

# Desarrollo de un Algoritmo para la Protección contra Descargas Atmosféricas en Edificaciones

Quinatoa, Carlos<sup>1,\*</sup> ; Albán, Damián<sup>1</sup> ; Proaño, Xavier<sup>1</sup> ; Camacho, Luis<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Técnica de Cotopaxi, Ciencias de Ingenierías y Aplicadas, Latacunga, Ecuador

**Resumen:** La investigación se centra en el progreso algorítmica destinada a la protección contra los impactos atmosféricos en estructuras que utilizan la técnica de esferas rodantes. La metodología comienza con la recopilación de los detalles del proyecto, que abarcan el nivel ceráunico y las medidas estructurales. Los elementos de riesgo se evalúan en un software de evaluación de riesgos para encontrar algunos escenarios, como la pérdida de vidas, la suspensión del servicio y los daños a la propiedad. De ser necesario, se administran las correcciones; de lo contrario, se ponen en práctica estrategias de protección. Esto incluye determinar la resistividad del suelo de acuerdo con la norma IEEE 81, aplicar la técnica de la esfera rodante de la norma IEC 62305-3 y cumplir con los principios del sistema de puesta a tierra en las normas IEEE 142 e IEEE 80. Para analizar las descargas atmosféricas dentro de una estructura protegida, se calculan los equivalentes eléctricos de los conductores de malla, las varillas de soldadura de cobre y los conductores horizontales y verticales. Los resultados se utilizan en un circuito de Atpdraw vinculado a Python, que genera gráficas de las formas de onda actuales para diversos subsistemas de protección. Los elementos de riesgo se reevalúan para ratificar el procedimiento. La verificación se basa en la idea de que el margen de error converge hacia cero cuando se introducen datos de ejercicios que cumplen con normativas como la IEC y el IEEE.

**Palabras claves:** Algoritmo, protección, resistividad, descargas atmosféricas, impactos atmosféricos

## Development of an Algorithm for Protection against Atmospheric Discharges in Buildings

**Abstract:** The research concentrates on the algorithmic progress aimed at the protection against atmospheric impacts on structures using the rolling sphere technique. The methodology starts with the collection of project details, covering the ceramics level and structural measures. The risk elements are evaluated in a risk assessment software to find some scenarios, such as loss of life, service suspension and property damage. If necessary, corrections are managed; otherwise, protection strategies are implemented. This includes determining soil resistivity in accordance with IEEE 81, applying the rolling sphere technique of IEC 62305-3, and complying with the grounding system principles in IEEE 142 and IEEE 80. To analyze atmospheric discharges within a protected structure, electrical equivalents are calculated for mesh conductors, copper welding rods, and horizontal and vertical conductors. The results are used in an Atpdraw circuit linked to Python, which generates plots of the current waveforms for various protective subsystems. The risk elements are reevaluated to ratify the procedure. The verification is based on the idea that the margin of error converges to zero when inputting data from exercises that comply with standards such as IEC and IEEE.

**Keywords:** Algorithm, protection, resistivity, atmospheric discharges, atmospheric impact

### 1. INTRODUCCIÓN

El rango ceráunico, que indica la cantidad en jornadas de tormentas al año en un área geográfica, es una medida vital para evaluar las condiciones meteorológicas. Como resultado, Ecuador, reconocido por su variada topografía que abarca las regiones costeras, montañosas y amazónicas, está experimentando una importante incidencia de relámpagos (Verdugo et al., 2018). Estos rayos se generan a través de procesos de ionización, lo que generalmente resulta en corrientes eléctricas en kiloamperios (kA). El mapa de niveles ceráunico ofrece información valiosa

sobre la frecuencia promedio de los rayos que se producen en cada región específica. Por ejemplo, en Puyo la frecuencia de los rayos cae entre 100 y 120 por año, mientras que en Quito varía entre 60 y 70. Del mismo modo, en Guayaquil la incidencia de los impactos ceráunicos varía de 20 a 40 impactos, y en Loja oscila entre 30 y 40. Estos datos reflejan la amplia gama de niveles de ceráunico observados en diferentes regiones del país (National et al., 2023), esto implica un peligro para las personas la caída de un rayo que puede provocar daños y la posible pérdida de vidas (Lorenz et al., 2008).

\*carlos.quinatoa7864@utc.edu.ec

Recibido: 06/06/2024

Aceptado: 07/02/2025

Publicado en línea: 28/02/2025

10.33333/rp.vol55n1.05

CC BY 4.0

Por lo general, las regulaciones se implementan para equipos eléctricos, edificios y subestaciones con el objetivo de minimizar la probabilidad de daños. Sin embargo, en nuestro país estas regulaciones no se aplican de manera efectiva y tampoco existen medidas obligatorias para proteger los edificios y residencias de las descargas atmosféricas. A pesar de esto, hay autores que investigan el impacto de las descargas atmosféricas en diferentes entornos y circunstancias (Tan et al., 2014). El autor lleva a cabo un procedimiento de simulación numérica para analizar la variación del campo eléctrico atmosférico alrededor de edificios con características distintas. La importancia principal de este estudio es mejorar la precisión del monitoreo de rayos y truenos, lo que permite que los sistemas de alerta temprana sean más efectivos. En un contexto de investigación comparable, otros autores como Maslowski et al. (2014), mencionan el estudio de los edificios en la transmisión de las ondas electromagnéticas generadas por los rayos donde se centra en los fenómenos de los campos eléctricos inducidos por las descargas atmosféricas en las redes eléctricas cercanas a un edificio. Viera et al. (2015) realizó un estudio sobre un grupo de estructuras que fueron sometidas a campos electromagnéticos producidos por la radiación, donde se arrojó información sobre la reducción del campo eléctrico en varillas verticales y conductores planos y de observaciones sobre la inversión de polaridad. Por el contrario, los autores Radicevic et al. (2011) llevan a cabo un análisis de un método de protección contra rayos para un motor eólico. La contribución de este estudio consiste en monitorear los sensores colocados en varios componentes, como las palas, las góndolas y la turbina, para examinar el impacto de las descargas atmosféricas en los controles. Los estudios anteriores se han centrado en evaluar la eficacia del sistema de protección del área para acumular explosivos en la estación de Cotopaxi. Adicional, la investigación de Abril y Azogue (2011) muestra la importancia de utilizar la norma IEC 62305 para evaluar los riesgos y garantizar la seguridad, en particular en la determinación del nivel de riesgo del área de estudio.

El estudio realizado por Lucietti et al. (2019), de un sistema de protección contra rayos, teniendo en cuenta los diferentes escenarios de niveles de protección definidos por la norma IEC 62305, ha demostrado que a medida que aumenta el nivel de protección, las corrientes disminuyen en los sistemas con conductores de bajada y las tensiones entre los conductores de bajada y los puntos de conexión a tierra dentro de las instalaciones. Maslowski et al. (2014) realizaron una evaluación de la corriente del rayo generada en el sistema de protección contra rayos y el circuito eléctrico de dos estructuras de prueba que emulan las configuraciones de edificios residenciales. Las investigaciones se realizaron en dos centros de investigación distintos, uno situado en Florida y el otro en Polonia, en donde el presente estudio empleó distribuciones de probabilidad para analizar las corrientes en varios lugares.

También, Maslowski et al. (2014) realizaron un ejercicio de modelización sobre la corriente inducida por un rayo para evaluar las medidas de protección contra las descargas atmosféricas en los edificios residenciales empleando el ATP-EMTP en una variedad

de escenarios. Durante este estudio, se analizó la forma de onda de la corriente utilizando electrodos de tierra verticales, lo que reveló discrepancias entre la forma de onda de la corriente inyectada y otros componentes de la configuración experimental. Asimismo, se analizaron una serie de preguntas anteriores relacionadas con la protección estructural, con un énfasis principal en el desarrollo de modelos matemáticos, la evaluación de los electrodos verticales y horizontales y la experimentación con herramientas de software computacional. Sin embargo, la norma IEEE (2004) se concentra principalmente en el fenómeno ondulatorio de la corriente dentro de los electrodos de tierra verticales, revelando discrepancias en comparación con las características de onda de la corriente inyectada y otros componentes del sistema de análisis. También, se examinaron varias investigaciones previas, prestando especial atención a la formulación de modelos matemáticos, la evaluación de los electrodos verticales, horizontales y la experimentación facilitada por aplicaciones de software especializadas. Harvey y Mena (2018) elucidan la metodología para asimilar el programa de solicitud propuesto con el avance de la estrategia de protección contra rayos, en consonancia con los protocolos delineados en el reglamento de la IEC (2010). Así mismo, una evaluación de los peligros asociados a los rayos es esencial para la implementación de estrategias de protección eficaces. La adopción de medidas para mitigar las descargas atmosféricas puede reducir significativamente cualquier efecto perjudicial en los sistemas eléctricos. Heidler et al. (2008) hacen referencia a la norma IEC (2010), que se compone de tres segmentos que articulan los principios y las acciones necesarias para protegerse contra las repercusiones de los rayos. La sección preliminar explora los principios esenciales de la protección profesional contra rayos y abarca temas como la terminología, la evaluación de riesgos, la síntesis de requisitos, los estándares para la selección de medidas de protección y las metodologías de inspección. El segmento siguiente explica las metodologías para evaluar los parámetros, abarcando la física de la radiación electromagnética, y aborda facetas como la corriente, el voltaje, la duración, la energía y la frecuencia. El tercer segmento delinea los principios y metodologías para proteger una estructura de la caída de un rayo, incorporando tanto directos como indirectos, como la tracción y la unión equipotencial. De igual forma, los protocolos para evaluar la eficacia de estas intervenciones de protección. Estos componentes de la norma formulan un marco exhaustivo para garantizar la seguridad frente a los rayos en diversos contextos. Estos algoritmos son vitales para aliviar los daños a la infraestructura eléctrica y salvaguardar las vidas humanas.

Este artículo sugiere el desarrollo de un algoritmo destinado a cuantificar la resistencia de los edificios a los impactos atmosféricos mediante la utilización de la metodología de esferas rodantes. La fase inicial consiste en recopilar datos sobre las medidas de protección utilizando el concepto de esfera rodante para edificios de diseños rectangulares y complejos. A continuación, se desarrolla el software correspondiente al algoritmo y por último, se confirma la validez del algoritmo de conformidad con las normas mencionadas anteriormente.

El documento se describe de la siguiente manera: La sección

2 presenta una descripción detallada de los materiales que se utilizarán, que abarca las dimensiones del edificio de conformidad con las normas, así como las precauciones de seguridad y la información sobre la conexión a tierra. La sección 3 explica la metodología aplicada a la esfera rodante y la estructura de la programación. La sección 4 profundiza en el examen de los resultados y evalúa la seguridad eléctrica para las personas y la infraestructura. Por último, la sección 5 revela los descubrimientos del estudio.

## 2. MATERIALES

### 2.1 Tipos de descargas atmosféricas

Según la norma IEC (2006), se identifican dos categorías fundamentales de descargas atmosféricas:

- Las descargas descendentes, caracterizadas por un precursor que desciende de la nube al suelo, y que se observan predominantemente en áreas con topografía plana y estructuras bajas.
- Las descargas ascendentes, que se definen por un precursor que asciende desde la superficie hasta la nube, son evidentes en las estructuras que están expuestas o elevadas. La probabilidad de que caiga un rayo aumenta en proporción directa a la altitud de la estructura y depende de las condiciones meteorológicas existentes.

### 2.2 Nivel ceráunico

El nivel cero se define por el recuento medio anual de días de tormenta y la duración de fenómenos meteorológicos que ocurren en una región designada Orbea (2017). En los días caracterizados por tormentas, se prevé que los truenos se manifiesten al menos una vez. Es crucial reconocer que la incidencia de los truenos puede variar a lo largo de un período de 24 horas.

### 2.3 Sistema de apantallamiento

El sistema de protección contra rayos consta de varios elementos, incluidos puntos de recolección que redirigen las descargas atmosféricas lejos de la terminal aérea designada, evitando así la incidencia de un rayo que caiga sobre un sitio en particular. Es imperativo que estos puntos estén diseñados para garantizar su eficacia operativa. Al absorber la energía de la descarga, es crucial que los puntos faciliten su transmisión al suelo mediante una disposición sistemática de bajantes horizontales y verticales. Estos bajantes se caracterizan por su conductividad superior y están diseñados específicamente para transportar la energía de descarga de manera eficiente a lo largo de vías que presentan una resistencia eléctrica mínima. Este procedimiento se implementa para reducir la probabilidad de que se produzcan arcos eléctricos y la aparición de corrientes que podrían representar un peligro considerable para la seguridad. Posteriormente, la energía de la descarga se dirige a un sistema de conexión a tierra, que comprende una serie de elementos conductores incrustados debajo de la superficie. Estos componentes establecen una conexión eléctrica fiable con el suelo, lo que permite disipar la energía sin dañar la infraestructura.

### 2.4 Técnica de la esfera rodante

La implementación de la metodología de esferas rodantes constituye un enfoque táctico para mitigar los efectos de las perturbaciones atmosféricas. Esta metodología se basa en el concepto fundamental de que, en la proximidad del cuerpo celeste descendente, que se acerca a la Tierra en medio de una descarga atmosférica, la intensidad de las corrientes de rayos disminuye en comparación con las corrientes inducidas por los fenómenos de los relámpagos. Esta estrategia abarca la progresión de una esfera teórica hacia la estructura protectora. En la unión de la esfera y la estructura de protección, se coloca una punta colectora para evitar el contacto directo entre la esfera y la estructura. Que funciona como punto de contacto para la esfera IEC (2006).

### 2.5 Factor de riesgo eléctrico en el sistema de protección contra descargas atmosféricas

El posible riesgo de deterioro de los aparatos eléctricos y electrónicos contenidos en un entorno debido a una descarga atmosférica merece una consideración cuidadosa. Este peligro eléctrico debe evaluarse cuidadosamente al diseñar y seleccionar sistemas de protección adaptados a la estructura específica. La tabla de normativa IEC 62305-2 y Rousseau et al. (2008) proporciona valores estándar para evaluar los factores de riesgo y sugiere emplear un software, como el Risk Assessment, para realizar los cálculos. Este software se fundamenta en la normativa mencionada y contiene los valores típicos de los factores de riesgo.

### 2.6 Sistema de puesta a tierra

Cuando se produce una descarga atmosférica, la inductancia que afecta a la longitud del electrodo de conexión a tierra manifestará su impacto, lo que provocará la localización de la corriente de fuga alrededor del área donde cae la corriente del rayo. En consecuencia, esta localización creará una distribución irregular del potencial terrestre. Como resultado, la distribución de la corriente y los campos electromagnéticos se verá afectada por los potenciales variables en los diferentes puntos de conexión a tierra. Además, se recomienda asegurar que cada punta del sensor tenga una conexión a tierra dedicada. El valor ideal de resistencia de la malla sería cercano a cero ohmios, lo que facilitaría el flujo sin obstáculos de la corriente del rayo. Sin embargo, lograr esto es inviable debido a varios factores, incluidos el tipo de material conductor, la longitud y el área de la sección transversal. El estándar IEEE (2013) y el IEEE 142 definen los valores esenciales que es necesario tener en cuenta para los cálculos de puesta a tierra de acuerdo con los criterios especificados.

## 3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta tiene como objetivo facilitar el desarrollo del sistema de apantallamiento dentro de un edificio, en seis etapas.

- En la etapa preliminar, se recopila la información pertinente a la configuración arquitectónica del edificio. Al mismo tiempo, las evaluaciones de la resistividad del suelo se llevan a cabo empleando el método de Wenner, que incorpora una variedad de mediciones.

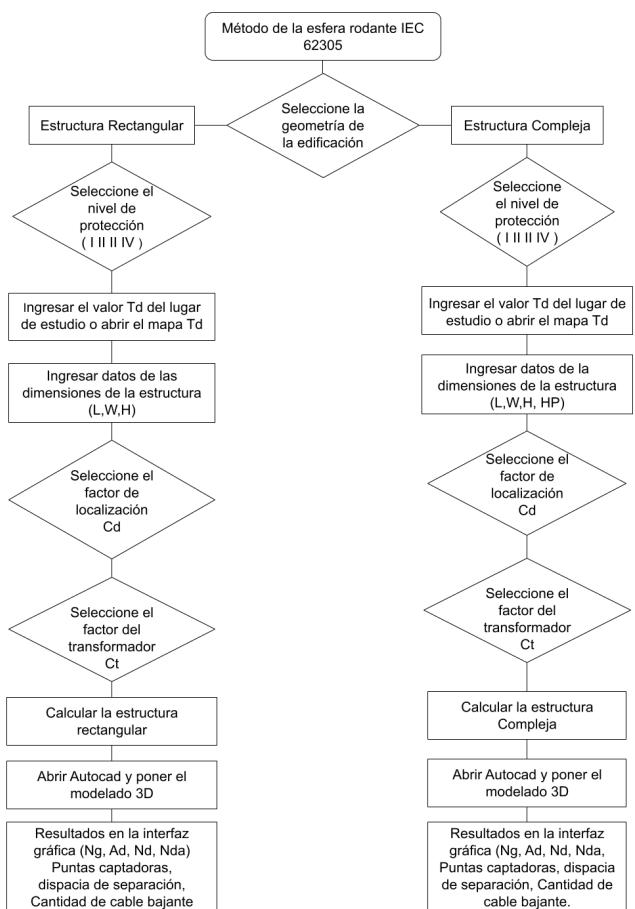
- En la segunda etapa, se lleva a cabo una evaluación de los riesgos de acuerdo con las estipulaciones en la norma IEC 62305-2 para evaluar la solidez estructural del edificio.
- En la tercera etapa, la metodología electrogeométrica se emplea para determinar las rutas de las descargas eléctricas y para situar con precisión las puntas de los sensores sobre el marco estructural.
- En la cuarta etapa, la evaluación de la resistencia del suelo se ejecuta de acuerdo con los protocolos delineados en el estándar IEEE Std 142, con el objetivo de determinar la idoneidad del valor de resistencia pertinente al sistema objeto de examen.
- En la quinta etapa, se lleva a cabo un análisis del sistema de acuerdo con los estándares por la norma IEEE 80. Esta fase concreta la evaluación de varios elementos, entre los que se incluyen, la tensión de contacto, la tensión escalonada, el elevado potencial de conexión a tierra, la corriente de malla, la resistencia de la malla y las características del controlador.
- En la sexta etapa, se lleva a cabo el proceso de análisis de los equivalentes para facilitar la determinación de las corrientes eléctricas en diferentes ubicaciones dentro del sistema de protección a fin de protegerse contra las perturbaciones atmosféricas durante la séptima fase posterior.
- Durante la octava etapa, se lleva a cabo la verificación del análisis de riesgos para determinar la seguridad estructural. En caso de que se identifiquen discrepancias, se debe volver a evaluar una fase posterior del procedimiento y proponer una estrategia alternativa que incorpore la evaluación de los peligros eléctricos dentro del marco especificado.
- Finalmente, en la novena etapa se lleva a cabo la simulación para replicar las corrientes eléctricas producidas a través de la descarga atmosférica dentro de los diversos subsistemas que componen el sistema de protección.

### 3.1 Configuración de programación para el método de la esfera rodante

El algoritmo emplea la biblioteca Tkinter en Python para la creación de una interfaz gráfica de usuario. Este procedimiento implica la importación de los módulos necesarios y el establecimiento de variables esenciales. Posteriormente, se crea una función para gestionar la configuración de formas rectangulares y complejas, que abarca una secuencia de comandos posteriores:

- 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



**Figura 1.** Esquema de flujo para la técnica de la esfera rodante conforme a la norma IEC 62305

La Figura 1 ilustra el proceso para implementar el algoritmo de acuerdo con la norma IEC 62305. La información ingresada en la interfaz se alinea con la configuración rectangular que se muestra en la Figura 1. El algoritmo se diseñó específicamente para administrar varios tipos de formas rectangulares, que van desde las más simples hasta las más complejas. Para la evaluación de los resultados y su validación, se examina un escenario particular (Chiliqinga y Guanoluisa, 2017), siguiendo las pautas descritas en la norma IEC 62305.

### 3.2 Configuración para la programación del cálculo de la resistencia al suelo

El código comienza por establecer una base estructurada mediante la incorporación de módulos esenciales, como Tkinter y matemáticas, seguido de la creación de funciones responsables de ejecutar los cálculos y mostrar la información. La construcción de la interfaz visual se logra mediante la utilización de los widgets de Tkinter, que abarcan funciones activadas por la interacción del usuario. Esta funcionalidad permite a los usuarios ingresar datos, seleccionar preferencias, realizar cálculos específicos y visualizar

las tablas y gráficos correspondientes. Siguiendo las directrices descritas en la norma 142 del IEEE para la determinación de la resistencia al suelo, el código tiene como objetivo facilitar la comprensión y la utilización por parte de los usuarios.

### 3.3 Los procesos sugeridos por la norma IEEE 80 se utilizan para la evaluación del sistema de puesta a tierra

Para establecer una malla de conexión a tierra de acuerdo con las especificaciones descritas en el estándar IEEE 80, es imperativo cumplir con una serie de procedimientos delineados en dicho estándar. En primer lugar, es necesario delinear claramente el propósito previsto de la malla, así como el lugar de instalación específico. Además, deben establecerse criterios precisos de resistencia en relación con las corrientes de conexión a tierra y de falla, junto con la elección adecuada de los materiales para la infraestructura de conexión a tierra. La determinación de la configuración y las dimensiones de la malla es de importancia, ya que requiere la identificación de los puntos de conexión con el aparato eléctrico, los conductores de protección y el sistema de conexión a tierra de la instalación eléctrica. Es imprescindible verificar que la resistencia calculada al suelo cumpla con los estándares y realizar evaluaciones in situ para evaluar la eficacia de la malla. La supervisión y el mantenimiento periódicos de la malla son indispensables para garantizar su rendimiento óptimo de las normas de seguridad.

### 3.4 Estructura del proyecto para el sistema de puesta a tierra IEEE Std. 80

La metodología de programación se centra en la utilización de la biblioteca Tkinter de Python para la creación de una interfaz gráfica de usuario interactiva. Adicionalmente, se emplean bibliotecas complementarias, como ttk, tkinter messagebox, PySimpleGUI y PIL (Image, ImageTK), junto con funciones matemáticas y sqrt de Python para realizar cálculos numéricos. Un elemento crucial del programa reside en la integración de la función validar, responsable de validar las selecciones realizadas en las listas desplegables presentes en la interfaz. En función de la selección elegida, los valores correspondientes se transmiten posteriormente a segmentos específicos denominados "DATA\_1", en los que los usuarios ingresan datos que incluyen voltajes, impedancias, resistencias, factores de corrección y las dimensiones de la malla. Los datos proporcionados se utilizan para el cálculo de las corrientes, las relaciones entre ellas, los diámetros de los conductores y la resistencia de la malla. Después de esto, la corriente máxima que fluye a través de la malla, el incremento del potencial del suelo (GPR) y el voltaje a través de la malla se determinan mediante la aplicación de ecuaciones y fórmulas específicas en la sección siguiente. Posteriormente, estos hallazgos se evalúan en función de los criterios establecidos, que abarcan el voltaje escalado y el voltaje táctil, para validar la adherencia. También se examina el cumplimiento del criterio para determinar la resistencia máxima de la malla. Si la resistencia calculada coincide o cae por debajo de la resistencia máxima predeterminada, se considera que se cumple el criterio; de lo contrario, se considera que no cumple.

La Figura 2 describe 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.

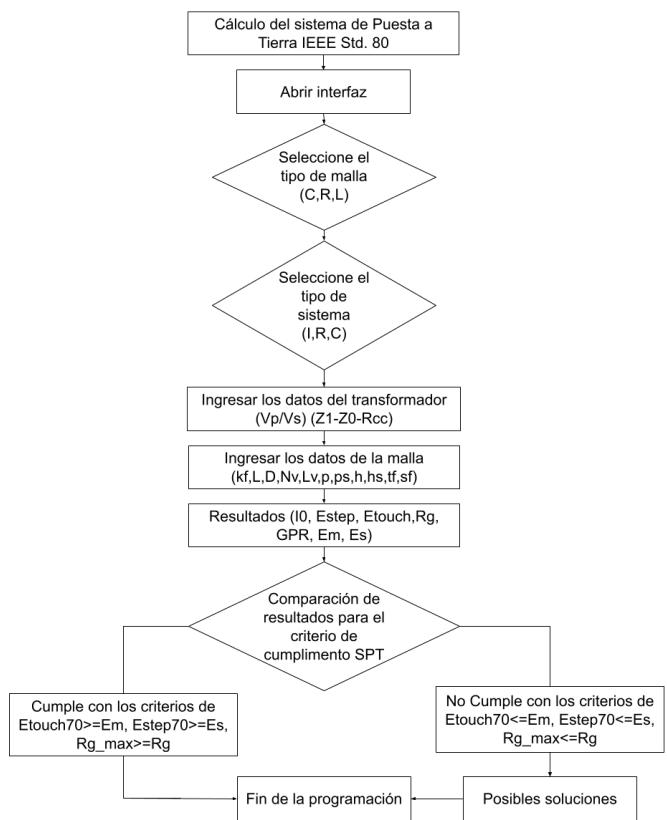


Figura 2. Flujo gráfico para el proceso de cálculo de conexión a tierra

En la interfaz gráfica de usuario, se introducen los datos esenciales para el cálculo del sistema de puesta a tierra. Los valores introducidos se ajustan a las directrices descritas en el estándar IEEE Std 80. Como se muestra en el diagrama de flujo en la Figura 2, es imperativo identificar un tipo de malla apropiado para el análisis computacional y la clasificación del sistema asociado. Estos datos son vitales para determinar el umbral de resistencia permitido para la malla.

### 3.5 Estructura de programación para los equivalentes eléctricos

El procedimiento se inicia con la importación de las bibliotecas matemáticas y Tkinter, que facilitan los complejos cálculos matemáticos y la construcción de la interfaz gráfica de usuario. Se describen una variedad de funciones: una diseñada para determinar las características de una varilla, que abarca la resistencia, la capacitancia y la inductancia; otra destinada a calcular los parámetros de la malla de conexión a tierra; una función dedicada a la evaluación de cables horizontales y verticales de forma aislada; una función de visualización destinada a mostrar datos relacionados con las equivalencias de los conductores; y una función que aclara los detalles sobre las equivalencias de las varillas de soldadura de cobre. La interfaz principal incluye etiquetas, campos de entrada y botones que

activan los cálculos y muestran los resultados pertinentes.

### 3.6 Configuración del proyecto para la simulación de descargas atmosféricas

Los equivalentes eléctricos se construyen utilizando Atpdraw, mientras que el generador Heidler se emplea para replicar la descarga atmosférica, con una amplitud de 150000 A y un tiempo de onda completa de  $1 \times 10^{-6}$  segundos. La información que se presenta en la Tabla 4 se utiliza para la configuración de los equivalentes eléctricos relacionados con los subsistemas de protección. Tras completar el circuito y ejecutar la simulación, se genera un archivo esencial denominado "P14", que requiere la conversión en matrices o vectores mediante el software PL42mat.

Los datos se importan a Python utilizando la biblioteca correspondiente y, a continuación, se generan gráficos mediante la biblioteca matplotlib. La interfaz gráfica de usuario, creada con Tkinter, muestra los valores máximos en los modos actual y temporal para cada simulación. La Figura 3 muestra el diagrama de flujo que muestra la funcionalidad del algoritmo.

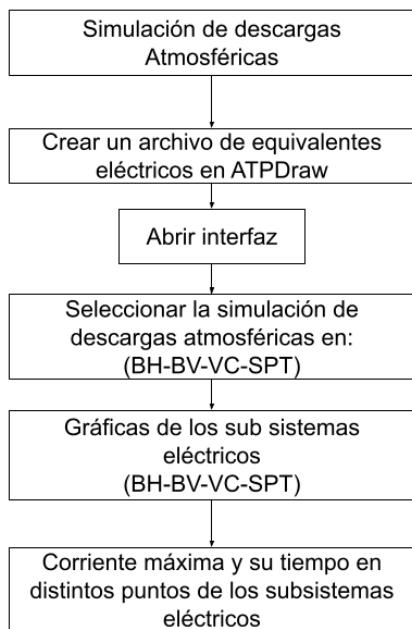


Figura 3. Flujo gráfico de la simulación de descargas atmosféricos

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Estimar el riesgo eléctrico según la IEC 52305-2

La Tabla 1 delinea los componentes empleados para evaluar el riesgo dentro de un marco, teniendo en cuenta los factores ambientales y los atributos físicos, como la presencia anual de rayos, el tamaño de la estructura, los detalles relacionados con su protección y los datos sobre las medidas de protección externas. Esta investigación se ajustó a las directivas descritas en la norma IEC 52305-2.

La evaluación del riesgo eléctrico se lleva a cabo de acuerdo con el programa de evaluación de riesgos descrito en la norma IEC 62305 para determinar el sistema de protección necesario para cualquier estructura. Tras esta evaluación, utilizando un software dedicado a la evaluación de riesgos, los hallazgos se documentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de investigación del peligro

Investigación de riesgo eléctrico	Simbología	Valor
Largo	L	38.00
Ancho	W	25.00
Alto	H	25.00
Espesor de descarga terrestre	Ng	120.00
Superficie de captación de descargas	Ad	28071.46
La posición relativa de la estructura.	Cd	0.25
Cantidad de hechos peligrosos directa	ND	0.01
Cantidad de hechos peligrosos adyacente	NDA	0.17

Los resultados sugieren la necesidad de mitigar los riesgos asociados con la pérdida de vidas humanas, valorados en  $3.62 \times 10^{-5}$ . Sobre la base de los descubrimientos antes mencionados, es crucial implementar un sistema externo de protección contra rayos (SECPR) y un traje de protección contra rayos en forma de nube (SIPCR). Este examen se centrará en la evaluación de un sistema de protección externo contra las descargas eléctricas, con la sugerencia de realizar más investigaciones para identificar un sistema de protección interno. Los resultados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Hallazgos derivados de la investigación de riesgos

Tipo de peligros	Valor	Observación
Peligro de daño de patrimonio	$1.77 \times 10^{-6}$	No Reparar
Peligro de daños de vidas humanas	$3.62 \times 10^{-5}$	Reparar
Peligro de daños de servicios públicos	$4.46 \times 10^{-4}$	No Reparar
Peligro de daños económicas	$3.54 \times 10^{-5}$	No Reparar

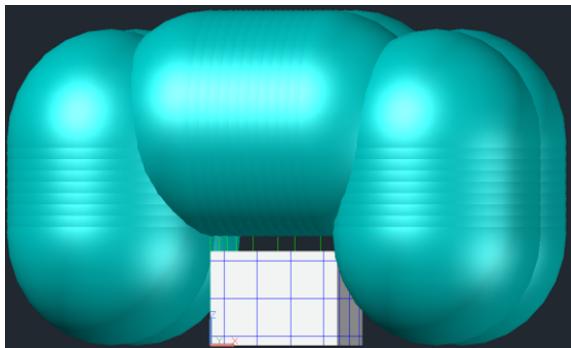
### 4.2 Cálculo de la resistividad del suelo

Es crucial evaluar la resistividad del suelo antes de establecer un sistema de puesta a tierra adecuado. Esta resistividad está sujeta a variaciones a escala global y se ve afectada por los cambios estacionales, influenciados por varios factores, como la concentración de sales minerales, los niveles de humedad, la temperatura, la compactación del suelo y el contenido de electrolitos. El manuscrito presenta el método de Wenner, que emplea una configuración lineal de cuatro polos. Para validar la precisión del algoritmo utilizado en los cálculos de resistividad, se deben proporcionar datos de entrada que coincidan con los valores sugeridos en el estudio. El valor de resistividad promedio determinado en la investigación es de  $37.687 \Omega\text{m}$ .

### 4.3 Cálculo de la investigación de la esfera rodante IEC 62305-3

Para autenticar el algoritmo formulado, se lleva a cabo una evaluación de un sistema de protección contra rayos de acuerdo con las recomendaciones descritas en la norma IEC 62305. La evaluación está diseñada específicamente para una instalación de almacenamiento ubicada en el departamento de Junín. Se consideran varios aspectos, incluidas las dimensiones del edificio y detalles cruciales como el nivel de protección, la frecuencia de las tormentas eléctricas (Td) y las dimensiones del pararrayos.

La Figura 4 muestra el modelo de Autocad producido por el algoritmo desarrollado e ilustra un diseño que se alinea con el creado en el estudio para protegerse contra las perturbaciones atmosféricas. En ambos casos, se adquieren un total de 12 puntos de sensor. El modelo integra bajantes horizontales y verticales, además de calcular la longitud necesaria para la instalación de los sistemas de bajantes.



**Figura 4.** Creación en 3D del modelo de la esfera rodante utilizando Autocad

#### 4.4 Cálculo de las resistencias a tierra según la normativa IEEE Std. 142

La evaluación y el cálculo de las resistencias del suelo se llevan a cabo mediante varias configuraciones descritas en el estándar IEEE Std. 142. Al utilizar los datos de la tesis de Chiliquinga y Guanoluisa (2017) para verificar el algoritmo desarrollado, se emplea una configuración básica de varillas. La interfaz proporcionada detalla una tabla de información estándar para las varillas Coperweld junto con sus características respectivas. Para validar el algoritmo, se introduce un conjunto de datos: donde el radio mide 0,007938 m, la longitud es de 1,8 m y la resistividad del suelo es de 99,2 Ω. En consecuencia, el valor calculado asciende a 33.266 Ωm.

#### 4.5 Solución del algoritmo en el sistema de puesta a tierra

El algoritmo Python se desarrolló para configurar el sistema terrestre siguiendo los procedimientos descritos en el estándar IEEE 80. El software ofrece varias funciones, incluida la selección de la categoría de malla y el sistema preferido para realizar los cálculos. La norma IEEE Std. 80 detalla la metodología para el cálculo del sistema de conexión a tierra y las diferentes disposiciones de malla. Para verificar la funcionalidad del programa, se utilizaron los datos de ejercicios del anexo B y se seleccionó la configuración de malla en forma de "L". En la Tabla 3 la comparación entre los resultados obtenidos del reglamento y los del programa para SPT en Python mostró similitudes. El estándar IEEE 80 corresponde al número 1, mientras que el SPT corresponde al número 2. Cabe destacar que el error de voltaje táctil es el más alto, con un valor de  $-2.94 \times 10^{-3}$  V.

#### 4.6 Respuesta del algoritmo para los equivalentes eléctricos de los sistemas

Al determinar los equivalentes eléctricos, es esencial comprender a fondo el diseño del sistema de protección dentro de la estructura. Esto incluye consideraciones como la cantidad de puntos de

**Tabla 3.** Verificación del programa del sistema de puesta a tierra conocido como malla en "L"

$I_0$ (A) Step	$E$ (V) Touch	$E$ (V)	$E_m$ (V)	$E_s$ (V)	GRP (V)	$R_g$ Ω
1	1060	2686	838	761	575	5228
2	1059	2696	841	761	574	5228

recogida, el espacio entre los bajantes, el diseño de la conexión a tierra y la configuración del sistema de conexión a tierra. La Tabla 4 presenta los hallazgos con respecto a las características eléctricas de la estructura. En este análisis, se utilizó una varilla soldada de cobre de 1,80 m, junto con un conductor de malla AWG 2/0 para los bajantes AWG 2. Estas medidas específicas se usarán para la simulación basada en el modelo eléctrico elegido en Atpdraw.

**Tabla 4.** Los equivalentes eléctricos de varilla y malla para determinar los resultados

Varilla a tierra	valor	Cable horizontal	Valor
		$C_h$	$3.3806 \times 10^{-11} F$
$C_v$	$1.6930 \times 10^{-10} F$	$L_h$	$2.2939 \times 10^{-7} H$
$L_v$	$2.12 \times 10^{-6} H$	$R_h$	0.395 Ω
Malla a tierra	valor	Cable vertical	Valor
$R_{grid}$	0.0001921 Ω	$C_v$	$7.0801 \times 10^{-11} F$
$C_{grid}$	$1.6869 \times 10^{-11} F$	$L_v$	$2.5453 \times 10^{-7} H$
$L_{grid}$	$1.0684 \times 10^{-6} H$	$R_v$	0.197 Ω

#### 4.7 Respuesta del algoritmo para la simulación contra descargas atmosféricas

En esta sección se describen los resultados del algoritmo utilizado para simular la protección contra las perturbaciones atmosféricas. Se trata de un circuito eléctrico que representa las contrapartes de la máscara protectora actual, desarrollada en Atpdraw. La simulación atmosférica se lleva a cabo utilizando un generador Heidler situado en la parte superior de la estructura. El algoritmo de programación de Python incorpora una interfaz con cuatro botones: corrientes descendentes horizontales actuales, corrientes descendentes verticales, corrientes en varillas de soldadura de cobre y corrientes en la conexión a tierra del sistema. Los resultados abarcan la corriente máxima y su correspondiente temporización, tal como se detalla en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Respuesta de las corrientes en las etapas de los sistemas eléctricos

Características	$I_{max}$ (A)	Tiempo de ocurrencia (s)
Conductor horizontal Superior	14822.391	$6.20 \times 10^{-5}$
Conductor vertical superior	63.842	$2.00 \times 10^{-6}$
Varilla coperweld Interior	57.977	$2.00 \times 10^{-6}$
Puesta a tierra interna	$2.52 \times 10^{-11}$	$1.00 \times 10^{-6}$

#### 4.8 Respuesta del análisis de riesgo eléctrico instalado los sistemas eléctricos de protección

El análisis del riesgo eléctrico, después de la instalación de los subsistemas, se determina mediante la protección de conformidad con la norma IEC 62305, utilizando el software de Risk Assessment. Esta etapa en particular es crucial para finalizar el procedimiento de dimensionamiento de las estructuras para protegerlas contra las descargas atmosféricas, empleando el método de esferas rodantes. El resultado del cálculo revela que el edificio carece de cualquier riesgo.

#### 4.9 Análisis de errores del algoritmo desarrollado

Para autenticar la solidez del algoritmo formulado, es imprescindible compararlo con los estándares empleados en su desarrollo. Como se ilustra en la Tabla 6, el porcentaje de error converge hacia cero. En consecuencia, el empleo de este instrumento informativo evitará imprecisiones o diseños insatisfactorios en las próximas iniciativas.

**Tabla 6.** Estudio del peligro eléctrico instalados los sistemas de protección

Vida	Servicios	Patrimonio	Económico
$6.6 \times 10^{-6}$	$4.46 \times 10^{-4}$	$1.77 \times 10^{-6}$	$3.54 \times 10^{-5}$
Alg desarrollador	Valor	Norma aplicada	error
Resistividad del suelo	33.687	IEEE Std 800	0.02 %
Esfera rodante	12	IEC 62305	0.00 %
Puesta a tierra	33.266	IEEE Std 142	0.02 %
Puesta a tierra promedio	2.74	IEEE Std 80	0.01 %

## 5. CONCLUSIONES

Las circunstancias actuales manifiestan la falta de software diseñado para proteger a los edificios comerciales y residenciales en contra de las descargas atmosféricas. Por el contrario, existe una variación significativa en los niveles de riesgo entre las diferentes regiones geográficas, con picos que alcanzan un promedio de entre 100 y 120 en la región amazónica, seguida posteriormente por la sierra y las zonas costeras. No obstante, existen normas internacionales que rigen la planificación, la construcción y la puesta en funcionamiento de los sistemas de protección para edificios, instalaciones de generación de energía, subestaciones, líneas de transmisión y otros activos de infraestructura críticos.

Desafortunadamente, estos marcos regulatorios no se aplican a los edificios o estructuras residenciales de nuestra nación. Durante la formulación del algoritmo, fue imprescindible establecer una interfaz comunicativa entre Python y Atpdrawn para mejorar la evaluación y el cálculo de los parámetros eléctricos y no eléctricos que son fundamentales para realizar análisis de riesgos eléctricos de acuerdo con las medidas de protección IEC 52305-2, IEEE Std 80 de conexión a tierra, IEEE Std 142 e IEC 62305. Los cálculos subrayaron la necesidad de abordar los peligros relacionados con la posible pérdida de vidas humanas; en consecuencia, se hizo esencial implementar un sistema (SECPR) y un (SIPCR). El algoritmo que se desarrolló se verificó mediante ejercicios detallados en los estándares establecidos por el IEEE y la IEC. Al introducir los datos y realizar las comparaciones de los resultados resultantes, se observó una tendencia perceptible en la que el error convergía hacia cero, tal como se describe en el análisis de errores relacionado con el algoritmo.

## REFERENCIAS

Abrial, L., y Azogue, G. (2021). *Diseño y modelado del sistema de puesta a tierra y apantallamiento para la Estación Cotopaxi del Instituto Geográfico Militar, Ecuador*[Tesis Ingeniería, Universidad Técnica de Cotopaxi] Repositorio institucional de la Universidad Técnica de Cotopaxi. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8181>

Chiliquinga, J., y Guanoluisa, L. (2017). *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.*, Colombia[Tesis Ingeniería, Universidad Técnica de Cotopaxi] Repositorio institucional de la Universidad Técnica de Cotopaxi. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/4469>

Harvey, B., y Mena, A. (2021). *Software de aplicación para el diseño de sistemas de apantallamiento contra descargas atmosféricas*, Colombia[Tesis Ingeniería, Universidad del Norte] Repositorio institucional de la Universidad del Norte. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/8158#page=1>

Heidler, F.H., Flisowski, Z., Zischank, W.J., Bouquegneau, C., Mazzetti, C., y It, C.M. (2008). Parameters of lightning current given in IEC 62305 – background, experience and outlook, experience and outlook. *International Conference on Lightning Protection*, 1-8. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14273884>

IEEE. (2004). *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines* (IEEE Std 1410-2004) <https://ieeexplore.ieee.org/document/643517>

IEC. (2010). *Norma de protección contra rayos* (IEC 62305) <https://www.iec.ch/homepage>

IEC. (2006). *Protection against lightning-part 1* (IEC 62305-1) <https://www.iec.ch/homepage>

IEEE.(2013). *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding* (IEEE Std 80-2013) <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7109078>

Lorenz, R., Leblanc, F., Aplin,K., Yair, Y., Harrison, T., Lebreton, J., y Blanc, M. (2008). Planetary Atmospheric Electricity. Space Sciences Series of ISSI. Springer, New York, NY, 30(1), 287-294. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-87664-1\\_18](https://doi.org/10.1007/978-0-387-87664-1_18)

Lucietti, T., Coelho, V., y Canever, L. (2019). Simulation of a Lightning Protection System Considering the Different Protection Levels. *International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/SIPDA47030.2019.8951587>

Maslowski, G., Rakov, V., y Ziembra, R. (2014). Experimental investigation and modeling of surge currents in lightning protection system. *XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929565>

National, O., y Atmospheric, A. (2023). NOAA's National Weather Service is building a Weather-Ready Nation by providing better information for better decisions to save lives and livelihoods. *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Obtenido de: <https://www.noaa.gov/weather>

Orbea, E. (2017) *Mapa Isoceráunico del Ecuador* <https://elestudianeelectromecanico.blogspot.com>

Radicevic, B., y Savic, M. (2011). Experimental Research on the Influence of Wind Turbine Blade Rotation on the Characteristics of Atmospheric Discharges. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(4), 1181-1190. <https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2162240>

Rousseu, y A., Kern, A. (2008). How to deal with environmental risk in IEC 62305-2. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), 521-527. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973180>

Tan, Y., Guo, X., Zhu, J., Shi, Z., y Zhang, D. (2014). Influence on simulation accuracy of atmospheric electric field around a building by space resolution. *Atmospheric research*, 138(1), 301-307. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.023>

Verdugo, K., Aries, L., y Merchán, H. (2007). Contribución para la Implementación de una Red de Detección de Rayos en Ecuador. *Revista Politécnica*, 41(1), 17-24. Obtenido de: <https://revistapolitecnica.epn.edu.ec>

Viera, M., y Janiszewski, J. (2015). The effect of a group of buildings on the lightning electromagnetic fields. *International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)*, 54-58. <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2015.7339332>

## BIOGRAFÍA



**Carlos Quinatoa.** Nació en Tanicuchi - Latacunga en 1988. Recibió el título de Ingeniero en Sistemas Eléctricos de Potencia por la Universidad Técnica de Cotopaxi en el 2013 y de Master en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica por la Universidad Tecnológica de Pereira en el 2018 y Aspirante a Doctor en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica por la Universidad Central de Venezuela periodo 2020-2025, estudios realizado mediante la

obtención de la beca Alemana DAAD, miembro activo del Instituto de Ingeniero Eléctrico y Electrónicos IEEE, investigador junior de la IEEE, docente investigador de ingeniería y maestría en electricidad de la UTC.



**Damian Alban.** Damián Albán. Nació en Latacunga – Cotopaxi en 1989. Recibió el título de Ingeniero Electromecánico por la Universidad de las Fuerzas Armadas sede en Latacunga en el 2017, y de Master en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia en el 2023, cuenta con una experiencia profesional en diferentes empresas

privadas, con cargos de Eléctrico de mantenimiento, en grupos OVERHOOOL, grupos de mantenimiento etc. Con experiencia de

más de 4 años en docencia Universitaria, docente investigador de ingeniería y maestría especialmente en área de ciencias exactas. Trabajo también prestando servicios profesionales, de instalación y mantenimiento de bombas, tableros de control, redes de baja tensión, montaje de transformadores y equipos industriales.



**Xavier Proaño Maldonado.** Nació en Latacunga Ecuador, en 1985. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2010; de Master en Gestión de Energías de la Universidad Técnica de Cotopaxi en 2013. Su campo de estudio se encuentra relacionado con Alto Voltaje, Energías Renovables, Protecciones Eléctricas y Sistemas Eléctricos de Potencia. Docente de planta a tiempo completo de la Carrera de Ing. Eléctrica en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la UTC.



**Luís Camacho.** Nació en Machala, Ecuador en 1997. Estudiante de la carrera de Ingeniería en Electricidad de la Universidad Técnica de Cotopaxi, se desempeña como ayudante de catedra en el área de investigación de la Universidad Técnica de Cotopaxi. Sus campos de investigación están relacionados con las energías renovables y los sistemas eléctricos de potencia.

