



ORIGINAL

Integration of electromagnetic and mechanical models for effective lightning protection in buildings

Integración de modelos electromagnéticos y mecánicos para la protección efectiva contra rayos en edificaciones

Carlos Ivan Quinatoa Caiza¹  , Alex Ivan Paguay Llamuca¹  , Xavier Alfonso Proaño Maldonado¹  

¹Universidad Técnica de Cotopaxi. Cotopaxi, Ecuador.

Citar como: Quinatoa Caiza CI, Paguay Llamuca AI, Proaño Maldonado XA. Integration of electromagnetic and mechanical models for effective lightning protection in buildings. Data and Metadata. 2024; 3:400. <https://doi.org/10.56294/dm2024400>

Recibido: 09-02-2024

Revisado: 05-05-2024

Aceptado: 04-07-2024

Publicado: 05-07-2024

Editor: Adrián Alejandro Vitón Castillo 

ABSTRACT

The study focused on the design of an advanced algorithm for the optimal sizing of protection systems against atmospheric discharges in architectural structures, applying the rolling sphere method. This technique facilitated the incorporation of user-specified parameters through an advanced graphical interface. The methodology began with the exhaustive accumulation of data relevant to the project. Risk indices were estimated through sophisticated risk analysis software applications. If adjustments were required, the process continued; if not, the building was considered to be adequately secured. The ground resistivity was evaluated according to IEEE Std. 81, and the rolling sphere method was implemented according to IEC 662305-3. The grounding systems were configured in accordance with IEEE Std. 142 and IEEE Std. 80. To analyze the interaction of electrical discharges with the protected building, the electrical equivalents of elements such as meshes, fused copper rods were computed, and conductors positioned horizontally and vertically. Using these data, a model was built in ATPDraw, interconnected with Python for the generation of graphical representations of the current waves in the different protection subsystems. To conclude and corroborate the effectiveness of the process, the risk indices were reevaluated. The validation of the algorithm was achieved by minimizing the margin of error to insignificant levels by incorporating standardized data proposed by organizations such as IEC and IEEE, thus confirming the precision of the designed algorithm.

Keywords: Programming; Testing; Structure; Algorithm.

RESUMEN

El estudio se centró en el diseño de un algoritmo avanzado para el dimensionamiento óptimo de sistemas de protección contra descargas atmosféricas en estructuras arquitectónicas, aplicando el método de la esfera rodante. Esta técnica facilitó la incorporación de parámetros especificados por el usuario mediante una interfaz gráfica avanzada. La metodología comenzó con la acumulación exhaustiva de datos pertinentes al proyecto. Los índices de riesgo se estimaron a través de aplicaciones sofisticadas de software de análisis de riesgo. En caso de requerirse ajustes, el proceso prosiguió; si no, se consideró que la edificación estaba adecuadamente asegurada. La resistividad del terreno se evaluó conforme a la norma IEEE Std. 81, y se implementó el método de la esfera rodante según la normativa IEC 662305-3. Los sistemas de conexión a tierra se configuraron de acuerdo con las normas IEEE Std. 142 e IEEE Std. 80. Para analizar la interacción de las descargas eléctricas con el edificio protegido, se computaron los equivalentes eléctricos de elementos como mallas, varillas de cobre fusionadas, y conductores posicionados horizontal y verticalmente. Utilizando estos datos, se construyó un modelo en ATPDraw, interconectado con Python para la generación de representaciones gráficas de las ondas de corriente en los distintos subsistemas de protección. Para concluir y corroborar la eficacia del proceso, se reevaluaron los índices de riesgo. La validación del algoritmo se alcanzó minimizando el margen de error a niveles insignificantes mediante la incorporación de datos estandarizados propuestos por organismos como IEC e IEEE, confirmando así la precisión del algoritmo diseñado.

Palabras clave: Programación; Prueba; Estructura; Algoritmo.

INTRODUCCIÓN

La investigación presentada en este trabajo aborda el diseño y desarrollo de un algoritmo avanzado para el dimensionamiento de sistemas de protección contra descargas atmosféricas en estructuras arquitectónicas. Utilizando el método de la esfera rodante, esta investigación profundiza en la comprensión de los tipos de descargas atmosféricas, el nivel cerámico, y la implementación de sistemas de apantallamiento eficaces.

El estudio se inicia con una clasificación detallada de las descargas atmosféricas, diferenciando entre descargas descendentes y ascendentes, según la normativa IEC 62305-1 tabla 1. Este enfoque permite adaptar las estrategias de protección a las características específicas de cada tipo de descarga, mejorando la eficacia del sistema de apantallamiento en diferentes entornos.

Descargas descendentes	Descargas ascendentes
Inician por un precursor descendente desde la nube hacia la tierra, estas aparecen principalmente en terrenos llanos y estructuras poco elevadas.	Inician por un precursor ascendente desde la tierra hacia la nube, estas aparecen en estructuras expuestas o elevadas y la probabilidad de impacto aumenta dependiendo de la altura de la estructura y las condiciones atmosféricas del lugar.

Además, se introduce el concepto de nivel cerámico, que mide el número medio anual de días y horas de tormenta en una localidad. Este parámetro es crucial para evaluar la frecuencia de eventos tormentosos y ajustar el diseño del sistema de protección en función de la intensidad de la actividad eléctrica atmosférica de la región tabla 2.

La estructura del sistema de apantallamiento se analiza en detalle, desde las puntas captadoras hasta el sistema de puesta a tierra. Se describe cómo la energía del rayo se captura y se dirige de manera segura hacia la tierra, minimizando el riesgo de daños estructurales y garantizando la seguridad de los ocupantes tabla 2.

Principales conceptos	
Nivel cerámico	El nivel cerámico se define como el número medio anual de días y horas de tormenta en una localidad determinada. En un día de tormenta se han escuchado truenos al menos una vez, según este concepto, es diferente el número de veces que se oigan truenos durante un periodo de 24 horas. En otras palabras, si se oyen truenos más de una vez en un día, el día se clasifica como un día de truenos. ⁽²⁾
Sistema de Apantallamiento	El sistema de apantallamiento está compuesto por varias partes, entre ellas las puntas captadoras, que son los elementos encargados de captar el rayo en el punto diseñado para tal propósito, llamado terminal aéreo. Estas puntas deben ser diseñadas y ubicadas de manera estratégica para garantizar una buena protección contra las descargas atmosféricas. Una vez que la energía del rayo ha sido captada por las puntas, es necesario conducirla hacia la tierra mediante bajantes horizontales y verticales. Estos bajantes son elementos conductores que transfieren la energía de la descarga mediante trayectorias de baja impedancia, para evitar que se produzcan arcos eléctricos y se generen corrientes peligrosas. Finalmente, la energía de la descarga es disipada en un sistema de puesta a tierra, que consiste en un conjunto de elementos conductores enterrados en el suelo, que garantizan una buena conexión eléctrica con la tierra y permiten la disipación de la energía sin causar daños a la estructura. ⁽³⁾

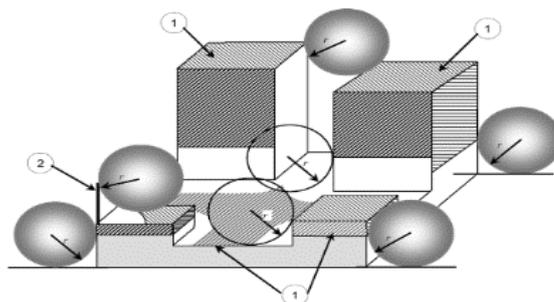


Figura 1. Método de la esfera rodante⁽⁵⁾

El método de la esfera rodante se explica como una técnica fundamental en la protección contra descargas, basada en principios físicos que determinan los puntos de instalación de las puntas captadoras para maximizar la cobertura protectora. Se basa en el principio físico de que alrededor del extremo del líder descendente, que se acerca a tierra durante una descarga atmosférica, existen valores mínimos de corriente de rayo en función de la corriente generada por el rayo. La técnica consiste en hacer rodar una esfera imaginaria hacia la estructura que se desea proteger, y en el primer punto de contacto entre la esfera y la estructura se debe colocar una punta captadora de tal manera que la esfera no toque la estructura, y la punta sea el punto de apoyo para la esfera como se muestra en la figura 1.⁽⁴⁾

Deben resaltarse los factores de riesgo eléctrico asociados con la instalación de equipos eléctricos y electrónicos, y cómo estos factores influyen en la selección de sistemas de protección adecuados para minimizar los riesgos de daño en caso de descarga. Este factor de riesgo eléctrico se debe tener en cuenta al diseñar y seleccionar los sistemas de protección contra descargas atmosféricas adecuados para una estructura específica.

La normativa IEC 62305-2⁽⁶⁾ establece valores típicos para el análisis de los factores de riesgos, se recomienda el uso de un software aparte para su cálculo como el Risk Assessment el cual se basa en la misma normativa antes mencionada, en la tabla 3 se muestran los valores típicos de los factores de riesgo.

Tipos de pérdida	$R_r(y^{-1})$
Riesgo de pérdida de vida humana	10^{-5}
Riesgo de pérdidas de un servicio público	10^{-3}
Riesgo de pérdida de patrimonio cultural	10^{-3}
Riesgo de pérdidas de valor económico	10^{-3}

Cuando se produce una descarga atmosférica, la inductancia a lo largo del electrodo de puesta a tierra tendrá efecto y la corriente de fuga se concentrará alrededor del punto de impacto de la corriente del rayo.⁽⁷⁾ El potencial de tierra se distribuirá de forma muy desigual. Así, la distribución de la corriente y los campos electromagnéticos se verán afectados por las diferencias de potencial entre los puntos de conexión a tierra, Además se establece que por cada punta captadora debe haber mínimo una puesta a tierra.⁽⁶⁾

El valor ideal de la resistencia de la malla sería que tienda a cero ohmios, de esta manera no presente ninguna oposición al paso de la corriente de rayo, lo cual es imposible por diversos factores como el material del conductor su longitud y la sección del mismo. En la tabla 4 la cual establece valores que se debe tomar en cuenta para los cálculos de puesta a tierra respecto a los criterios de la norma IEEE Std. 80 y la 142.

Norma	Resistencia de la malla	Área de instalación
IEEE 80	< 5 ohms	Subestaciones
IEEE 142	< 15 ohms	Industrial-Comercial
IEEE 142	< 25 ohms	Residencial

Este trabajo no solo ofrece una metodología detallada para la evaluación y el diseño de sistemas de apantallamiento, sino que también integra el uso de software de análisis y modelado para validar y optimizar los diseños propuestos. La interacción entre análisis teóricos y aplicaciones prácticas constituye una parte esencial de esta investigación, facilitando una aproximación holística al problema de las descargas atmosféricas.

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar un algoritmo avanzado para el dimensionamiento óptimo de sistemas de protección contra descargas atmosféricas en estructuras arquitectónicas. Este algoritmo utiliza el método de la esfera rodante para facilitar la incorporación de parámetros especificados por el usuario a través de una interfaz gráfica avanzada.

MÉTODO

Metodología para el sistema de apantallamiento de una edificación

Se propone la siguiente metodología para desarrollar el sistema de apantallamiento en una edificación en seis etapas. En la primera sub etapa, se recopila información de la edificación. De forma paralela se toman medidas de la resistividad del suelo utilizando el método de Wenner, considerando distintas medidas. En la

segunda sub etapa, se realiza un análisis de riesgo de acuerdo con la normativa IEC 62305-2 para determinar el estado de la edificación.

En la tercera sub etapa, se aplica el método electrogeométrico para determinar las trayectorias de las descargas eléctricas y ubicar las puntas captadoras. En la cuarta sub etapa se calcula la resistencia a tierra de acuerdo con la normativa IEEE Std 142, el valor de la resistencia debe cumplir para el sistema analizado. En la quinta sub etapa se realiza el cálculo del sistema de puesta a tierra según la IEEE Std. 80, en este procedimiento se determina varios criterios como la tensión de toque, tensión de paso, la elevación de potencial a tierra, la corriente de la malla, la resistencia de la malla, el conductor del mismo entre otras. En la sexta sub etapa se realiza el cálculo de los equivalentes eléctricos, para que en la sub etapa séptima se determine las corrientes en los distintos puntos del sistema de protección contra descargas atmosféricas.

Para finalizar en la octava sub etapa se comprueba el análisis de riesgos, de esta manera tener una edificación segura, de lo contrario se debe reconsiderar desde el segundo paso de la metodología y proponer un nuevo diseño. En la sexta sub etapa se desarrolló la simulación de las corrientes eléctricas provocadas por una descarga atmosférica en los distintos subsistemas del sistema de apantallamiento.

Estructura de programación para el método de la esfera rodante

El algoritmo implementa una interfaz gráfica utilizando la biblioteca Tkinter en Python, para ello es necesario importar los módulos necesarios, luego establecer las variables necesarias. A continuación, se definen una función global de la estructura rectangular y compleja, dentro de las mismas se establece el siguiente procedimiento:

- Establecer los cálculos del apantallamiento
- Diseño 3D de la estructura rectangular
- Diseño de las esferas Rodantes
- Diseño de Puntas Captadoras
- Diseño de bajantes Horizontales y verticales
- Diseño de la interfaz gráfica
- Resultados de los cálculos de apantallamiento y diseño 3D en AutoCAD

En la figura 2 se muestra la metodología del funcionamiento del algoritmo.

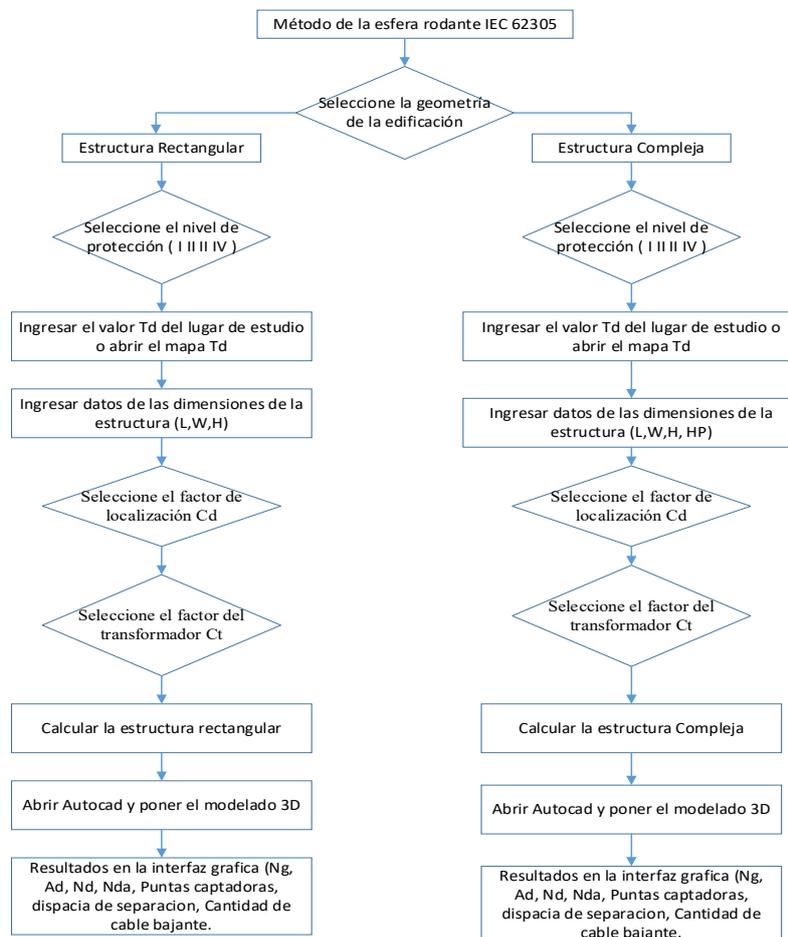


Figura 2. Diagrama de flujos para el método de la esfera rodante IEC 62305

En la figura 3 se representa el ingreso de datos de la interfaz gráfica de la estructura rectangular, como lo indica en la figura 2 el algoritmo desarrollado está dado para la forma rectangular y compleja, para el análisis de resultados y la validación se toma en cuenta el caso determinado en 8, la cual está basada en la normativa IEC 62305.

ESTRUCTURA RECTANGULAR

Elija la clase de protección: II

Ingrese Td: 120 Mapa Td

Ingrese el largo L [m]: 38 Ingrese el largo de la varilla Lv [m]: 4

Ingrese el ancho W [m]: 25

Ingrese el alto H [m]: 2.4

Elija el fator de localización Cd: Rodeado por objetos o árboles de la misma altura o más pequeños

Elija el fator del transformador Ct: Solamente el servicio

Calcular

Ng (Densidad de descargas):	12.0
Ad (Área de captación):	28071.46
Nd (Número de sucesos peligrosos):	0.17
Nda (Nd para estructuras adyacentes):	0.17
Numero de puntas captadoras captadoras:	4
Distancia de separación [m]:	9.5
Cantidad de cable bajante [m]:	831.0

Salir

Figura 3. Ingreso de datos de la estructura rectangular

Estructura de programación para el cálculo de la resistencia a tierra

El código presenta una estructura de programación que comienza con la importación de módulos necesarios, como Tkinter y math, seguida por la definición de funciones que realizan cálculos y muestran información. La interfaz gráfica se construye utilizando widgets de Tkinter, junto con los botones asociados con funciones que se ejecutan al hacer clic. Esto permite al usuario ingresar valores, elegir opciones y efectuar cálculos específicos, además de mostrar tablas e imágenes relacionadas. El código sigue las pautas de IEEE Std. 142 para calcular la resistencia a tierra, facilitando su comprensión y uso. En la figura 4 se presenta la metodología de funcionamiento.

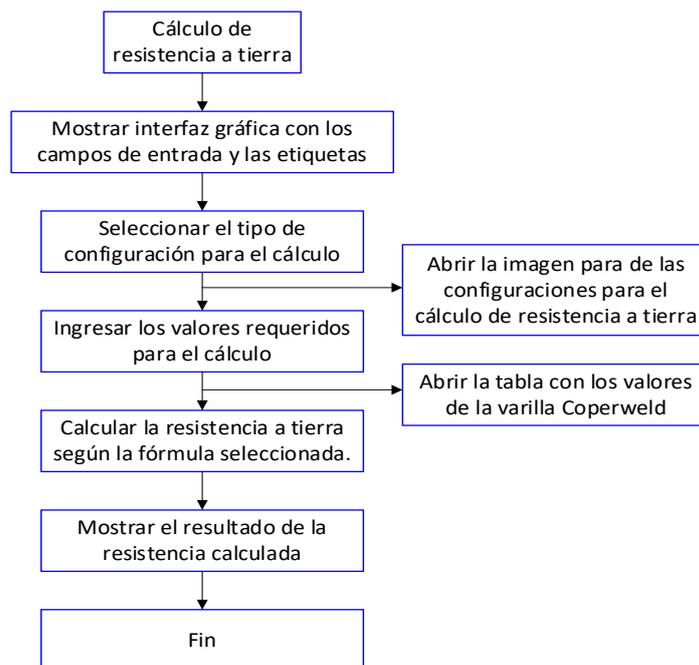


Figura 4. Diagrama de Flujo del cálculo de puesta a tierra

Pasos recomendados por la normativa IEEE Std. 80 para el cálculo del sistema de puesta a tierra.

Para calcular una malla de puesta a tierra según la normativa IEEE 80⁽⁹⁾ la cual recomienda pasos a seguir los cuales están descritos en la normativa. Es necesario determinar el propósito de la malla y el área geográfica donde se ubicará, también es importante establecer los requisitos de resistencia a tierra y corriente de falla y seleccionar los materiales de puesta a tierra adecuados.

La configuración y el tamaño de la malla deben determinarse, así como la ubicación de los puntos de conexión con los equipos eléctricos y los conductores de protección, y con la red de puesta a tierra de la instalación eléctrica. Es importante verificar si la resistencia a tierra calculada cumple con los requisitos establecidos y realizar pruebas de campo para verificar el rendimiento de la malla.⁽¹⁰⁾ Además, un seguimiento y mantenimiento periódico de la malla también son esenciales para garantizar su buen funcionamiento y cumplimiento con los requisitos de seguridad.⁽¹¹⁾

Estructura de programación para el sistema de puesta a tierra IEEE Std. 80

La metodología de programación utiliza principalmente la biblioteca tkinter de Python para construir una interfaz gráfica interactiva. Además de tkinter, se importan otras bibliotecas como ttk, messagebox de tkinter, PySimpleGUI y PIL (Image, ImageTk), así como funciones matemáticas sqrt y math de Python para cálculos. Se implementa la función “validar” que verifica opciones seleccionadas en listas desplegables en la interfaz. Dependiendo de la opción elegida, se pasan valores a las secciones “DATOS_1” donde se ingresan variables como voltajes, impedancias, resistencias, factores de corrección y dimensiones de la malla. Estos datos se utilizan para calcular corrientes, ratios, diámetros de conductores y resistencia de la malla.

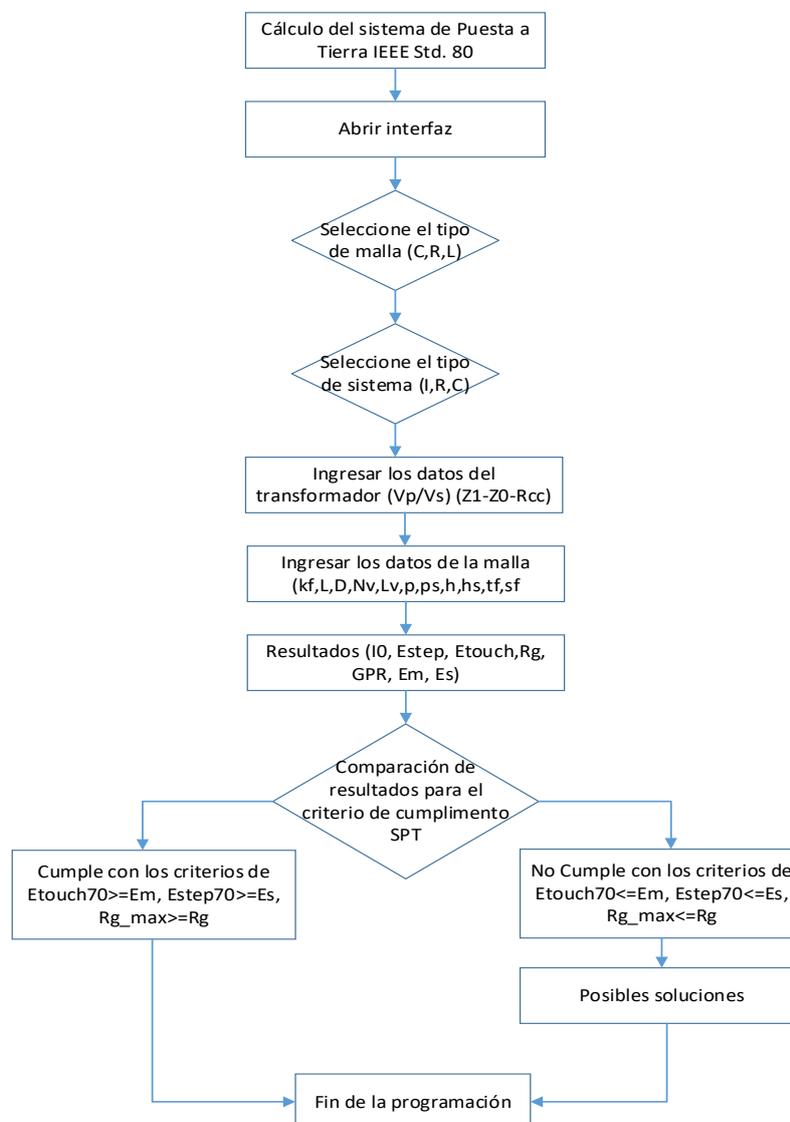


Figura 5. Diagrama de flujo del Sistema de Puesta a Tierra Std. 80

En la sección siguiente, se calculan la corriente máxima de la malla, el GPR (Ground Potential Rise) y el voltaje de la malla utilizando ecuaciones específicas y fórmulas. Se comparan estos resultados con criterios definidos como voltaje de paso y voltaje de toque, y se muestra si se cumplen o no. Además, se evalúa el cumplimiento del criterio de resistencia máxima de la malla. Si la resistencia calculada es menor o igual a la resistencia máxima definida, se considera que el criterio se cumple; de lo contrario, no se cumple. En la figura 5 se establece la metodología que permite a los usuarios interactuar con la interfaz gráfica para realizar análisis y cálculos basados en los datos proporcionados y los criterios establecidos.

En la figura 6 está la interfaz gráfica del ingreso de datos necesarios para el cálculo del sistema de puesta a tierra. Los valores ingresados son de un ejemplo de la normativa IEEE Std 80. Se debe escoger un tipo de malla a calcular y un tipo de sistema en el cual se va a trabajar, estos datos mencionados son importantes para determinar el nivel de resistencia de la malla aceptable, así como lo indica en la tabla 2.

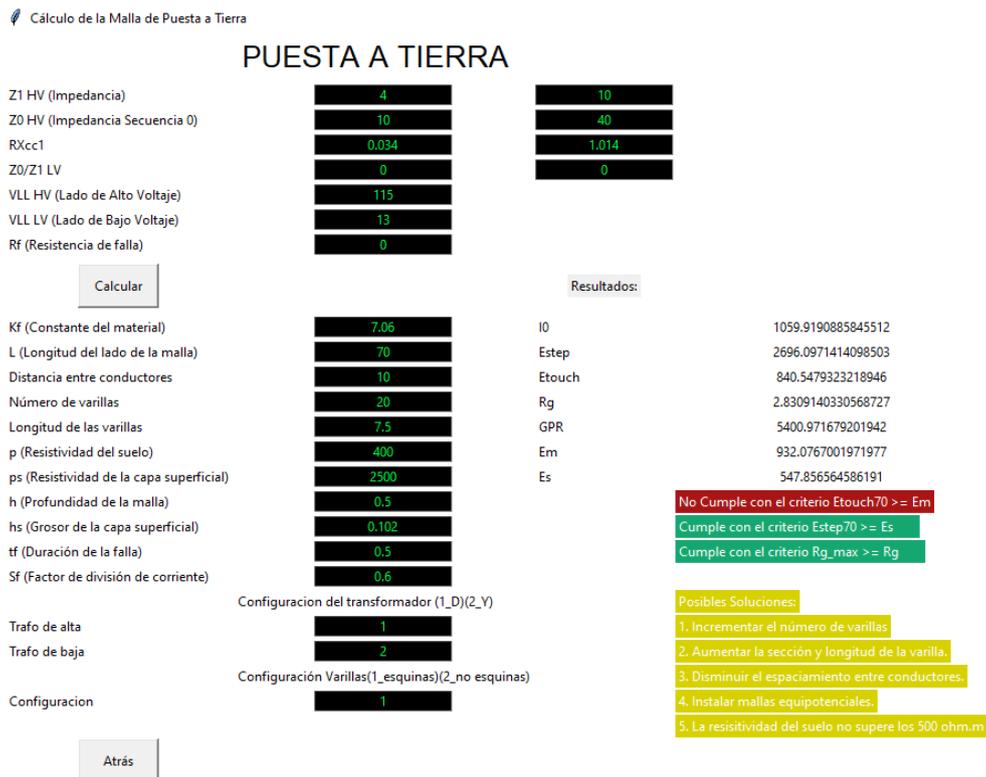


Figura 6. Ingreso de datos para el algoritmo del sistema de puesta a tierra

Estructura de programación para los equivalentes eléctricos.

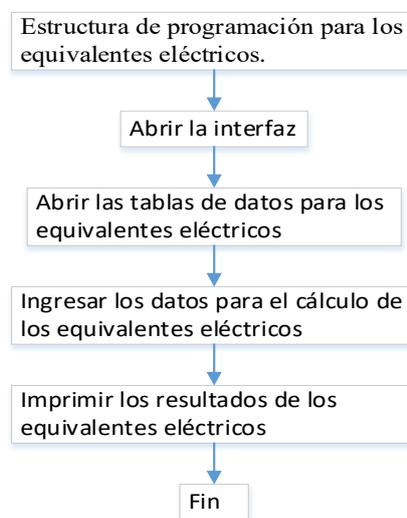


Figura 7. Diagrama de flujo de la estructura de programación para los equivalentes eléctricos

El código comienza importando las bibliotecas math y tkinter para cálculos matemáticos y crear la interfaz gráfica. Luego, define varias funciones: calculate_rod_parameters() calcula resistencia, capacitancia e inductancia de una varilla de tierra; calculate_grid_parameters() determina estos parámetros para una malla de puesta a tierra; calcular_cable_horizontal() y calcular_cable_vertical() realizan cálculos similares para cables horizontales y verticales; mostrar_tabla() muestra datos para cálculos de equivalentes de conductores; Datos_Varilla() muestra datos para equivalentes de varilla coperweld.

La interfaz principal se construye con etiquetas, entradas y botones para ejecutar cálculos, mostrando resultados. Finalmente, el bucle mainloop() asegura interactividad, y la figura 7 presenta el diagrama de flujo.

Estructura de Programación para la simulación de descargas atmosféricas

Se realiza el circuito de los equivalentes eléctricos mediante el uso de ATPDraw, para la simulación de la descarga atmosférica se utiliza el generador Heidler, el cual tiene una amplitud de 150 000 A y su tiempo de onda completa es $1,2 \times 10^{-6}$ se utiliza los datos de la tabla 5 para realizar el equivalente eléctrico de los sub sistemas de protección, al tener el circuito terminado y al hacerlo de simular se crea un archivo necesario "PL4" al cual es necesario transformarlo el archivo en matrices o vectores mediante el programa "PL42mat". A partir de los datos cargados en Python con el uso de la librería Import os, se generan gráficas utilizando la biblioteca matplotlib. Además, obteniendo los valores máximos de corriente y tiempo para cada simulación la cual muestran la interfaz gráfica creada con tkinter. En la figura 8 se establece el diagrama de flujo para el funcionamiento del algoritmo.

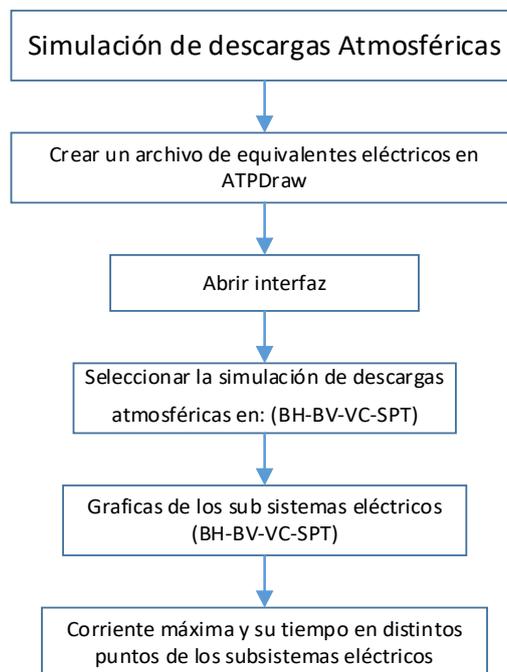


Figura 8. Diagrama de Flujos de la simulación de descargas atmosféricas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 5 determina los parámetros del análisis de riesgo, en una estructura, la cual incluye características ambientales y físicas, como la densidad de rayos por año, las dimensiones de la estructura, información sobre la protección de la estructura así también incluye datos de la protección externa. Este análisis se realizó en base a la norma IEC 52305-2.

Para llevar a cabo la evaluación del riesgo eléctrico, se realizará el análisis con el software Risk Assessment, que se fundamenta en la norma IEC - 62305 para establecer el sistema de protección que se requiera en cualquier tipo de edificación. Una vez realizada la evaluación del riesgo eléctrico con el software Risk Assessment se obtuvieron los siguientes resultados, según se detalla en la tabla 6.

Los valores obtenidos indican que es necesario corregir los riesgos de pérdidas de vidas humanas con un valor de $8,5 \times 10^{-4}$. De acuerdo con los resultados obtenidos es necesaria la instalación de un SECPR (Sistema Externo de Protección Contra el Rayo) y un SIPCR (Sistema Interno de Protección Contra el Rayo). En este estudio se realizará el cálculo de un sistema externo de protección contra las descargas atmosféricas y se recomienda realizar un estudio futuro para el cálculo de un sistema interno de protección.

Tabla 5. Parámetros del análisis de riesgo

Parámetros del análisis de riesgo	Simbología	Valor
Largo	L	38,00
Ancho	W	25,00
Alto	H	25,00
Densidad de descargas a tierra	Ng	120,00
Superficie de captación de descargas	Ad	28071,46
Localización relativa de la estructura	Cd	0,25
Número de sucesos peligrosos ND para una estructura (extremo "b" un servicio)	ND	0,01
Numero de sucesos peligrosos NDA para una estructura adyacente (extremos "a" de un servicio)	NDA	0,17

Tabla 6. Resultados obtenidos del análisis de riesgo

Tipo de Riesgo	Valor	Observación
Riesgo de pérdida de patrimonio	1,77 x 10 ⁻⁶	No es necesario Corregir
Riesgo de pérdidas de vidas humanas	3,62 x 10 ⁻⁵	Corregir
Riesgo de pérdida de servicios públicos	4,46 x 10 ⁻⁴	No es necesario Corregir
Riesgo de pérdidas económicas	3,54 x 10 ⁻⁵	No es necesario Corregir

Alyami S et al.⁽¹²⁾ destaca la importancia de medir la resistividad del suelo antes de diseñar un sistema de puesta a tierra adecuado. La misma varía en todo el mundo también cambia estacionalmente, y está influenciada por diversos factores como el contenido de sales minerales, la humedad, la temperatura, la compactación del suelo y el contenido de electrolitos.

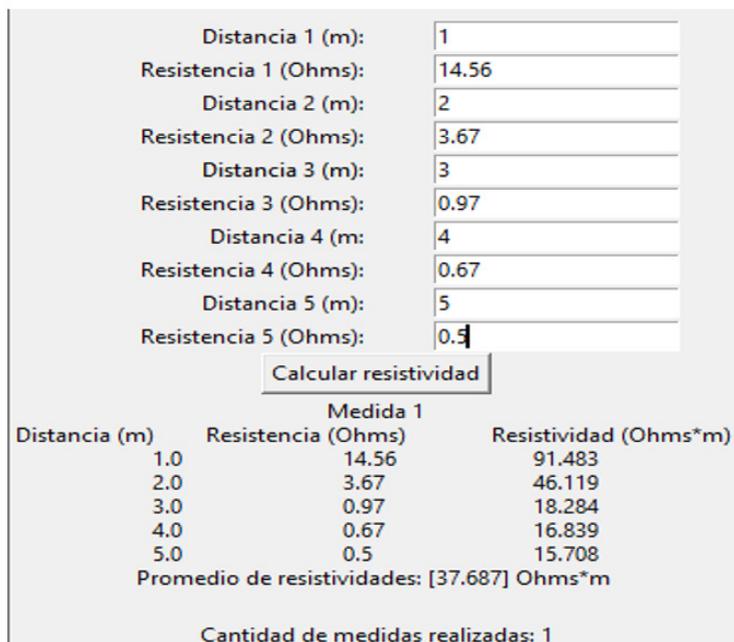


Figura 9. Interfaz de la resistividad del suelo

El artículo describe el método Wenner utilizando la disposición de cuatro clavijas en línea recta. Para validar el algoritmo de programación para el cálculo de la resistividad se determina al ingresar los mismos valores que estudio que plantea figura 9. El promedio de la resistividad del estudio es de $37,687 \Omega \cdot m$.

Para verificar el algoritmo desarrollado se aplica el estudio de un sistema de protección atmosférica según la norma IEC 62305 para una nave industrial en el departamento de Junín⁽¹³⁾, las dimensiones de la estructura de estudio y los datos necesarios están como el nivel de protección, el número de días de tormenta (Td) y la longitud de la varilla captadora están dadas en la figura 10.

Calcular	
Ng (Densidad de descargas):	12.0
Ad (Área de captación):	28071.46
Nd (Número de sucesos peligrosos):	0.17
Nda (Nd para estructuras adyacentes):	0.17
Numero de puntas captadoras captadoras:	12
Distancia de separación [m]:	12
Cantidad de cable bajante [m]:	831
Salir	

Figura 10. Resultados de la estructura rectangular

En la figura 11 está el modelado en AutoCAD dado por el algoritmo desarrollado, a su vez está el diseño realizado por el estudio para la protección contra descargas atmosféricas⁽⁸⁾ en ambos casos el resultados es de 12 puntas captadoras, pero además el modelado proporciona las bajantes horizontales del mismo modo las bajantes verticales y la cantidad de metros que se ocupara para la instalación de los sub sistema de bajantes.

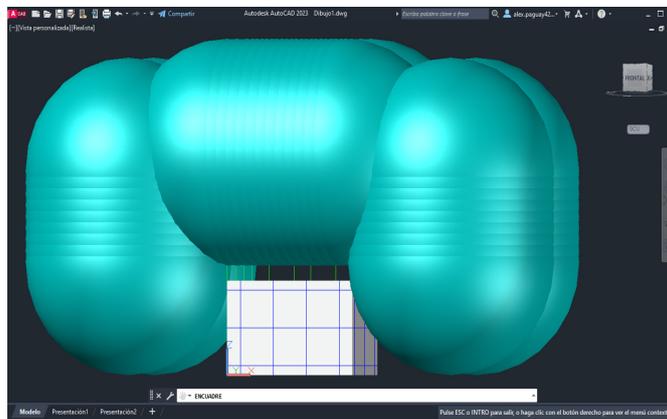


Figura 11. Modelado en 3D del método de la esfera rodante en AutoCAD

Orbea Garcia JM et al.⁽⁸⁾ evalúa el cálculo de las resistencias a tierra mediante las distintas configuraciones de la normativa IEEE Std. 142. Se utilizan los datos de la tesis para validar el algoritmo desarrollado, utiliza una configuración simple de una varilla. En la figura 12 se detalla el interfaz el cual tiene una tabla de datos típicos de varillas coperwelld junto con sus características. para validar el algoritmo se determina los siguientes datos: que el radio es de $0,007938 \text{ m}$, la longitud $1,8 \text{ m}$, la resistividad del suelo es de $99,2 \Omega$. El resultado es de $33,266 \Omega \cdot m$.⁽¹⁴⁾

Para el desarrollo del algoritmo en Python de sistema de puesta a tierra se basó en los pasos establecidos de la normativa IEEE Std. 80. Además, se identifica las opciones que tiene el programa las cuales son: la selección del tipo de malla y el tipo de sistema en el que se requiera calcular.⁽¹⁵⁾

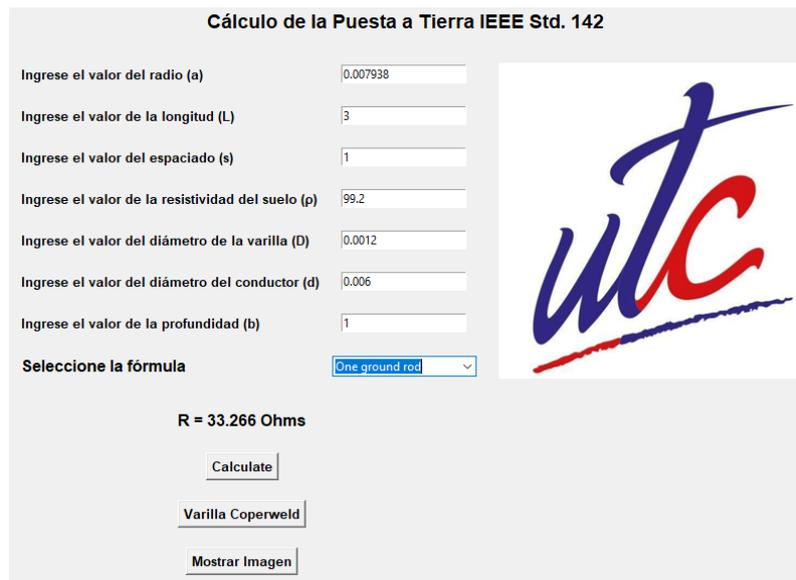


Figura 12. Interfaz gráfico del cálculo de las resistencias a tierra

En la normativa IEEE Std. 80 se establece el cálculo del sistema de puesta tierra y distintas configuraciones del mallado. Para comprobar que el programa funcione correctamente se ingresó los datos del ejercicio del anexo B, y la configuración de la malla en “L”. En la tabla 7, se identifica los resultados dados por la normativa y el programa de SPT en Python son muy similares.

Tabla 7. Comprobación del Programa de sistema de puesta a tierra malla en “L”

Resultados	I_0 (A)	E_{step} (V)	E_{Touch} (V)	E_m (V)	E_s (V)	GPR (V)	R_g Ω
Norma IEEE std. 80	1060,00	2686,60	838,20	761,10	574,60	5228,00	2,74
Algoritmo de SPT	1059,91	2696,57	840,667	761,13	574,58	5228,00	2,74
Variación %	$8,49 \times 10^{-5}$	$-3,71 \times 10^{-4}$	$-2,94 \times 10^{-3}$	$-3,94 \times 10^{-5}$	$-3,48 \times 10^{-5}$	0	0

Para determinar los equivalentes eléctricos es necesario haber diseñado el sistema de apantallamiento en la edificación, teniendo los siguientes parámetros como la cantidad de puntas captadoras, la distancia de separación entre bajantes, la puesta a tierra y el sistema de puesta a tierra de la instalación.

En la tabla 8 están los resultados de los equivalentes eléctricos de la estructura, para ello se consideró una varilla copperweld de 1,80 metros y un conductor para la malla AWG 2/0 para las bajantes AWG 2. Estos datos van a ser simulados dependiendo al tipo de modelo eléctrico en ATPDraw.⁽¹⁶⁾

Tabla 8. Resultados de los equivalentes eléctricos

Parámetros de varilla de tierra		Parámetros del cable horizontal	
Resistencia R_{rod}	19,7094 Ω	Capacitancia C_h	3,3806 e-11 F
Capacitancia C_{rod}	1,6930 e-10 F	Inductancia L_h	2,2939 e-07
Inductancia L_{rod}	2,12 e-06 H	Resistencia R_h	0,395 Ω
Parámetros de Malla de puesta a tierra		Parámetros del cable Vertical	
Resistencia R_{grid}	0,0001921 Ω	Capacitancia C_v	7,0801 e-11 F
Capacitancia C_{grid}	1,6869 e-11 F	Inductancia L_v	2,5453 e-07
Inductancia L_{grid}	1,0684 e-06	Resistencia R_v	0,197 Ω
Conductancia G_{grid}	110772256,37 S		

Este apartado presenta los resultados del algoritmo utilizado para simular la protección contra descargas atmosféricas. Se emplea un circuito eléctrico que representa los equivalentes de los subsistemas de protección, diseñado en ATPDraw. La simulación de la descarga atmosférica se lleva a cabo mediante un generador Heidler ubicado en la parte superior de la estructura.

El algoritmo de programación en Python incluye una interfaz con cuatro botones: “Corrientes en Bajantes Horizontales”, “Corrientes en Bajantes Verticales”, “Corrientes en Varillas Copperweld” y “Corrientes en el Sistema de Puesta a Tierra”. Los resultados incluyen la corriente máxima y el momento en que ocurre, los cuales están dados en la tabla 9.

La determinación del análisis de riesgo eléctrico ya instalado los sub sistemas de protección según la normativa IEC 62305 se calcula mediante el software Risk Assessment la cual es necesaria para finalizar el proceso para el dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones basado en el método de la esfera rodante, el resultado indica que no hay riesgo en la edificación como lo indica en la figura 13.

Tabla 9. Resultados de las corrientes en los sub sistemas eléctricos

Características	Corriente máxima (A)	Tiempo de Ocurrencia (s)
Conductor horizontal Superior	14822,391	6,20E-05
Conductor vertical Superior	63,842	2,00E-06
Varilla copperweld Interior	57,9777	2,00E-06
Sistema de Puesta a Tierra Interna	2,52E-11	1,00E-06

DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD DE PROTECCIÓN SEGÚN LA NORMA UNE-EN 62305-2									
Superficie de captura	Riesgo de pérdida vidas humanas	Riesgo de pérdida de servicios públicos	Riesgo de pérdida de patrimonio	Riesgo de pérdidas económicas	Necesidad instalación SEPCR*	Nivel de protección	Necesidad instalación SIPCR**	Tipo SIPCR	
70.371,46	2,61E-06	4,46E-04	1,77E-06	3,54E-05	Ya protegido	Nivel II	Ya protegido	IEC62305-4	

Figura 13. Análisis del riesgo eléctrico instalados los sub sistemas de protección

Para determinar la valides del algoritmo desarrollado es necesario compararlo mediante las normativas aplicadas para su desarrollo, de esta manera en la tabla 10 se establece que el error porcentual tiende a cero, por lo tanto, el uso de esta herramienta informativa no generara cálculos erróneos o un mal diseño en proyectos futuros.

Tabla 10. Análisis del error del algoritmo desarrollado

Algoritmo desarrollado		Normativa Aplicada		Error
Descripción	Resultado	Descripción	Resultado	
Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)	33,687	IEEE Std 81	33,68	0,02 %
Método de la esfera rodante (Puntas Captadoras)	12	IEC 62305	12	0,00 %
Puesta a tierra (Ω)	33,266	IEEE Std 142	33,26	0,02 %
Sistema de puesta a tierra ($R_g \Omega$)	2,74	IEEE Std 80	2,74	0,00 %
Promedio				0,01 %

CONCLUSIONES

Se han utilizado normativas reconocidas, como las normas IEEE juntamente con las normativas IEC, para establecer las bases teóricas y los criterios de diseño necesarios para el desarrollo del algoritmo, con lo cual se asegura que las soluciones propuestas cumplan con estándares internacionales de seguridad eléctrica.

La estructura de programación utilizada para el cálculo del dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas está organizada por medios de sub procesos los cuales utilizan módulos y funciones para realizar los cálculos necesarios, además proporciona una interfaz gráfica que permite al usuario ingresar valores, seleccionar opciones y obtener resultados precisos.

El análisis de riesgo eléctrico según la norma IEC 52305-2 mostró la necesidad de corregir los riesgos de pérdidas de vidas humanas mediante la instalación de un Sistema Externo de Protección Contra el Rayo (SECPR) y un Sistema Interno de Protección Contra el Rayo (SIPCR).

El algoritmo desarrollado se validó mediante ejercicios propuestos por las normativas IEEE, así como la IEC, al ingresar los datos y comparar los resultados se obtiene que el error tiende a cero.

RECOMENDACIONES

Para el uso de los algoritmos desarrollados es necesario un conocimiento teórico relacionados con las descargas atmosféricas, así como los métodos de protección, los efectos en los sistemas eléctricos, las edificaciones y los factores de riesgo.

Es necesario realizar el análisis de los factores de riesgo para determinar la protección adecuada para la estructura, estas evaluaciones deben considerar el tipo de estructura, el nivel cerámico del lugar, así también las dimensiones de la misma.

Continuar actualizando y mejorando el algoritmo en función de los avances tecnológicos y las nuevas normativas que puedan surgir en el campo de la protección contra descargas atmosféricas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cuellar Calderón AA, Marroquín Villalta AE, Segovia Salazar MA. Diseño de Sistema de Protección contra descargas atmosféricas en Planta Generadora Térmica, Acajutla 2018.

2. Quintanilla Portillo E de J, Rivera Orellana DF, Rosa Siciliano GI. Protección al impacto directo de rayos en subestaciones de potencia usando la norma IEEE Std 998-2012. Universidad de el Salvador 2020.

3. Pérez Gamboa AJ, Díaz-Guerra DD. Artificial Intelligence for the development of qualitative studies. *LatIA*. 2023;1:4.

4. Paguay A, Vilca B. Sistema de Apantallamiento y Puesta a Tierra para edificaciones residenciales, comerciales e Industriales. *Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas* 2023;7:45-57.

5. Silva SE. Método de superficies ionizantes: nuevo enfoque para la protección contra descargas atmosféricas. *Ingeniería Energética* 2009;30:13-9.

6. Sanchez Murillo JA. Evaluación del Sistema Integral de Protección contra Rayos y sobretensiones (SIPRA) de los edificios B y C de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) de la ciudad de Bucaramanga, bajo los lineamientos de las Normas Técnicas Colombianas. 2021.

7. Paguay Llamuca AI. Desarrollo de un algoritmo para el dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones basado en el método de la esfera rodante. 2023.

8. Orbea Garcia JM, Salazar Achig ER, Quinatoa Caiza CI. 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. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 2023;4:3321-39.

9. Gómez Cano CA, Colala Troya AL. Artificial Intelligence applied to teaching and learning processes. *LatIA*. 2023;1:2.

10. Chilinguina Taipe JG, Guanoluisa LE. Evaluación del sistema de puesta a tierra de la línea de subtransmisión Ambato-Samanga y Samaga-Pillaro a 69 KV perteneciente a la Empresa Eléctrica Ambato para proponer alternativas que permitan mejorar el sistema. 2017.

11. Monga DP, Changoluisa CJ, Salazar ER, Jiménez DL, Proaño XA. 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 2022;19:34-41.

12. Alyami S. Grid grounding calculations for a 132-kv Substation using soil backfilling. IEEE Access 2019;7:104933-40.

13. Resistivity E. An American National Standard IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System 2023.

14. Sánchez Castillo V. Analysis of the scientific production on the implementation of artificial intelligence in precision agriculture. LatIA. 2023;1:1.

15. Sazali MS, Wooi CL, Arshad SNM, Wong TS, Abdul-Malek Z, Nabipour-Afrouzi H. Study of soil resistivity using wenner four pin method: Case study. 2020 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), IEEE; 2020, p. 386-91.

16. Portilla Socon JA. Estudio de un sistema de protección atmosférica según normas IEC 62305 para una nave industrial en el Departamento de Junín 2021.

FINANCIACIÓN

Ninguno.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Curación de datos: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Análisis formal: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Adquisición de fondos: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Investigación: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Metodología: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Administración del proyecto: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Recursos: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Software: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Supervisión: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Validación: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Visualización: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Redacción - borrador original: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.

Redacción - revisión y edición: Carlos Ivan Quinatoa Caiza, Alex Ivan Paguay Llamuca, Xavier Alfonso Proaño Maldonado.