pasar del tiempo la malla puede tender a corroerse.

### **CONCLUSIÓN**

La realización del estado del arte y revisión del contenido bibliográfico permitió determinar las actuales investigaciones y normativas referentes 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 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 y de la malla se requiere 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 80. La investigación bibliográfica se centró en los análisis 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 usando software como el ETAP.

Para el análisis del rendimiento actual del sistema de puesta a tierra y el desarrollo de la propuesta se requirió adquirir la mayor cantidad de información de la planta minera. Se procedió a realizar un levantamiento de la información eléctrica de la planta como la cámara de transformación con sus elementos, la distribución y geometría de las tres mallas a tierra existentes y se obtuvieron mediciones de la resistividad del suelo y la resistencia de cada malla mencionada.

Con respecto a la simulación para determinar el rendimiento de la malla, 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, se cargó la geometría de las mallas a tierra para analizar la resistencia calculada, obteniendo en cada una de ella valores menores a los  $5 \Omega$ ; demás parámetros como la corriente de falla a tierra, el factor de separación y la duración de la falla permitieron obtener los valores de GPR, de paso y de contacto que comparando con los límites tolerables la Malla 1 es la malla que no supera el límite tolerable de voltaje de contacto. La propuesta para reducir el voltaje de toque se planteó entre incrementar la extensión y cuadrícula de cobre de la malla 1 o a su vez realizar la unión conductora equipotencial entre las tres mallas. Con esta equipotencialidad se logró obtener un voltaje de malla uniforme ante una falla a frecuencia industrial 60 Hz y reducir los voltajes de toque y paso por debajo de los valores tolerables.

Con respecto al diseño del sistema de protección atmosférica, mediante la investigación a la planta, se evidenció que no se cuenta con el sistema. Debido a la naturaleza de los procesos, el uso de químicos y laboratorios de muestras se requirió un nivel de protección NPR=1, que involucra el más alto nivel de protección contra descargas. Fue necesario el diseño completo tanto de la protección externa como 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 en sus columnas se usa como bajantes hacia la toma de tierra de forma pata de ganso para una mejor disipación de las corrientes de rayo y la generación de una mejor distribución de potencial a tierra.

Acerca 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 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. Si bien es cierto un solo DPS no puede prevenir el daño causado por un rayo directo, pero al 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.

## REFERENCIAS

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.

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.

ABB, "Transient overvoltage protection to IET wiring regulations 17th edition (BS 7671:2008+A1:2001)," ABB - IET Wiring Regulations 17th Edition (BS 7671), 2012.

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.

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>

EEQ, "WEBGIS," 2023. <https://geoportal.eeq.com.ec/webgis/> (accessed May 30, 2023).

EPM, "ESPECIFICACIÓN TÉCNICAS PARA DESCARGADORES DE SOBRETENSIONES DPS EN MEDIA TENSIÓN," Medellín, 2015.

EPM, "Norma Técnica: selección de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) ," Medellín, 2019.

F. S. Canales Pérez, "Nociones Específicas para Puesta a Tierra en Instalaciones Mineras," 2011, Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available:

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.

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.

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://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=miQuEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=libro+de+deteccion+de+fallas+en+sisntemas+electricos&ots=1aOsTVMiFi&sig=kvnIJMGIRe\\_siTuy6X9aqpTOsMY&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=miQuEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=libro+de+deteccion+de+fallas+en+sisntemas+electricos&ots=1aOsTVMiFi&sig=kvnIJMGIRe_siTuy6X9aqpTOsMY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3260463>

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104264>

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.

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/IEEEESTD.2015.7109078.

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/IEEEESTD.2019.8796486.

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/IEEEESTD.2006.216391.

International Standard - Protection against lightning,. IEC62305 - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2010.

J. Capitan, “Protección Contra Descargas Atmosféricas y Sistema de Puesta a Tierra de Protección’ - Coca-Cola Andina Argentina,” Universidad Nacional de Córdoba, 2015.

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.

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.

J. Yebra, *Sistemas eléctricos de distribución*, vol. 01. Barcelona: Editorial Reverte, 2009. Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available:

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.

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.

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.

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.

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:

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.

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.

M. Zurita, "Mapa Isoceraúnico Georreferenciado para la Coordinación de Protecciones frente a descargas atmosféricas," Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2020.

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.

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:

Procobre, *Sistemas de Puesta a Tierra*. 2010.

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.

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>

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.

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.

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.

Siemens, "Lightning current and overvoltage protection device," 2010.


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.

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.

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.

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>

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/>

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](#) .