



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE ELÉCTRICIDAD
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE
PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EDIFICACIONES
BASADO EN EL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE.**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico

Autor:

Paguay Llamuca Alex Ivan

Tutor Académico:

Ms.C. Xavier Alfonso Proaño Maldonado

LATACUNGA – ECUADOR

AGOSTO - 2023



DECLARACIÓN DE AUDITORIA

Yo, PAGUAY LLAMUCA ALEX IVAN declaro ser autor del proyecto de investigación: **“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EDIFICACIONES BASADO EN EL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE”**, siendo el **MS.C. XAVIER ALFONSO PROAÑO MALDONADO**, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi ya sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en La presente propuesta tecnológica, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Paguay Llamuca Alex Ivan

C.I: 020251201-8



AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del proyecto de investigación sobre el Título:

“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EDIFICACIONES BASADO EN EL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE”, del señor **PAGUAY LLAMUCA ALEX IVAN** de la carrera de **INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**, considero que dicho informe investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 17 de Agosto del 2023

Atentamente

Ms.C. Xavier Alfonso Proaño Maldonado

CC: 050265642-4



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad De Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: Paguay Llamuca Alex Ivan, con el título de Proyecto de titulación: **“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EDIFICACIONES BASADO EN EL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE”** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

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

Latacunga, Agosto del 2023

Para constancia firman:

Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza Ms.C.
C.C. 050328786-4

Ing. Edgar Roberto Salazar Achig Ms.C.
C.C. 050284761-9

Ing. Juan Pablo Palacios Solorzano Ms.C.
C.C. 130688632-4

AGRADECIMIENTO

Con humildad y profundo agradecimiento, presento este trabajo de tesis titulado "Desarrollo de un algoritmo para el dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones basado en el método de la esfera rodante". Este logro representa meses de esfuerzo, dedicación en un arduo trabajo. El cual no habría sido posible sin el apoyo incondicional de Dios por brindarme la fortaleza y guía necesaria. Adicionalmente, a mi amada familia, mi pilar inquebrantable, Asimismo, agradezco a mi alma mater, la Universidad Técnica de Cotopaxi, por brindarme el espacio académico junto con los recursos para llevar a cabo esta investigación, También, reconozco el valioso aporte de mis profesores cuya orientación y dedicación elevaron mi trabajo a un nivel superior. Por último, a mis compañeros de clase y amigos, gracias por compartir inolvidables momentos, haciendo este camino más ameno y enriquecedor.

Paguay Llamuca Alex Ivan

DEDICATORIA

A mi familia que ha sido el motor para culminar esta meta, A mis respetados profesores y amigos, les agradezco por su valiosa orientación y sabios consejos que han enriquecido mi formación académica y personal. También, a todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron en este trayecto, su colaboración ha sido fundamental en la culminación de este proyecto, incluso si no están presentes en este momento.

Paguay Llamuca Alex Ivan

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUDITORIA	ii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA.....	vi
INFORMACIÓN GENERAL	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. EL PROBLEMA	2
1.1.1. Situación Problémica.....	2
1.1.2. Formulación del problema.....	2
1.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DOCUMENTAL.....	2
1.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	4
1.4. BENEFICIARIOS	4
1.4.1. Beneficiarios directos	4
1.4.2. Beneficiarios indirectos	4
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.6. HIPÓTESIS	5
1.7. OBJETIVOS.....	5
1.7.1. Objetivo General.....	5
1.7.2. Objetivos Específicos	5
SISTEMA DE TAREAS	6
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y TÉCNICA.....	7
2.1.1. Las Descargas Atmosféricas.....	7
2.1.2. Tipos de Descargas Atmosféricas.....	7
2.1.3. La corriente normalizada de la descarga atmosférica.....	8
2.1.4. Efecto de una Descarga Eléctrica en un ser Humano.....	8

2.1.5.	Periodo Vulnerable	9
2.2.	NIVEL CERÁUNICO	10
2.3.	SISTEMA DE APANTALLAMIENTO	11
2.3.1.	Método de la Esfera Rodante	11
2.3.2.	Determinación del nivel de protección	13
2.3.3.	Las terminales aéreas y conductores de bajada	13
2.4.	FACTOR DE RIESGO ELÉCTRICO EN EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	14
2.4.1.	Riesgo eléctrico en el sistema de protección contra descargas atmosféricas	14
2.4.2.	Componentes del riesgo eléctrico	15
2.4.3.	Necesidad y conveniencia económica de la protección contra el rayo	15
2.5.	SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	15
2.5.1.	Valores aceptables para la resistencia de malla	15
2.5.2.	Cálculo de la Resistencia Basada en la Normativa IEEE Std. 142	16
2.5.3.	Método de cuatro puntos para el cálculo de la resistividad	16
2.6.	EQUILALENTES ELÉCTRICOS DE LIGHTNING PROTECTION STANDARD.	17
2.6.1.	Subsistema de Terminación Aérea	17
2.6.2.	Subsistemas de Conductores de Descenso	18
2.6.3.	Subsistema de Terminación a Tierra	19
2.6.4.	Simulación de un Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas en ATPDraw	19
2.7.	ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN	21
3.	MATERIALES Y METODOLOGÍA	22
3.1.	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	22

3.1.1.	Investigación Aplicada	22
3.1.2.	Investigación Descriptiva	22
3.1.3.	Investigación Experimental	23
3.1.4.	Investigación Analítica	23
3.2.	MATERIALES E INSTRUMENTOS	23
3.2.1.	Normativas	23
3.2.2.	Software.....	24
3.3.	METODOLOGÍA PARA EL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DE UNA EDIFICACIÓN.....	25
3.3.1.	Análisis del nivel de riesgo según la IEC 62305-2.....	27
3.3.2.	Estructura de Programación Para el Cálculo de la Resistividad del Suelo.....	27
3.3.3.	Estructura de Programación Para el Método de la Esfera Rodante.....	28
3.3.4.	Estructura de Programación Para el Cálculo de la Resistencia a Tierra.....	30
3.3.5.	Pasos Recomendados por la Normativa IEEE Std. 80 para el Cálculo del Sistema de Puesta a Tierra.	31
3.3.6.	Estructura de Programación Para el Sistema de Puesta a Tierra IEEE Std. 80 ..	32
3.3.7.	Estructura de Programación Para los Equivalentes Eléctricos.	34
3.3.8.	Estructura de Programación Para la Simulación de Descargas Atmosféricas	36
4.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	37
4.1.	EVALUACIÓN DEL RIESGO ELÉCTRICO SEGÚN LA IEC 52305-2	37
4.2.	CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO	38
4.3.	CÁLCULO DEL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE IEC 62305	39
4.4.	CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS A TIERRA SEGÚN LA NORMATIVA IEEE STD. 142.....	40
4.5.	RESULTADOS DEL ALGORITMO DEL sistema de puesta a tierra	41

4.5.1.	Resultados del Algoritmo Para los Equivalentes Eléctricos de los Sub Sistemas	42
4.5.2.	Resultados del Algoritmo Para la Simulación Contra Descargas Atmosféricas..	43
4.5.3.	Resultado del Análisis de Riesgo Eléctrico Instalado los Sub Sistemas Eléctricos de Protección	44
4.6.	ANÁLISIS DEL ERROR DEL ALGORITMO DESARROLLADO	44
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
5.1.	CONCLUSIONES	45
5.2.	RECOMENDACIONES	45
6.	REFERENCIAS	46
7.	ANEXOS	50
7.1.	INFORME ANTIPLAGIO PROYECTO DE TITULACIÓN	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores Aceptables de resistencia de malla.....	16
Tabla 4.2 Parámetros del análisis de riesgo.....	37
Tabla 4.3 Resultados obtenidos del análisis de riesgo.....	38
Tabla 4.4 Comprobación del Programa de sistema de puesta a tierra malla en “L”	42
Tabla 4.5 Resultados de los equivalentes eléctricos.....	42
Tabla 4.6 Resultados de las corrientes en los sub sistemas eléctricos.....	43
Tabla 4.7 Análisis del error del algoritmo desarrollado	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Forma de onda de una descarga atmosférica	8
Fig. 2.2 Representación mediante impedancias del cuerpo humano.....	9
Fig. 2.3 Período vulnerable.....	10
Fig. 2.4 Mapa isocerámico del mundo.....	11
Fig. 2.5 Método de la esfera rodante.	12
Fig. 2.6 Componentes para el sistema de apantallamiento.....	13
Fig. 2.7 Configuraciones para el cálculo de las resistencias a tierra	16
Fig. 2.8 Subsistemas de terminación aérea, bajantes y el SPT.....	17
Fig. 2.9 Corriente en los sistemas de terminación aérea y conductores de descenso.....	18
Fig. 3.10 Metodología del Sistema de Apantallamiento	26
Fig. 3.11 Análisis del riesgo según la IEC 62305-2.	27
Fig. 3.12 Diagrama de flujo de resistividad del suelo	28
Fig. 3.13 Diagrama de flujos para el método de la esfera rodante IEC 62305.....	29
Fig. 3.14 Ingreso de datos de la estructura rectangular	30
Fig. 3.15 Diagrama de Flujo del cálculo de puesta a tierra.	31
Fig. 3.16 Pasos a seguir para el diseño del Sistema de Puesta a tierra [21].	32
Fig. 3.17 Diagrama de flujo del Sistema de Puesta a Tierra Std. 80	33
Fig. 3.18 Ingreso de datos para el algoritmo del sistema de puesta a tierra.	34
Fig. 3.19 Diagrama de flujo estructura de programación para los equivalentes eléctricos	35
Fig. 3.20 Diagrama de Flujos de la simulación de descargas atmosféricas.....	36
Fig. 3.21 Interfaz gráfica de la simulación de la descarga atmosférica.....	36
Fig. 4.22 Datos ingresados para el cálculo del riesgo eléctrico.....	38
Fig. 4.23 Interfaz de la resistividad del suelo	39
Fig. 4.24 Resultados de la estructura rectangular	39
Fig. 4.25 Modelado en 3D del método de la esfera rodante en AutoCAD.....	40
Fig. 4.26 Interfaz gráfico del cálculo de las resistencias a tierra.....	40
Fig. 4.27 Interfaz gráfico del sistema de puesta a tierra	41
Fig. 4.28 Interfaz de cálculo del Sistema de puesta a tierra de Python.	41
Fig. 4.29 Análisis del riesgo eléctrico instalados los sub sistemas de protección.....	44

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Datos del Nivel Isocerámico	50
Anexo 2 Efectos de la corriente en el cuerpo Humano	50
Anexo 3 Clasificación del nivel de protección	51
Anexo 4 Distancias Típicas de separación [12].....	51
Anexo 5 Nivel de Protección.....	52
Anexo 6 Riesgo eléctrico en el sistema de protección contra descargas atmosféricas [11].	52
Anexo 7 Componentes del riesgo en una estructura para cada tipo de pérdidas [10].	52
Anexo 8 Componentes del riesgo eléctrico [11]	53
Anexo 9 Datos de la varilla Copperweld y el conductor	53
Anexo 10 Estructura de Programación de Python [27].	54
Anexo 11 Configuración de puesta a tierra según la normativa IEEE Std. 142 [24].	54
Anexo 12 Datos para las bajantes horizontales y verticales del sistema de apantallamiento...	55
Anexo 13 Datos de ingreso para el cálculo de equivalentes eléctricos para varilla copperweld	55
Anexo 14 Funciones del algoritmo de programación del método de la esfera rodante.....	55
Anexo 15 Interfaz principal del algoritmo.	56
Anexo 16 Datos de ingreso para el análisis de riesgo inicial	56
Anexo 17 Resultados del caso de estudio para la protección de descargas atmosféricas	56
Anexo 18 Validación del programa de sistema de puesta a tierra en Python.....	57
Anexo 19 Equivalentes eléctricos de un sistema de protección contra descargas atmosféricas	57
Anexo 20 Diseño de los sub sistemas electricos de protección en ATPDraw	58
Anexo 21 Datos del generador Heidler	59
Anexo 20 Resultados de la simulación de la descarga atmosférica en la edificación	59
Anexo 21 Bajantes Horizontales	60
Anexo 22 Bajantes Verticales.....	60
Anexo 23 Varilla Copperweld.....	61
Anexo 24 Sistema de puesta a Tierra	61

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTADA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADA

TITULO: “DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EDIFICACIONES BASADO EN EL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE”

Autor:

Paguay Llamuca Alex Ivan

RESUMEN

El presente estudio se centró en el desarrollo de un algoritmo que permite dimensionar la protección contra descargas atmosféricas en edificaciones, basándose en el método de la esfera rodante, el cual permite el ingreso de datos al usuario mediante la interfaz gráfica. Su metodología de inicia con el levantamiento de información del proyecto a trabajar entre estos está el nivel cerámico, las dimensiones entre otras de la estructura. Se calcula los factores de riesgo mediante el software Risk Assessment, para identificar los posibles escenarios como son: pérdida de vidas humanas, interrupción de servicios públicos, daños al patrimonio cultural y pérdidas económicas, si es necesario corregirlos se sigue este proceso caso contrario el lugar está protegido: cálculo de la resistividad del suelo mediante la IEEE Std. 81, aplicación del método de la esfera rodante según la IEC 662305-3, sistema de puesta a tierra dada por la IEEE Std. 142 y la IEEE Std. 80. Para determinar el comportamiento de una descarga atmosférica en la edificación ya protegida, se establece el cálculo de los equivalentes eléctricos de la malla, varilla copperweld, conductores horizontales como los verticales, mediante los resultados dados se realiza un circuito en ATPDraw, el cual está vinculado a Python, este último proporciona las gráficas de la forma de onda de la corriente en los distintos sub sistemas de protección. Para completar y validar el proceso se calcula nuevamente los factores de riesgo. La validación del algoritmo se determina por su margen de error entre resultados tiende a cero, al ingresar los datos de ejercicios propuestos de normativas como la IEC, así también como la IEEE, lo que demuestra la efectividad del algoritmo propuesto.

Palabras Claves: Descargas atmosféricas, protección, algoritmo, dimensionamiento y Factores de riesgos.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TITLE: "DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR THE DIMENSIONING OF LIGHTNING PROTECTION IN BUILDINGS BASED ON THE ROLLING SPHERE METHOD"

Author:

Paguay Llamuca Alex Ivan

ABSTRACT

This study focused on the development of an algorithm that allows for sizing protection against atmospheric discharges in buildings, based on the rolling sphere method, which enables user data input through the graphical interface. Its methodology begins with gathering project information, including factors like lightning flash density and dimensions of the structure, among others. Risk factors are calculated using the Risk Assessment software to identify potential scenarios such as loss of human lives, disruption of public services, damage to cultural heritage, and economic losses. If corrections are necessary, this process is followed; otherwise, the location is protected: calculation of soil resistivity using IEEE Std. 81, application of the rolling sphere method according to IEC 662305-3, grounding system based on IEEE Std. 142 and IEEE Std. 80. To determine the behavior of a lightning discharge on the already protected building, calculations of electrical equivalents for the mesh, copperweld rod, horizontal, and vertical conductors are established. Using the obtained results, a circuit is created in ATPDraw, linked to Python, which provides waveform graphs of the current across various protection subsystems. To complete and validate the process, risk factors are recalculated. Algorithm validation is determined by its margin of error, which tends to zero when inputting data from proposed exercises based on standards such as IEC and IEEE. This demonstrates the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: Lightning discharges, protection, algorithm, sizing, risk factors.



AVAL DE TRADUCCIÓN

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

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: **“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EDIFICACIONES BASADO EN EL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE”** presentado por: **Paguay Llamuca Alex Ivan** egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizo bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

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

Latacunga, agosto del 2023

Atentamente,



firmado electrónicamente por:
BLANCA GLADYS
SANCHEZ AVILA



CENTRO
DE IDIOMAS

MSc. Blanca Gladys Sánchez Avila

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC

CI: 2100275375

INFORMACIÓN GENERAL

Título: Desarrollo de un algoritmo para el dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones basado en el método de la esfera rodante.

Fecha de inicio: 10/04/2023

Fecha de finalización: 14/08/2023

Lugar de ejecución: Universidad Técnica De Cotopaxi

Facultad que auspicia: Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA)

Carrera que auspicia: Carrera de Ingeniería en Electricidad

Proyecto Macro Asociado: Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

Equipo de Trabajo:

Grupo de Investigación: Sistemas Eléctricos de Potencia

Tutor de Titulación: Ms.C. Xavier Proaño Maldonado

Correo institucional: xavier.proano@utc.edu.ec

Nombre y apellido: Paguay Llamuca Alex Ivan

Correo institucional: alex.paguay4248@utc.edu.ec

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0714 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Explotación y diseño de Sistemas eléctricos de potencia

1. INTRODUCCIÓN

1.1. EL PROBLEMA

1.1.1. Situación Problémica

Es esencial evaluar y proteger adecuadamente las edificaciones contra descargas atmosféricas para garantizar la seguridad de las personas y equipos, así como la continuidad del suministro eléctrico. Por consiguiente, se requiere un desarrollar un software basado en el método de la esfera rodante para evaluar el riesgo de esta manera ofrecer soluciones de protección. Esto permitiría reducir los tiempos de cálculo de apantallamiento en los sistemas eléctricos.

1.1.2. Formulación del problema

¿Cómo desarrollar un algoritmo basado en el método de la esfera rodante para el dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones?

1.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DOCUMENTAL

La protección contra descargas atmosféricas (PDA) es un tema crucial en la ingeniería eléctrica y de construcción, ya que los rayos pueden provocar graves daños en los sistemas eléctricos, electrónicos, la estructura física de los edificios, así también la vida de las personas [1]. Por esta razón, es esencial comprender el fenómeno de los rayos y buscar formas de protección para minimizar sus efectos. Se debe destacar que la mayoría de los accidentes causados por rayos son evitables [2].

Por lo tanto, es fundamental tener un buen diseño de pararrayos, basado en normas y estadísticas de eventos, y realizar trabajos de mantenimiento del sistema de descarga atmosférica. De esta manera, se puede garantizar una protección adecuada contra las descargas atmosféricas y reducir los riesgos para la seguridad de las personas y los bienes materiales [2].

En la actualidad no todas las edificaciones disponen de un sistema de apantallamiento, ni de un sistema de puesta tierra que permita minimizar los daños frente a descargas atmosféricas y corrientes de falla de la red eléctrica. Para profundizar estos fenómenos eléctricos dependen de distintos factores como: la humedad, temperatura, presión y topología de los vientos, estos comportamientos son probabilísticos que se resumen en el nivel isocerámico o por densidad de descargas atmosféricas a tierra (DRT) [3].

La zona de los trópicos de Cáncer y Capricornio es donde existe mayor densidad de descargas atmosféricas a nivel mundial, debido a que esta región recibe mayor radiación solar que favorece a la formación de estos fenómenos eléctricos. En Venezuela por la confluencia del río Catatumbo con el lago de Maracaibo aproximadamente se registran 250 relámpagos por kilómetro cuadrado cada año. En Ecuador en la región amazónica existe un alto nivel isoceráunico de 120 descargas atmosféricas por kilómetro cuadrado cada año, con un promedio de 20 descargas eléctricas por año [3].

En [4] se enfocó en evaluar el sistema de apantallamiento de la zona de almacenamiento de explosivos 31 en la Estación Cotopaxi. El estudio destaca la importancia de implementar la normativa IEC 62305 para el análisis de riesgos y la seguridad. Focalizando el nivel de riesgo correspondiente a la zona de estudio.

En [5], [6] se realizó el estudio de la implementación de un sistema de protección contra descargas atmosféricas (LPS) en un edificio y se evaluó el desempeño de acuerdo a los distintos niveles de protección previstos en la IEC 62305-2, para con este análisis simularlo en el software ATPDraw, concluyendo que las divergencias entre los distintos niveles de protección se producen de acuerdo a la calidad de conductores y anillos de unión equipotenciales siendo más numerosos para los niveles I y II.

El objetivo del análisis del efecto de las tensiones inducidas por rayos es analizar cómo los dispositivos de protección contra sobretensiones (SPD) pueden ser colocados de manera efectiva para evitar daños en los sistemas de almacenamiento de energía durante las descargas atmosféricas. Los resultados del estudio muestran que la ubicación adecuada de los SPDs puede ayudar a minimizar los efectos de las descargas atmosféricas y garantizar la operación sostenible de los sistemas de almacenamiento de energía [7]

Las normas más utilizadas para la protección contra descargas atmosféricas son la IEC, la estadounidense ANSI /NFPA 78-1989, la colombiana NEC y la normativa IEEE. se hizo una comparativa dentro de estas normas determinando que los métodos más utilizados son los siguientes: esfera rodante, jaula de Faraday o método de la rejilla, ángulo de protección y cono de protección [6].

La normativa IEEE 1410 se centra en mejorar el rendimiento de las líneas eléctricas de distribución aéreas durante tormentas eléctricas. La guía establece recomendaciones para la selección y diseño de líneas de distribución aéreas y componentes asociados, incluyendo torres,

cables y aisladores, con el objetivo de reducir los efectos de los rayos en estas infraestructuras eléctricas. También se incluyen recomendaciones para la protección de los sistemas de energía eléctrica y para la gestión del riesgo de daños causados por los rayos [8].

En [9] describe el proceso de desarrollo del software de aplicación para el diseño de sistemas de apantallamiento basada en la normativa IEC 62305. También se detalla la importancia de la correcta evaluación del riesgo del impacto de rayos. Así también de que los sistemas de protección contra descargas atmosféricas pueden reducir los efectos negativos en los sistemas eléctricos.

La norma UNE-EN 62305 consta de tres partes que establecen los principios y medidas necesarios para la protección contra el rayo. La primera parte establece los principios generales de la protección contra el rayo, incluyendo la terminología, la evaluación del riesgo, el análisis de necesidades, los criterios de selección de protección y los procedimientos de inspección [10].

La segunda parte establece los métodos para medir los parámetros físicos de un rayo, como la corriente, la tensión, la duración, la energía y la frecuencia [11]. Por último, la tercera parte establece los principios y medidas de protección para una estructura contra el rayo, incluyendo la protección directa, indirecta y mediante equipotencialización, así como las pruebas y verificaciones de la eficacia de las medidas de protección. Estas partes de la norma proporcionan un marco completo para garantizar la protección contra el rayo en diferentes entornos y situaciones [12].

1.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

330000 Ciencias Tecnológicas /3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.05 Aplicaciones Eléctricas

1.4. BENEFICIARIOS

1.4.1. Beneficiarios directos

Universidad Técnica de Cotopaxi

1.4.2. Beneficiarios indirectos

Estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi

1.5. JUSTIFICACIÓN

Las descargas atmosféricas pueden causar daños en equipos eléctricos, interrupciones en el suministro de energía y, en casos extremos, poner en riesgo la vida de las personas que se encuentren en el interior de los edificios. El proceso actual de diseño y dimensionamiento de sistemas de protección contra descargas atmosféricas es complejo y requiere de un alto nivel de conocimiento técnico y de mucho tiempo para realizar los cálculos y análisis necesarios. Por ello, el desarrollo de un algoritmo basado en el método de la esfera rodante para el dimensionamiento de sistemas de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones es esencial para simplificar el proceso y hacerlo más accesible a aquellos que necesiten diseñar y calcular estos sistemas. La implementación de este algoritmo en el diseño y dimensionamiento de sistemas de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones va a contribuir a mejorar la seguridad de las mismas, reduciendo los riesgos para las personas que las habitan o trabajan en ellas y para los equipos eléctricos que se encuentran en su interior. Además, la accesibilidad y facilidad de uso del algoritmo pueden permitir su aplicación en un amplio rango de edificaciones, lo que puede contribuir a mejorar la seguridad en el sector de la construcción.

1.6. HIPÓTESIS

El desarrollo de un algoritmo para el dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas basado en el método de la esfera rodante garantizará su uso en diferentes proyectos eléctricos ya que tendrá un margen de error que tiende a cero.

1.7. OBJETIVOS

1.7.1. Objetivo General

Desarrollar un algoritmo para el dimensionamiento de protecciones contra descargas atmosféricas mediante el método de la esfera rodante.

1.7.2. Objetivos Específicos

Recopilar información en estado del arte de los procedimientos de apantallamiento basados en el método de la esfera rodante para edificaciones de forma rectangular y compleja.

Desarrollar el algoritmo de cálculo para la protección contra descargas atmosféricas basado en el método de la esfera rodante.

Validar el algoritmo desarrollado mediante normativas de diseño y cálculo como la IEC o la IEEE.

SISTEMA DE TAREAS

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultado de la actividad	Técnicas, medios e instrumentos.
<p>Recopilar información en estado del arte de los procedimientos de apantallamiento basados en el método de la esfera rodante para edificaciones de forma rectangular y compleja.</p>	<p>Descripción en estado del arte del dimensionamiento para la protección contra descargas atmosféricas basado en el método de la esfera rodante.</p> <p>Descripción del sistema de puesta a tierra.</p> <p>Descripción de la estructura de programación</p>	<p>Tablas comparativas según la normativa IEC 62305.</p> <p>Tablas y fórmulas del dimensionamiento para la protección contra descargas atmosféricas basado en el método de la esfera rodante.</p> <p>Tabla de estructura de programación.</p>	<p>Normativas Tesis</p>
<p>Desarrollar el algoritmo de cálculo para la protección contra descargas atmosféricas basado en el método de la esfera rodante.</p>	<p>Identificación de requisitos que debe cumplir el algoritmo.</p> <p>Análisis de los factores de riesgo</p> <p>Elaboración de la arquitectura del algoritmo para la protección contra descargas atmosféricas basado en el método de la esfera rodante.</p> <p>Elaborar el algoritmo para el cálculo del sistema de puesta a tierra y puesta a tierra.</p> <p>Elaborar el algoritmo para la simulación de la descarga atmosférica.</p>	<p>Procedimiento de cálculo para el desarrollo del algoritmo.</p> <p>Factores de riesgo a corregir.</p> <p>Algoritmo de cálculo para la protección contra descargas atmosféricas basado en el método de la esfera rodante.</p> <p>Algoritmo de puesta a tierra y sistema de puesta a tierra, luego el Circuito en ATPDraw.</p> <p>Gráficas de las corrientes en los sub sistemas de protección.</p>	<p>Uso de software especializado, herramientas y normativas relevantes.</p>
<p>Validar el algoritmo desarrollado mediante normativas de diseño y cálculo como la IEC o la IEEE.</p>	<p>Simulación de los algoritmos desarrollados mediante las fórmulas y constantes de las normativas IEEE Std. 80, 81 y la 142.</p> <p>Simulación del algoritmo de método de la esfera rodante mediante la metodología aplicada de la IEC 62605.</p> <p>Simulación de la descarga atmosférica en distintos puntos de los sub sistemas de protección.</p>	<p>Tabla de datos de la estructura de análisis.</p> <p>Tabla de datos comparativos que incluyan los valores de las variables y los resultados esperados según la normativa IEC 62305.</p> <p>Tabla de datos para la validación de los algoritmos de las normativas IEEE 80, 81 y 142.</p> <p>Tabla de datos de las corrientes en distintos puntos de los subsistemas.</p>	<p>Uso de software especializado, normativas y tesis relevantes.</p>

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y TÉCNICA

El desarrollo de un algoritmo para el dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones basado en el método de la esfera rodante es una tarea que garantizar la seguridad eléctrica, la protección de las personas y los bienes. Las mismas son fenómenos eléctricos naturales que pueden causar daños significativos en las edificaciones así también en los sistemas eléctricos cercanos. El método de la esfera rodante es una técnica de cálculo que permite determinar la zona de protección en una edificación, basándose en el tamaño y la forma de la estructura.

Para diseñar un sistema de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones, es necesario tener un conocimiento profundo de los conceptos teóricos relacionados con la protección eléctrica contra sobretensiones y las descargas atmosféricas, así como los métodos de protección. Además, se debe evaluar el uso de herramientas informáticas y lenguajes de programación para el diseño y desarrollo del algoritmo.

2.1.1. Las Descargas Atmosféricas

Las descargas atmosféricas son la acumulación de cargas eléctricas opuestas entre las nubes que generan atracción o repulsión a través de campos electromagnéticos, cuando dos cuerpos están contrariamente cargados se produce este intercambio de energía entre ellos. Este fenómeno es producido debido a los cambios de temperatura, humedad y presión sobre la superficie terrestre, las características de la geografía del relieve influyen en gran medida en la formación de este tipo de tormentas, donde suelen iniciarse sobre regiones montañosas [13]. En [14] se dice que en el planeta tierra, ocurren un promedio de 100 descargas atmosféricas cada segundo, por lo cual se producen un promedio de 8.5 millones de actividades al día, causando un estimado de 7000 muertos y más de 15000 heridos anualmente en el mundo.

2.1.2. Tipos de Descargas Atmosféricas

Se determinan dos tipos básicos de las descargas atmosféricas según la normativa IEC 62305 la primera parte [10]:

- Las descargas descendentes las cuales inician por un precursor descendente desde la nube hacia la tierra, estas aparecen principalmente en terrenos llanos y estructuras poco elevadas [10].

- Las descargas ascendentes las cuales 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 [10].

Las descargas negativas forman el 90 % de las descargas que caen a tierra a lo largo de todo el planeta, menos del 10 % de las descargas son positivas. Así también los rayos iniciados desde la tierra hasta la nube, estas últimas son muy raras. Estos fenómenos dependen de muchos factores como lo son el nivel cerámico de la zona, la contaminación, la altura de la edificación en que se encuentran entre otras más.

2.1.3. La corriente normalizada de la descarga atmosférica

La corriente normalizada de la descarga atmosférica de la Fig. 1 describe el tiempo de subida, el tiempo de bajada y el valor de cresta de la corriente [10].

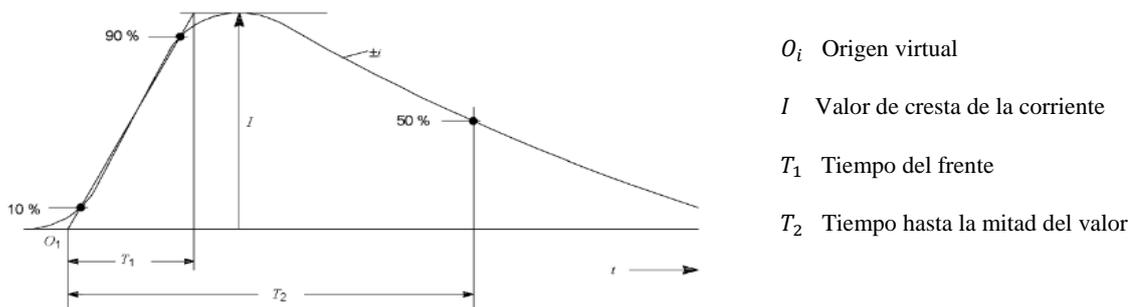


Fig. 2.1 Forma de onda de una descarga atmosférica [10]

2.1.4. Efecto de una Descarga Eléctrica en un ser Humano

La resistencia eléctrica del cuerpo humano depende de múltiples factores por lo que su valor se puede considerar en cierto grado aleatorio [15]. Entre los factores que intervienen experimentalmente, podemos señalar: tensión aplicada, edad, sexo, estado de la superficie de contacto - humedad, suciedad, trayectoria de la corriente, alcohol en la sangre, presión de contacto, etc. Para el organismo humano y como base de cálculo se pueden considerar los siguientes valores:

- Valor máximo: 3.000 Ohmios
- Valor medio: 1.000/2.000 Ohmios

- Valor mínimo: 500 Ohmios

El cuerpo humano actúa como un semiconductor, de ahí que su resistencia varía con la tensión, de acuerdo a la ley de Ohm [16]. El cuerpo humano en concordancia con los componentes eléctricos puede ser asociado a la Fig. 2.

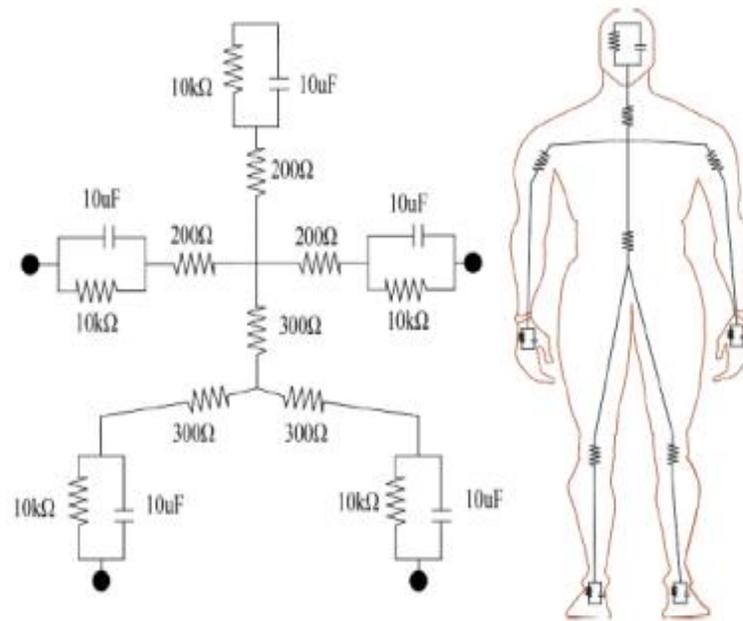


Fig. 2.2 Representación mediante impedancias del cuerpo humano [16].

Experimentalmente está demostrado que la intensidad que atraviesa el cuerpo humano puede ocasionar lesiones o la muerte debido al accidente eléctrico y se distingue el Anexo 2.

2.1.5. Periodo Vulnerable

El periodo vulnerable es una etapa del ciclo cardíaco en la que las fibras del corazón presentan una excitabilidad no uniforme, lo que puede llevar a la fibrilación ventricular si se las estimula con corriente eléctrica de suficiente intensidad. Esta fase ocurre al inicio de la onda T y abarca alrededor del 10% al 20% del ciclo cardíaco. En términos generales se requiere un umbral de fibrilación ventricular mucho más alto en el caso de la CC que en el de la CA [17].

Las principales diferencias entre los efectos de la CA y la CC en el cuerpo humano se deben a que la corriente de excitación estimula los nervios y los músculos, lo que puede provocar la fibrosis auricular y ventricular. Estas diferencias están principalmente relacionadas con las variaciones en la intensidad de la corriente, especialmente cuando se establece o se interrumpe el circuito para producir una estimulación similar. En el caso de la CC, se requiere una

circulación constante de corriente de alrededor de 2 a 4 veces mayor que las intensidades necesarias en el caso de la CA [17].

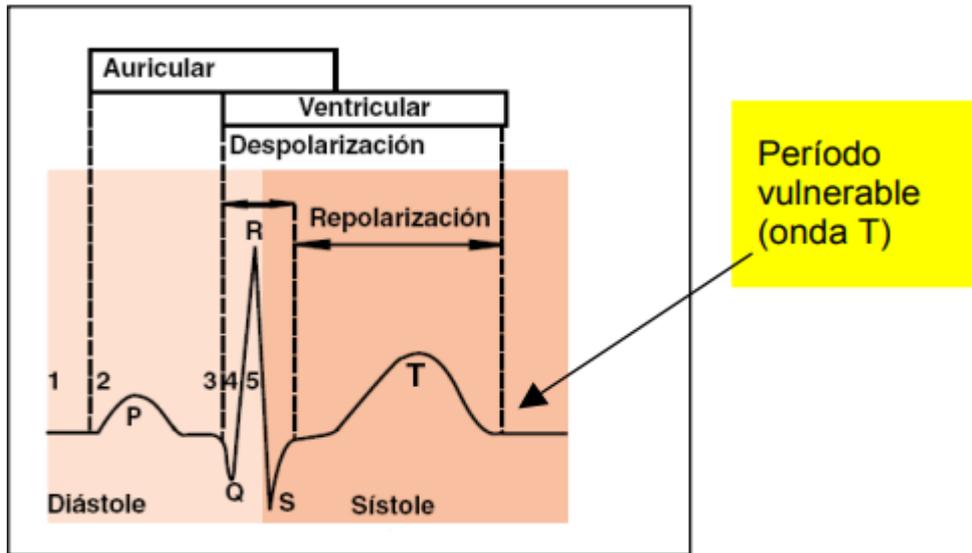


Fig. 2.3 Peródo vulnerable [17].

2.2. NIVEL CERÁUNICO

El nivel ceráunico 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 [18].

En [19] los niveles isoceráunicos se suelen llevar a mapas ceráunicos, la Fig. 4 describe el mapa ceráunico del mundo, en la cual se evidencia una mayor cantidad de nivel ceráunico a nivel de la línea ecuatorial. La Ecuación (1) describe las descargas sobre kilómetro cuadrado por año.

$$N_0 = C * N_i \text{ descargas/km}^2 \text{ por año} \quad (1)$$

En donde:

- N_0 Densidad de descarga eléctrica
- C Constante para una determinada región entre 0,1 y 0,2
- N_i Nivel Isoceráunico

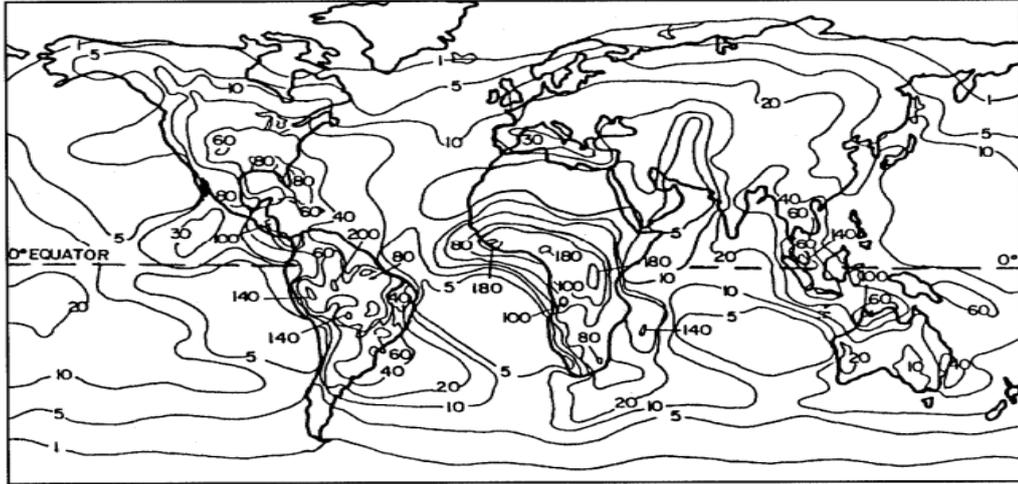


Fig. 2.4 Mapa isocerámico del mundo [20].

Para el análisis del nivel cerámico del Ecuador, se toma de referencia los resultados de la tesis expuesta en [21] dichos resultados están tabulados en el Anexo 1

2.3. 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 [19].

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 [19].

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 [19].

2.3.1. Método de la Esfera Rodante

El método de la esfera rodante es una técnica utilizada en la protección contra descargas atmosféricas. 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 [22].

La esfera se sigue moviendo y se observa en qué puntos comienza a descender, lo que indica la necesidad de añadir puntas adicionales de protección. El objetivo es que la esfera se mantenga soportada únicamente por puntas captadoras y nunca toque la estructura a proteger, evitando así daños en caso de una descarga atmosférica [22]. En la Fig. 5 se puede observar el método descrito.

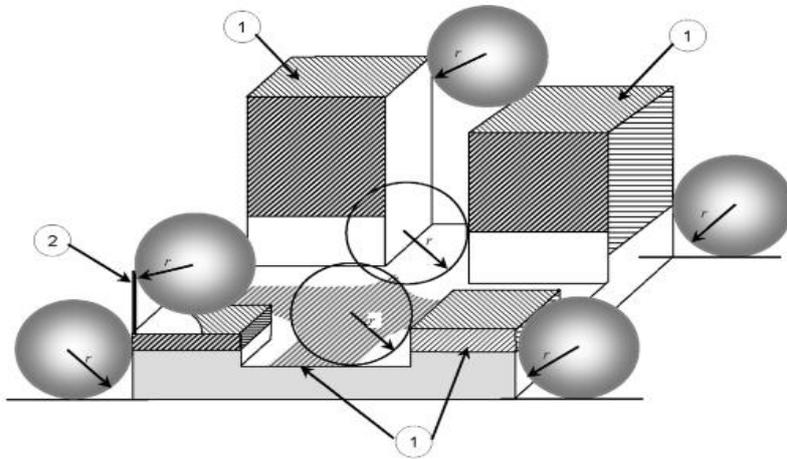


Fig. 2.5 Método de la esfera rodante [12].

El principio físico del método de la esfera rodante, está basado en que alrededor del extremo del líder descendente, que se aproxima a tierra, existen los valores mínimos de la corriente de rayo r metros (m), que está en función del valor de la corriente generada por el rayo i , en kilo Amperes (kA). La distancia de atracción se calcula mediante la Ecuación (2).

$$r = 10i^{0.65} \quad (2)$$

Dónde:

r Radio de la esfera ficticia (m)

i Es el valor de cresta de la corriente (kA)

Cuando se analiza un sistema formado por dos puntas captadoras según [12] es necesario calcular la penetración de la esfera rodante entre el espacio a proteger y su resultado debe ser menor a la altura que se esté protegiendo, con el uso de la Ecuación (3).

$$p = r - \left[r^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

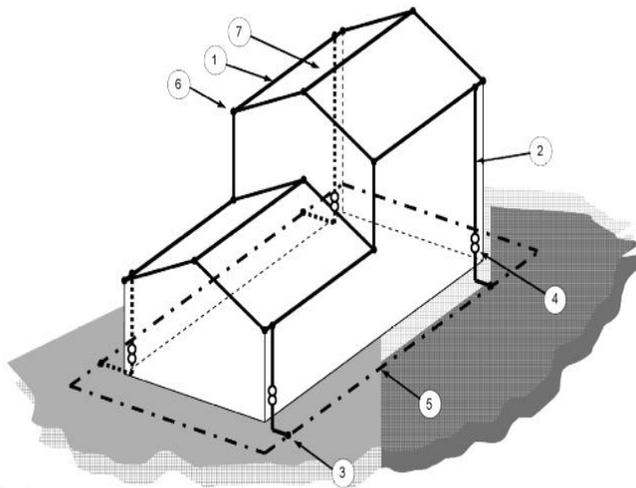
p Penetración de la esfera

r Radio de la esfera

d Distancia entre puntas captadoras

2.3.2. Determinación del nivel de protección

Para diseñar el sistema de apantallamiento es necesario determinar el radio de la esfera a utilizar en el diseño, para lo cual se determina el nivel de protección en base a su nivel de riesgo según las recomendaciones de la normativa descrita en [12]. La selección del nivel de protección a utilizarse en el diseño para la ubicación y altura de las terminales aéreas depende del tipo y uso de la estructura conforme a lo indicado en el Anexo 3 y Anexo 5. En la Fig. 6 se describe los elementos de un sistema de apantallamiento de una estructura compleja.



1. Conductor Horizontal
2. Conductor de bajada
3. Conexión tipo T- resistente a la corrosión
4. Junta de control
5. Disposición de tierra tipo B, electrodo de en un anillo
6. Conexión tipo T en la arista del tejado
7. Tamaño de la malla

Fig. 2.6 Componentes para el sistema de apantallamiento [10].

2.3.3. Las terminales aéreas y conductores de bajada

La instalación de conductores de bajante (horizontales y verticales) debe ser equidistante y conectada a un punto equipotencial. Se deben respetar las distancias de seguridad y el sistema

de apantallamiento debe contar con al menos un conductor de bajada por cada estructura de soporte. Si se utilizan dos o más conductores de bajada por punta captadora, deben respetarse los valores indicados en la Anexo 4. Además, el ángulo entre los bajantes horizontales y verticales no debe superar los 90 grados.

2.4. FACTOR DE RIESGO ELÉCTRICO EN EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

La probabilidad de que los equipos eléctricos y electrónicos instalados en una estructura sean dañados por una descarga atmosférica. 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 establece diferentes niveles de riesgo eléctrico. El factor de riesgo tomando en cuenta los términos de la normativa IEC 62305-2 [11], como el número promedio de descargas atmosféricas que causan daño por año en las estructuras, depende de:

- La cantidad promedio de pérdidas indirectas.
- La cantidad de descargas atmosféricas anuales que afectan a la estructura.
- Posibilidad de daño causado por uno de las descargas atmosféricas influyentes.

2.4.1. Riesgo eléctrico en el sistema de protección contra descargas atmosféricas

La normativa IEC 62305-2 es importante para prevenir los daños que pueden ocurrir como resultado de una descarga atmosférica. Al comprender los diferentes tipos de daños y las fuentes de daño asociadas, se pueden tomar medidas para proteger a las personas, las estructuras y los sistemas eléctricos y electrónicos contra los efectos de las descargas atmosféricas [11].

En el Anexo 6 presenta el riesgo eléctrico en el sistema de protección contra descargas atmosféricas. Además, se identifican tres tipos de daños: seres vivos, daños físicos así también, el fallo de sistemas eléctricos y electrónicos, de esta manera se relacionan con diferentes tipos de pérdidas y riesgos. En el Anexo 7 se puede apreciar el tipo de pérdida según el daño y el riesgo correspondiente que puede ser aplicado en estructuras, hospitales o estructuras similares donde las fallas del sistema podrían poner en peligro la vida del ser humano y en el caso de pérdida de animales.

Para tomar en cuenta la instalación de medidas de protección con respecto al cuidado de daño por posibles descargas atmosféricas en estructuras o zonas cercanas se debe analizar el nivel de protección a instalarse, el beneficio económico al instalar medidas adecuadas [11].

2.4.2. Componentes del riesgo eléctrico

La normativa IEC 62305-2 establece los riesgos asociados a los rayos en las estructuras y los posibles daños que pueden ocurrir en función del tipo de riesgo. En el Anexo 8 se identifican ocho riesgos diferentes, que van desde daños a los seres vivos por contacto con tensiones de paso y contacto, hasta daños físicos y fallas en los sistemas internos de la estructura debido a chispas, sobretensiones y corriente eléctrica del rayo. La normativa indica los diferentes tipos de pérdidas que podrían ocurrir en función del riesgo, que pueden variar en gravedad y pueden incluir daño humano, fallas en equipos o interrupción del servicio [11].

2.4.3. Necesidad y conveniencia económica de la protección contra el rayo

En cuanto a la conveniencia económica de la protección contra el rayo, la normativa IEC 62305-2 destaca la importancia de realizar una evaluación de riesgos para determinar el nivel de protección necesario contra el rayo en una estructura y garantizar que se tomen medidas adecuadas para reducir el riesgo a un nivel seguro. Es necesaria la protección contra el rayo si el riesgo R (R_1 a R_3) es superior al riesgo R_T , $R > R_T$. En este caso se deben aplicar medidas de protección con el fin de reducir el riesgo R (R_1 a R_3) al valor de riesgo R_T . Si el objetivo a proteger puede aparecer más de un tipo de pérdida, la condición $R < R_T$ debe protegerse en cada tipo de pérdida (L_1 , L_2 y L_3) [11].

2.5. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

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. 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 [23].

2.5.1. Valores aceptables para la resistencia de malla

El valor ideal de la resistencia de la malla sería que tenga 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. Es por eso que las normativas establecen valores aceptables de la resistencia de malla, como se muestra en la Tabla 1 donde se establece valores de resistencia de malla 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.

Tabla 2.1 Valores Aceptables de resistencia de malla

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

2.5.2. Cálculo de la Resistencia Basada en la Normativa IEEE Std. 142

La normativa [24] también conocida como el "Código de práctica para el diseño de sistemas de distribución de potencia", establece el cálculo de las resistencias a tierra en la Fig. 7 se establece distintos tipos de configuraciones para el cálculo. Para ellos es necesario tener la resistividad del suelo los datos de la varilla coperwelld a instalarse y el conductor a ser instalado instalado en el Anexo 9

	Hemisphere radius a		Four-point star length of arm L, depth s/2
	One ground rod length L, radius a		Six-point star length of arm L, depth s/2
	Two ground rods s > L; spacing s		Eight-point star length of arm L, depth s/2
	Two ground rods s < L; spacing s		Ring of wire diameter of ring D, diamter of wired, depth s/2
	Buried horizontal wire length 2L, depth s/2		buried horizontal strip legh 2L, section a b y b depth s/2, b<a/8
	Right angle turn of wire length of arm L, depth s/2		Buried horizontal round plate radius a, depth s/2
	Three-point star length of arm L, depth s/2		Buried vertical round plate radius a, depth s/2

Fig. 2.7 Configuraciones para el cálculo de las resistencias a tierra

2.5.3. Método de cuatro puntos para el cálculo de la resistividad

Un buen método para medir la resistividad aparente de grandes volúmenes de tierra no perturbada es el método Wenner [25]. Se instalan cuatro picas en la tierra, todas a profundidad b y espaciadas en línea recta. Se pasa una corriente de prueba I entre las dos sondas exteriores, el potencial V entre las dos sondas internas se mide con un potenciómetro o medidor de alta impedancia. Entonces, la relación V/I da la resistencia R en ohmios, cuando la profundidad no es superior a 0,1 a. Entonces, el usuario puede asumir b = 0 y la Ecuación (4) se convierte en:

$$\rho = 2\pi * A * R \tag{4}$$

2.6. EQUIVALENTES ELÉCTRICOS DE LIGHTNING PROTECTION STANDARD.

El LPS está formado por subsistemas internos y externos. La parte externa está compuesta por el subsistema de terminación en el aire, los conductores descendentes y la terminación en la tierra. Estos subsistemas están diseñados para interceptar los rayos en el edificio, incluyendo los rayos laterales, y conducir la corriente de rayo desde el punto de impacto hasta la tierra, dispersándola en el suelo sin causar daños ni chispas [26].

2.6.1. Subsistema de Terminación Aérea

El subsistema de terminación aérea puede estar formado por varillas y mástiles, conductores suspendidos y conductores en una rejilla. Los componentes deben colocarse en las esquinas salientes. Los métodos más aceptables para determinar el punto de instalación del subsistema de terminación aérea son el método del ángulo de protección (método de Franklin), el método de la esfera rodante y el método de rejilla (jaula de Faraday). son adecuados para todos los casos, mientras que el método del ángulo de protección se recomienda para edificios de formato sencillo, sometidos a límites de altura para los captores [5].

En muchas aplicaciones, el método de Franklin no es suficiente para proyectar un sistema de protección efectivo y, por lo tanto, se combina con el método de rejilla. Se añaden conductores en una topología de rejilla en este subsistema y, en estructuras muy largas, el sistema también se complementa con varillas de rayos de 30 a 50 cm. Algunas investigaciones indican que, en edificios con alturas superiores a 60 m, pueden ocurrir rayos laterales, especialmente en las puntas, lo que hace necesario el uso de las rejillas como un subsistema de captura lateral, como se muestra en la Fig. 2.8, con sus dimensiones definidas de acuerdo al nivel de protección [5].

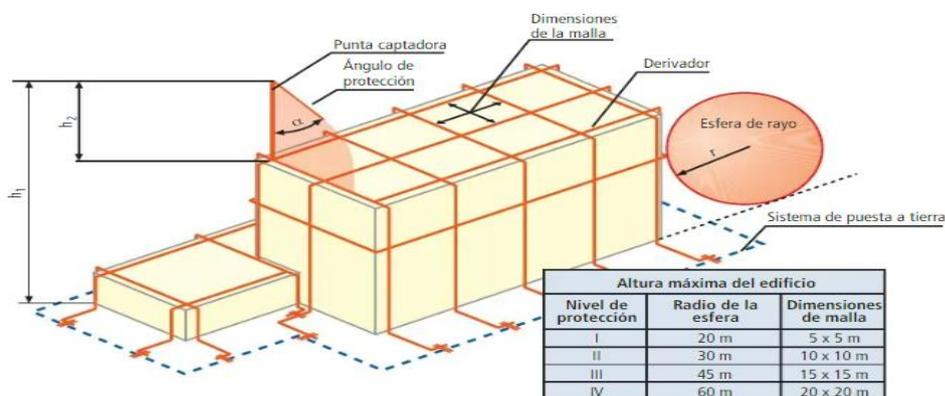


Fig. 2.8 Subsistemas de terminación aérea, bajantes y el SPT [5].

El principio básico de protección propuesto por Michael Faraday, conocido como jaula de Faraday o método de rejilla, es utilizar conductores de captura dispuestos en una topología en forma de anillo, formando rejillas o jaulas. Formada por varias rejillas de conductores, la jaula de Faraday evita la entrada de la corriente de rayo dentro del edificio. Faraday demostró que cuando las corrientes se distribuyen de manera uniforme, el campo magnético dentro de la jaula es nulo y cuando no son uniformes, el campo magnético dentro del edificio es muy pequeño. Cuando el rayo golpea el edificio, no se disipa de manera uniforme y luego genera inductancias internas debido a la variación del campo magnético dentro de la jaula. La protección proporcionada por este método es eficiente porque las pequeñas rejillas crean campos magnéticos opuestos, conduciendo la corriente de rayo al rincón de la rejilla obligándola a fluir a la tierra a través de los conductores de descenso la Fig. 9 explica el método [5].

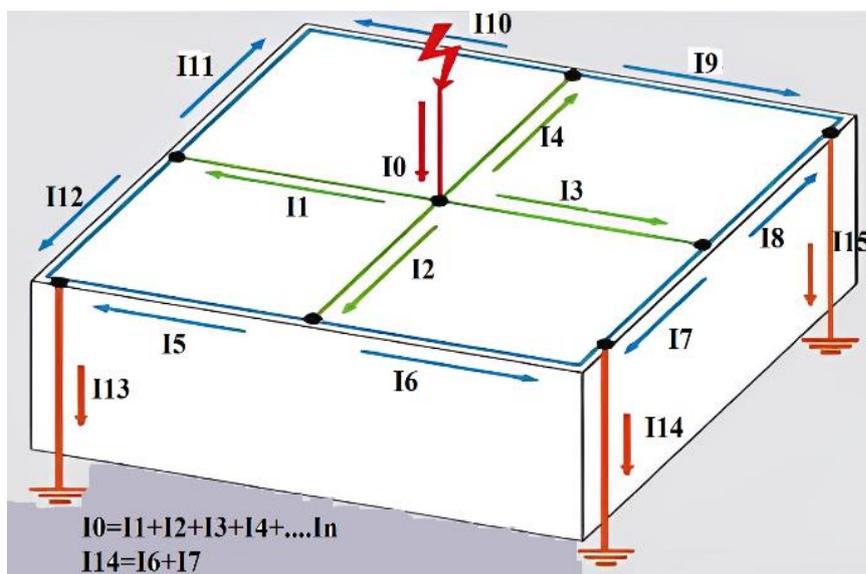


Fig. 2.9 Corriente en los sistemas de terminación aérea y conductores de descenso [5].

2.6.2. Subsistemas de Conductores de Descenso

El objetivo principal de los conductores de descenso es reducir las probabilidades de daños en el edificio debido a la corriente de rayo. Los conductores de descenso deben disponerse de manera de proporcionar varios caminos paralelos a la corriente eléctrica y también con la longitud más corta posible, convirtiendo en equipotenciales todas las partes conductoras del edificio, como se muestra en la Fig. 9. Los conductores de descenso deben conectarse al subsistema de terminación a tierra y deben instalarse, preferiblemente, en cada salida del edificio, más allá de los otros conductores impuestos por las distancias de seguridad definidas a través del nivel de protección [5].

2.6.3. Subsistema de Terminación a Tierra

La función del subsistema de terminación a tierra es drenar las corrientes de rayo hacia el suelo, causando la menor perturbación posible. Los electrodos conectados entre sí enterrados verticalmente y horizontalmente, componen el sistema. Las estructuras subterráneas del edificio con continuidad eléctrica garantizada. La rejilla de puesta a tierra forma los electrodos horizontales, que es un anillo de conductor subterráneo el cual conecta todo el sistema [5].

2.6.4. Simulación de un Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas en ATPDraw

Se implementó un LPS en el caso de estudio, donde los segmentos de cables verticales y horizontales, la malla de puesta a tierra y las varillas se modelaron como líneas de transmisión, lo que permitió utilizar ATPDraw como principal herramienta para las simulaciones, con el objetivo de analizar varias condiciones de protección.

Los subsistemas descritos en las secciones anteriores se representan mediante segmentos de cable rectos, modelados en ATPDraw. Las líneas de transmisión se representan por los parámetros de la resistencia del conductor R , la inducción interna y externa del conductor L , la capacitancia externa C y la conductancia G que representan las pérdidas dieléctricas. Un LPS está formado por la interconexión de los cables dispuestos horizontalmente, verticalmente. Considerando estos cables rectos como líneas de transmisión, es posible calcular los parámetros de cada elemento vertical o horizontal.

La capacitancia de un cable horizontal C se define mediante la Ecuación (5), que considera una línea de longitud infinita modelada como un cilindro de radio a , en una altura h desde el suelo y sobre una superficie perfectamente conductor.

$$C_h = \frac{2\pi\epsilon z}{\ln\left(\frac{2h}{a}\right)} [F] \quad (5)$$

El flujo magnético a lo largo de una línea con la misma geometría que la utilizada en el cálculo de capacitancia es invariable, ya que se considera de longitud infinita. Por lo tanto, para determinar la inductancia en un cable horizontal L de una línea, se utiliza la ecuación (6)

$$L_h = \frac{\mu z}{2\pi} \ln\left(\frac{2h}{a}\right) [H] \quad (6)$$

Para calcular las capacitancias e inductancias de cables verticales C_v y L_v , se considera un cable con forma cilíndrica, con longitud z , diámetro d en s metros de altura desde el suelo. Las ecuaciones (7) y (8) para la capacitancia y la inductancia de cables verticales respectivamente.

$$C_v = \frac{2\pi\epsilon z}{\ln\left(\frac{2z}{d}\sqrt{\frac{4s+z}{4s+3z}}\right)} [F] \quad (7)$$

$$L_v = \frac{\mu z}{2\pi} \ln\left(\frac{2z}{d}\sqrt{\frac{4s+z}{4s+3z}}\right) [H] \quad (8)$$

La resistencia R de los segmentos de cables rectos verticales y horizontales se puede ignorar en algunas situaciones, ya que su magnitud es regularmente del orden de $m\Omega$. Para un cable con sección transversal circular, radio a y conductividad homogénea σ [S/m], la resistencia se da por las Ecuaciones (9) y (10)

$$R = \frac{z}{\sigma 2\pi a \delta} [\Omega] \quad (9)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} [\Omega/m] \quad (10)$$

La resistencia R_{rod} de una varilla de tierra de longitud z y diámetro d se da por a través de la Ecuación (11), mientras que la capacitancia C_{rod} que aparece en paralelo con R_{rod} se representa por la ecuación (12), donde $\epsilon_s = 10\epsilon_0$ es la permitividad dieléctrica del suelo y ρ_s es la resistividad del suelo. La inductancia L_{rod} de la varilla se representa por la ecuación (13), donde μ [H/m] es la constante de permeabilidad magnética del suelo.

$$R_{rod} = \frac{\rho_s}{2\pi z} \left(\ln \frac{8z}{d} - 1 \right) [\Omega] \quad (11)$$

$$C_{rod} = \frac{2\pi\epsilon_s z}{\left(\ln \frac{8z}{d} - 1 \right)} [F] \quad (12)$$

$$L_{rod} = \frac{\mu z}{2\pi} \left(\ln \frac{8z}{d} - 1 \right) [H] \quad (13)$$

La malla de puesta a tierra del sistema de protección contra sobretensiones LPS, por sus siglas en inglés) está formada por varillas y cables dispuestos de manera horizontal. Cada cable está enterrado a una profundidad, con diámetro d y longitud z , donde ρ_e es la resistividad del electrodo y S_e es su sección transversal. De esta manera, la resistencia, capacitancia, inductancia y conductancia se dan por la Ecuación (14), (15), (16) y (17) respectivamente.

$$R_{grid} = \frac{\rho_e}{S_e} Z [\Omega] \quad (14)$$

$$C_{grid} = \frac{\pi \epsilon_s z}{\left(\ln \frac{2z}{\sqrt{dh}} - 1\right)} [F] \quad (15)$$

$$L_{grid} = \frac{\mu z}{2\pi} \left(\ln \frac{2z}{\sqrt{dh}} - 1\right) [H] \quad (16)$$

$$G_{grid} = \frac{\pi z}{\rho_s \left(\ln \frac{2z}{\sqrt{dh}} - 1\right)} [S] \quad (17)$$

2.7. ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN

Una estructura de programación inicia con la importación de librerías, crear modelo en el cual define variables y restricciones, mediante bloques, en el que las instrucciones se ejecutan de manera secuencial, a menos que se utilicen estructuras de control de flujo de programa, como bucles y condicionales. El Anexo 10 se determina la estructura de programación básica en Python, con la descripción y un ejemplo, incluye comentarios, importaciones de módulos, definición de variables, operadores matemáticos y lógicos. [27].

Según [28] presenta un enfoque para resolver problemas en Python. Se definen cuatro grupos: identificadores, palabras reservadas, tipos de datos y operadores. Estos grupos evitan que los elementos del mismo grupo sean dejados en blanco al mismo tiempo.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación se va a realizar por diferentes etapas empezando por la recopilación de la información detallada en el capítulo 4 se determina las bases fundamentales a través de normativas tesis o libros para que en el capítulo 5 se realice la metodología de la estructura de programación la cual consiste en determinar un proceso secuencial que agrupa sub etapas para determinar un sistema de apantallamiento seguro, la ecuaciones, tablas y constantes utilizadas para el cálculo se determinan a partir de la normativa utilizada para cada sub etapa. Para el cálculo de la resistividad del suelo se determina a partir de la normativa IEEE Std. 81 en la estructura de programación se realiza a través del método Wenner. En la normativa IEC 62305 existe dos tipos estructuras las cuales tienen la forma rectangular y la forma compleja, Cabe mencionar el algoritmo se enfoca en la aplicación del método de la esfera rodante en 3D con la vinculación de AutoCAD hacia Python. Es necesario determinar el cálculo de la resistencia a tierra basada en la normativa IEEE Std 142, También es importante determinar el sistema de puesta a tierra de la edificación mediante la normativa IEEE Std. 80. En la sección 5.3 del texto explica la metodología ocupada la cual tiene ocho sub etapas con su diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo, además de las funciones importantes de cada código, las librerías ocupadas, las funciones o bucles el procedimiento y el resultado a obtener.

3.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Los métodos de investigación son estrategias o técnicas que se utilizan para la recolección de datos e información para su posterior análisis con el propósito de ampliar el conocimiento sobre el tema y así plantear alternativas de solución que permita el diseño de un sistema de protección contra las descargas atmosféricas.

3.1.1. Investigación Aplicada

El presente trabajo de Investigación se encuentra enfocado en el uso del tipo de investigación aplicada debido a que se busca obtener un diseño para la protección de las descargas eléctricas atmosféricas utilizando el método de la esfera rodante a través del desarrollo de un algoritmo, de esta manera reducir los riesgos eléctricos.

3.1.2. Investigación Descriptiva

Este enfoque de investigación permite recopilar información relevante sobre el tema de tesis a través de una revisión bibliográfica, al analizar textos, artículos, tesis y normativas

relacionadas, se obtiene una base teórica sólida que respalda el desarrollo del algoritmo propuesto. La misma ayuda a identificar los métodos existentes para el dimensionamiento de la protección contra descargas atmosféricas en edificaciones, y proporciona los fundamentos teóricos necesarios para desarrollar la estructura de programación. Además, esta investigación descriptiva permite recopilar datos sobre casos de estudio previos, resultados obtenidos y las limitaciones o mejoras necesarias en los enfoques existentes.

3.1.3. Investigación Experimental

Este enfoque de investigación permitirá llevar a cabo mediciones, cálculos, diseño y simulación del sistema de apantallamiento de la edificación a proteger, teniendo en cuenta las características del entorno y las normativas aplicadas. De tal manera se garantiza que las soluciones propuestas sean adecuadas y seguras para proteger las edificaciones contra las descargas atmosféricas.

3.1.4. Investigación Analítica

Realizar análisis teóricos y cálculos matemáticos para comprender los principios y fundamentos detrás del apantallamiento y desarrollar modelos y ecuaciones que describan su comportamiento. El análisis teórico puede ayudar a identificar variables clave, relaciones fundamentales y restricciones que deben considerarse en el algoritmo de cálculo.

3.2. MATERIALES E INSTRUMENTOS

3.2.1. Normativas

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

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

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

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

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

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

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

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

3.2.2. Software

AutoCAD

AutoCAD es un software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) que ofrece una amplia gama de herramientas y funcionalidades para la creación de planos de ingeniería en 2D y 3D. Este programa se utilizó específicamente en el proyecto para representar la estructura y el diseño eléctrico del caso base

ATPDraw

Es un software de procesamiento digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y sistemas de control en sistemas eléctricos. Esta herramienta se ha utilizado específicamente para simular las corrientes de las descargas atmosféricas en estructuras, utilizando modelos equivalentes para representar el sistema de apantallamiento.

Python

Python es un lenguaje de programación ampliamente utilizado y versátil que se caracteriza por su facilidad de uso y flexibilidad. Una de las ventajas principales de Python es su extensa colección de módulos de código y bibliotecas, las cuales ofrecen una amplia gama de funcionalidades predefinidas y herramientas que facilitan el desarrollo de aplicaciones y sistemas.

PL42mat

L42mat es un software diseñado específicamente para facilitar la conversión de archivos "Pl4" generados por ATPDraw a archivos "mat", que contienen matrices necesarias para la simulación de datos en Python o Matlab, Al utilizar este software, los usuarios pueden

aprovechar las funcionalidades y librerías disponibles en Python o Matlab para realizar cálculos, manipulación de datos, visualización y otros análisis que pueden ser requeridos en sus proyectos de simulación.

Risk Assessment

El software de evaluación de riesgos es una aplicación informática diseñada para ayudar a los usuarios, como ingenieros y arquitectos, a determinar los posibles riesgos eléctricos asociados a descargas atmosféricas en diferentes tipos de edificios e instalaciones. Esta herramienta es útil y práctica para detectar y reducir los posibles riesgos eléctricos [29].

3.3. 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. la comprobación de los riesgos eléctricos en la edificación. 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. Dichas etapas están descritas en la Fig. 10.

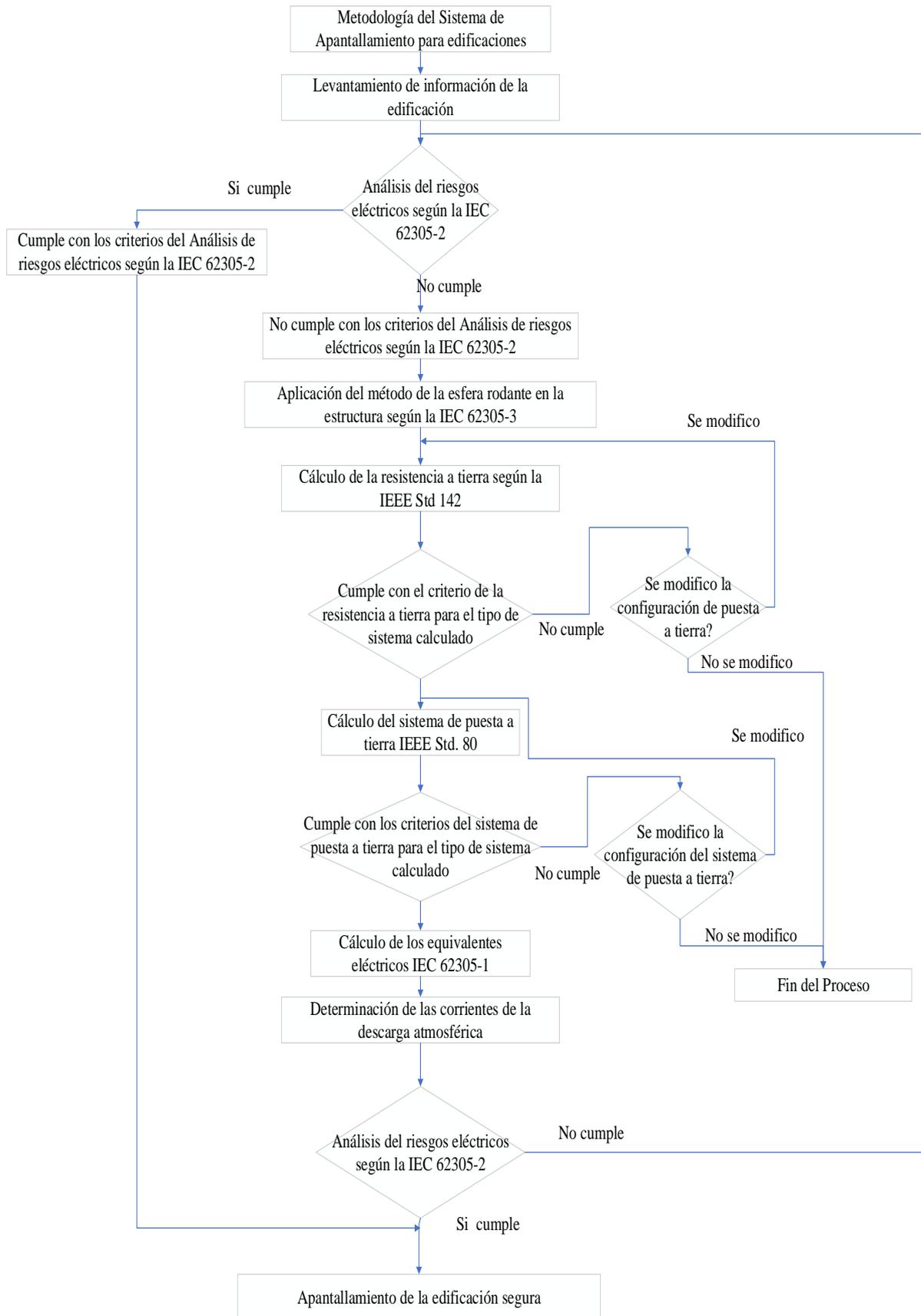


Fig. 3.10 Metodología del Sistema de Apantallamiento

3.3.1. Análisis del nivel de riesgo según la IEC 62305-2

En la Fig. 11 establece la metodología para realizar el cálculo del nivel de riesgo, el cual inicia con la identificación del área a proteger, así también como los tipos de pérdidas y el cálculo del mismo el cual establece mayor riesgo al no contar con un sistema de protección, establecer el nivel de protección requerida para la edificación es vital para la instalación de nuevos equipos, por último se compara los resultados del nivel de riesgos pre instalación y post instalación.

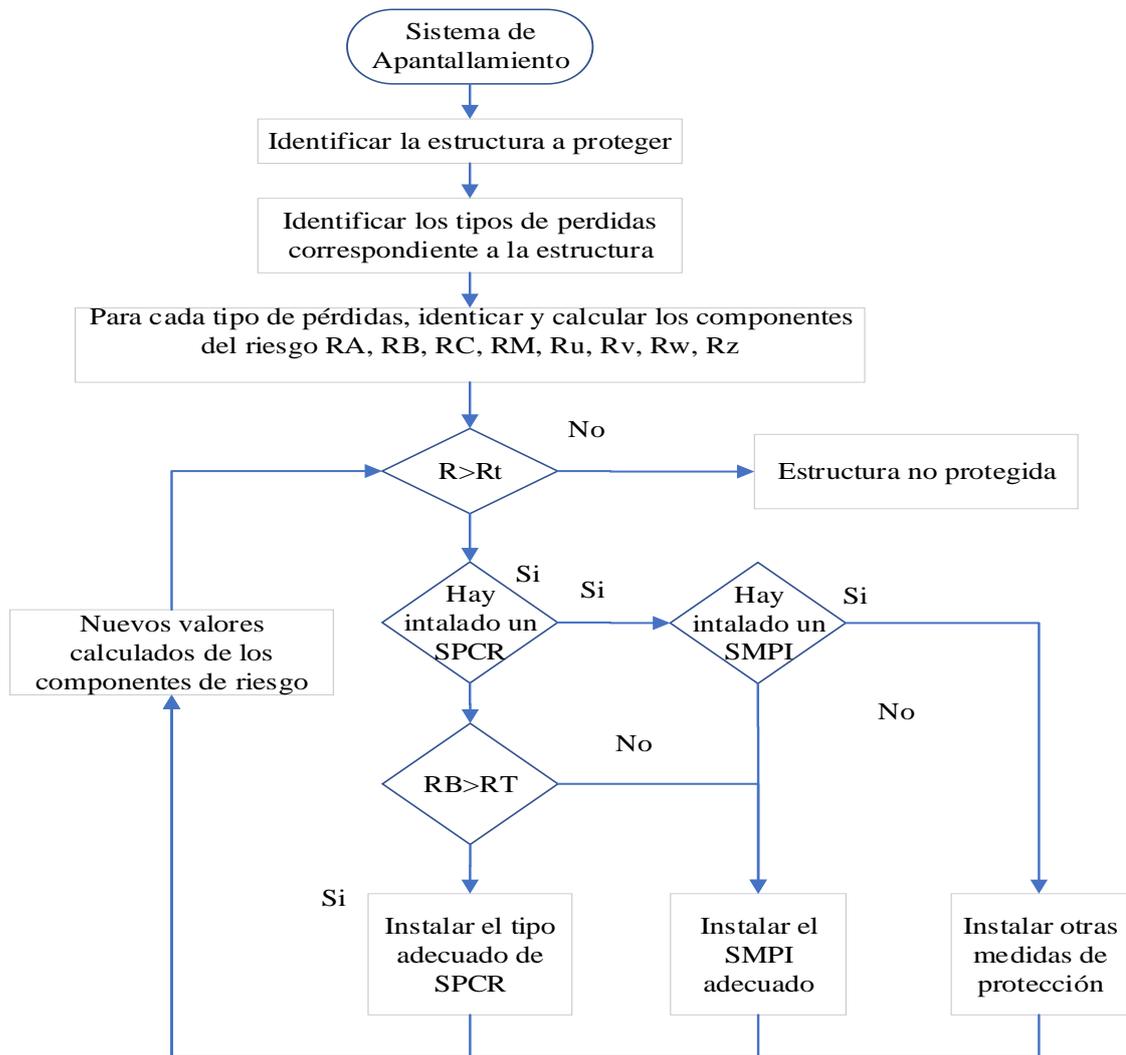


Fig. 3.11 Análisis del riesgo según la IEC 62305-2 [11].

3.3.2. Estructura de Programación Para el Cálculo de la Resistividad del Suelo

La metodología de programación de este código se centra en la implementación de una interfaz gráfica utilizando la librería tkinter. Se definen funciones de acción para los botones, las cuales llaman a otros scripts mediante el uso del módulo subprocess. Se crean botones para

diferentes perfiles de cálculo de resistividad y se configura la visualización de una imagen relacionada con el proceso. La interfaz se muestra en una ventana principal, la cual permanece abierta hasta que el usuario la cierre. El algoritmo proporciona el cálculo para diferentes medidas entre picas. Se definen funciones y se crean campos de entrada para que el usuario ingrese las distancias y resistencias del suelo. Al presionar el botón "Calcular resistividad", se procesan los valores ingresados y se realiza el cálculo de la resistividad para cada medida. Se muestra el resultado en una etiqueta de salida y se actualiza la etiqueta que indica la cantidad de medidas realizadas. Además, se genera una gráfica utilizando la biblioteca matplotlib para visualizar las distancias en el eje x y las resistividades en el eje y. En la Fig. 12 se muestra el diagrama de flujos respectivo.

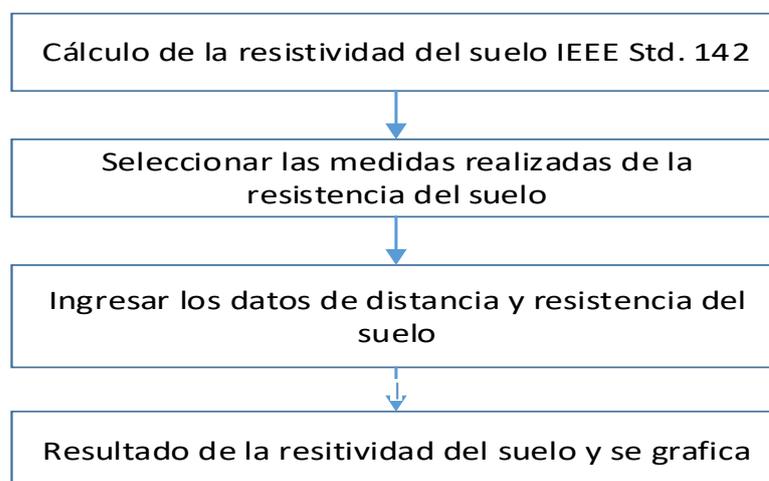


Fig. 3.12 Diagrama de flujo de resistividad del suelo

3.3.3. Estructura de Programación Para el Método de la Esfera Rodante

El algoritmo implementa una interfaz gráfica utilizando la biblioteca Tkinter en Python. La estructura de programación comienza importando los módulos necesarios y estableciendo algunas variables globales. A continuación, se definen varias funciones relacionadas con la interfaz, como mostrar imágenes y validar la selección de opciones. Además, hay una función para mostrar el mapa isoceraunico del Ecuador en una ventana emergente. Luego, se definen dos funciones principales, "estructuraRectangular" y "estructuraCompleja", que se llaman según la opción seleccionada en un combobox. La función "estructuraRectangular" contiene una serie de subfunciones que realizan cálculos y grafican en AutoCAD. Finalmente, se muestra una ventana principal donde se utilizan los widgets de Tkinter para interactuar con el usuario. En la tabla se especifica las funciones que ocupa el algoritmo. En el Anexo 14 se define las

funciones ocupadas en el algoritmo y en la Fig. 13 está la metodología del funcionamiento del algoritmo.

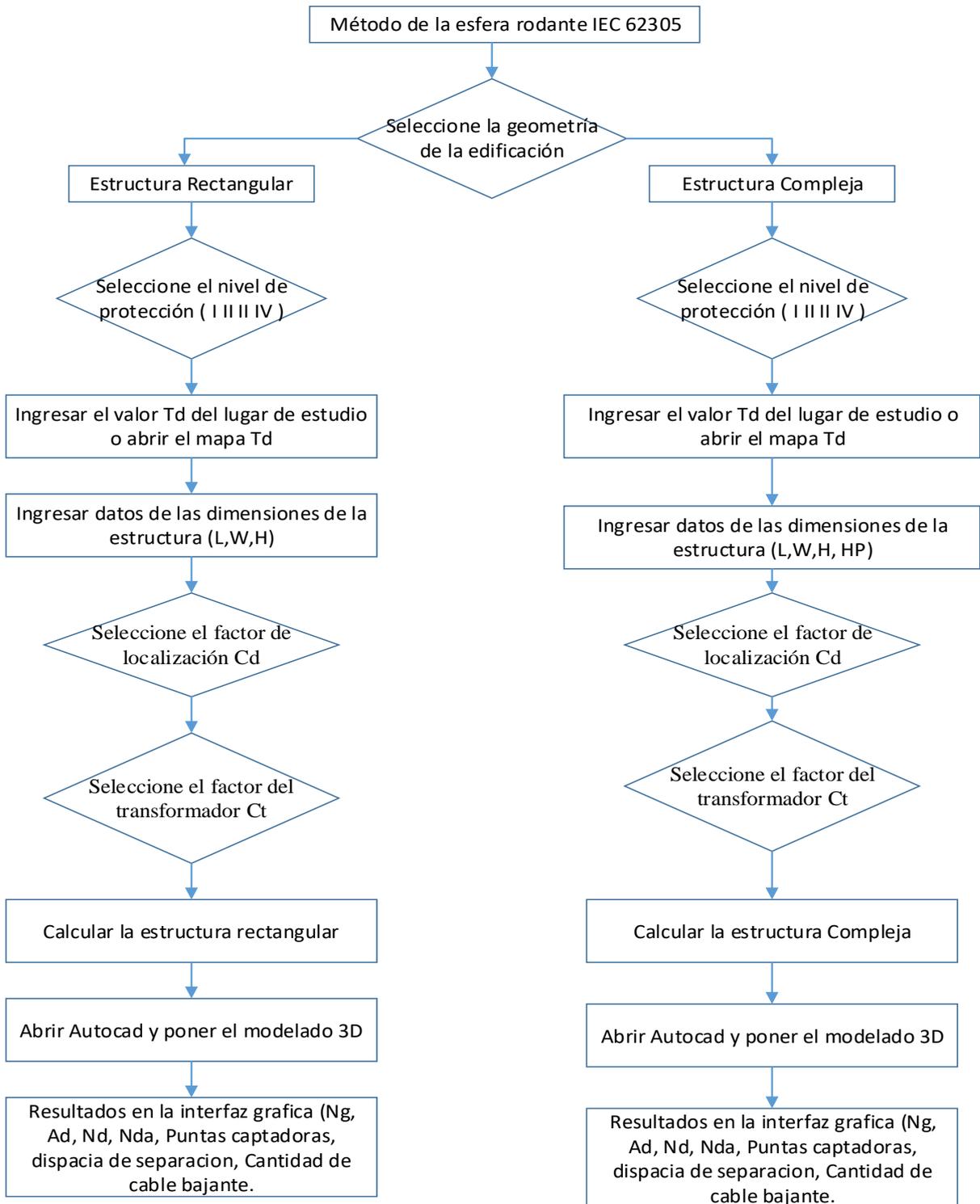


Fig. 3.13 Diagrama de flujos para el método de la esfera rodante IEC 62305

En la Fig. 14 se representa el ingreso de datos de la interfaz gráfica de la estructura rectangular, como lo indica en la Fig. 13 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 [35] la cual está basada en la normativa IEC 62305.

Fig. 3.14 Ingreso de datos de la estructura rectangular

3.3.4. Estructura de Programación Para el Cálculo de la Resistencia a Tierra

La estructura de programación del código proporcionado se puede describir de la siguiente manera:

Es necesario comenzar con la importación de módulos necesarios los cuales son: para la interfaz gráfica (Tkinter), componentes visuales (ttk), cálculos matemáticos (math), visualización de gráficos (matplotlib.pyplot) y ejecución de procesos externos (subprocess).

Se debe definir las funciones de: `calculate()`: Esta función se llama cuando se presiona el botón "Calculate". Obtiene los valores ingresados por el usuario desde las entradas y realiza cálculos en función de la opción seleccionada en el menú desplegable. `show_copperweld_table()`: Esta función se llama cuando se presiona el botón "Varilla Copperweld". Abre una nueva ventana que muestra una tabla con información sobre varillas Copperweld.

`show_image()`: Esta función se llama cuando se presiona el botón "Mostrar Imagen". Abre una nueva ventana y muestra una imagen de la configuración para el cálculo de la resistencia a tierra.

Creación de la interfaz gráfica: Se crean los elementos de la interfaz gráfica utilizando widgets proporcionados por Tkinter, como etiquetas, entradas, menú desplegable y botones. Los valores ingresados por el usuario se almacenan en variables.

Asociación de funciones a eventos: Los botones "Calculate", "Varilla Copperweld", "Mostrar Imagen" y "Método Wenner" tienen asignadas las funciones correspondientes que se ejecutan cuando se hace clic en ellos.

Este algoritmo permite al usuario ingresar valores, seleccionar opciones y realizar cálculos específicos según las fórmulas elegidas. También proporciona funcionalidad adicional, como mostrar una tabla y una imagen, así como abrir una segunda interfaz. El diagrama de flujo de la Fig. 15 representa la estructura de programación utilizando la normativa IEEE Std. 142 para el cálculo de la resistencia a tierra.

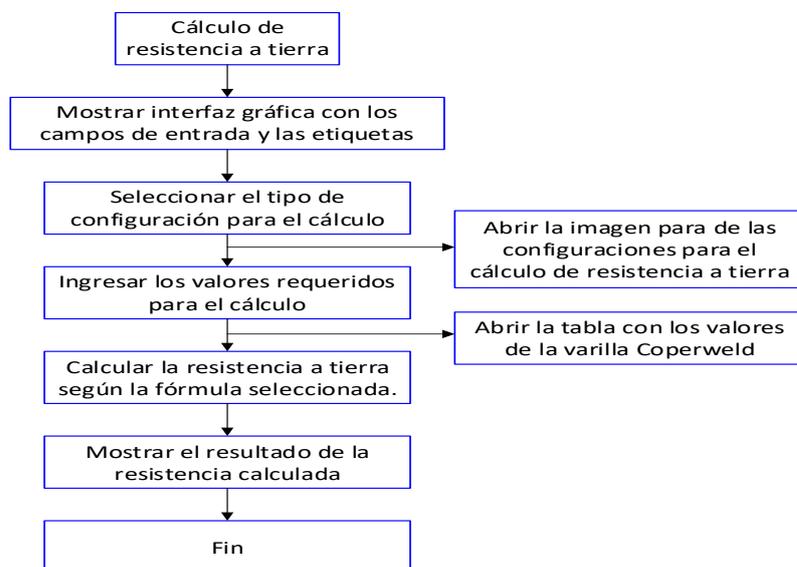


Fig. 3.15 Diagrama de Flujo del cálculo de puesta a tierra.

3.3.5. 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 [30] la cual recomienda pasos a seguir los cuales están descritos en la Fig. 16. 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. La resistencia a tierra de la malla se puede calcular utilizando técnicas de análisis de malla como el método de los elementos finitos. 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, Además de un seguimiento y mantenimiento periódico de la malla también son esenciales para garantizar su buen funcionamiento y cumplimiento con los requisitos de seguridad [31].

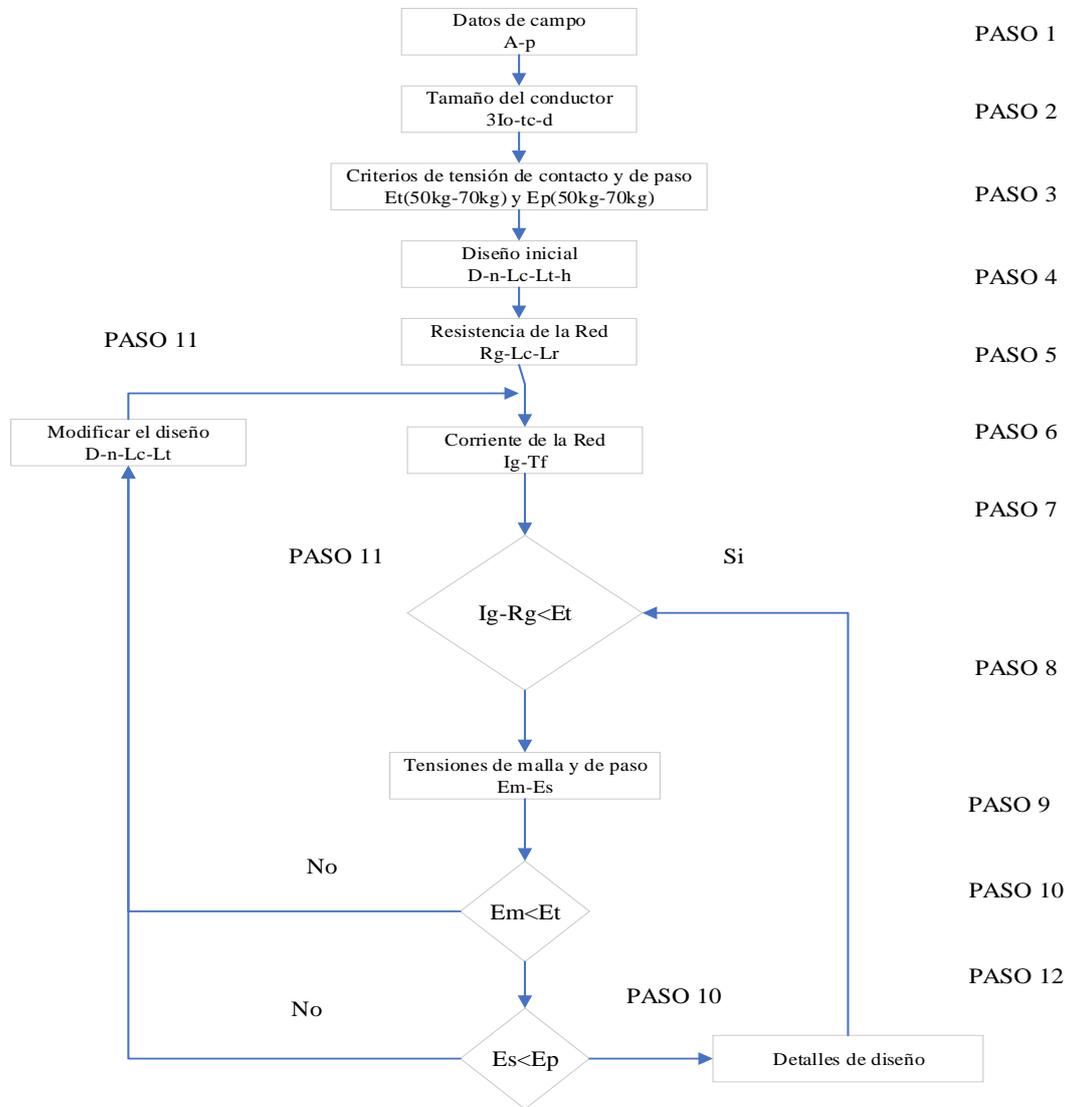


Fig. 3.16 Pasos a seguir para el diseño del Sistema de Puesta a tierra [21].

3.3.6. Estructura de Programación Para el Sistema de Puesta a Tierra IEEE Std. 80

La metodología de programación presentada utiliza la biblioteca tkinter de Python para crear una interfaz gráfica de usuario. También se importan otras bibliotecas, como ttk, messagebox de tkinter, PySimpleGUI y PIL (Image, ImageTk), así como las funciones sqrt y math de Python para realizar cálculos matemáticos. Se define una función llamada "validar", que se ejecuta al presionar un botón en la interfaz. Esta función verifica si se han seleccionado opciones válidas en dos listas desplegables. Si se selecciona la opción "Malla cuadrada" en la primera lista y se

elige una opción en la segunda lista. La función seleccionada entre: (Cuadrada, Rectangular y en “L”) toma el valor de "Rg_max" como parámetro y se divide en varias secciones. En la sección "DATOS_1", se obtienen los valores de diferentes variables ingresadas por el usuario en la interfaz. Estos valores incluyen voltajes, impedancias, resistencias, factores de corrección y dimensiones de la malla. Luego se realizan cálculos matemáticos para determinar diferentes parámetros, como corrientes, ratios, diámetros de los conductores y resistencia de la malla.

En la siguiente sección, se calcula la corriente máxima de la malla, el GPR (Ground Potential Rise) y el voltaje de la malla. Estos cálculos se basan en fórmulas y ecuaciones específicas. Se verifican diferentes criterios, como el voltaje de paso y el voltaje de toque, se comparan con los valores calculados. Si se cumplen ciertos criterios, se emite un mensaje indicando que se cumplen, de lo contrario, se muestra un mensaje indicando que no se cumplen. Además, se realiza un análisis de cumplimiento del criterio de resistencia máxima de la malla. Si el valor calculado de la resistencia de la malla es menor o igual a la resistencia máxima especificada, se cumple el criterio. De lo contrario, no se cumple.

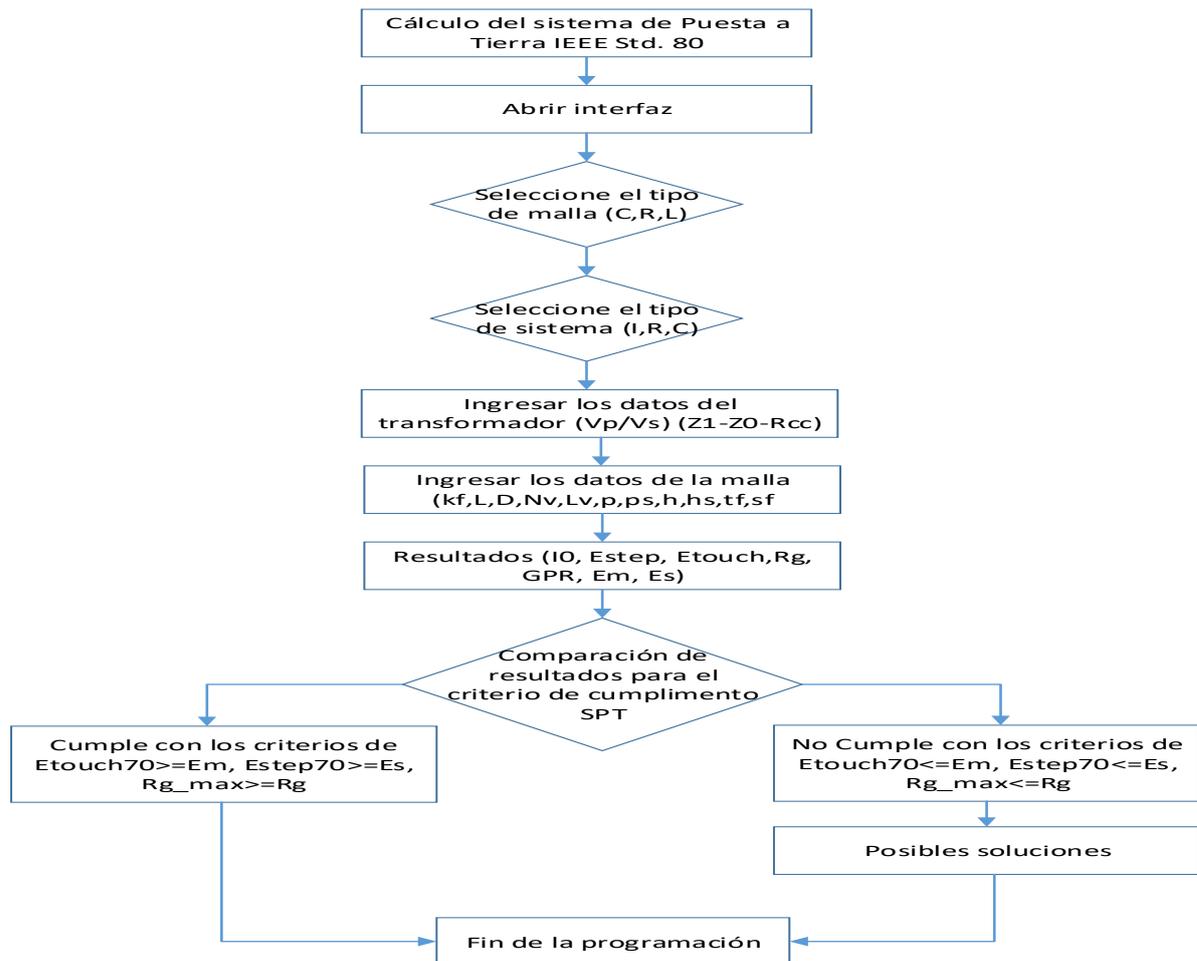


Fig. 3.17 Diagrama de flujo del Sistema de Puesta a Tierra Std. 80

En la Fig. 18 esta 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. Como lo indica en el diagrama de flujo de la Fig. 17 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 1.

📌 Cálculo de la Malla de Puesta a Tierra

PUESTA A TIERRA

<p>Z1 HV (Impedancia)</p> <p>Z0 HV (Impedancia Secuencia 0)</p> <p>RXcc1</p> <p>Z0/Z1 LV</p> <p>VLL HV (Lado de Alto Voltaje)</p> <p>VLL LV (Lado de Bajo Voltaje)</p> <p>Rf (Resistencia de falla)</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="background-color: black; color: green;">4</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">10</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">0.034</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">0</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">115</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">13</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">0</td></tr> </table>	4	10	0.034	0	115	13	0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="background-color: black; color: green;">10</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">40</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">1.014</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">0</td></tr> </table>	10	40	1.014	0
4													
10													
0.034													
0													
115													
13													
0													
10													
40													
1.014													
0													
<input type="button" value="Calcular"/>		<input type="button" value="Resultados:"/>											
<p>Kf (Constante del material)</p> <p>L (Longitud del lado de la malla)</p> <p>Distancia entre conductores</p> <p>Número de varillas</p> <p>Longitud de las varillas</p> <p>p (Resistividad del suelo)</p> <p>ps (Resistividad de la capa superficial)</p> <p>h (Profundidad de la malla)</p> <p>hs (Grosor de la capa superficial)</p> <p>tf (Duración de la falla)</p> <p>Sf (Factor de división de corriente)</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="background-color: black; color: green;">7.06</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">70</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">10</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">20</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">7.5</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">400</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">2500</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">0.5</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">0.102</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">0.5</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">0.6</td></tr> </table>	7.06	70	10	20	7.5	400	2500	0.5	0.102	0.5	0.6	<p>IO</p> <p>Estep</p> <p>Etouch</p> <p>Rg</p> <p>GPR</p> <p>Em</p> <p>Es</p>
7.06													
70													
10													
20													
7.5													
400													
2500													
0.5													
0.102													
0.5													
0.6													
<p>Trafo de alta</p> <p>Trafo de baja</p> <p>Configuracion</p>	<p>Configuracion del transformador (1_D)(2_Y)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="background-color: black; color: green;">1</td></tr> <tr><td style="background-color: black; color: green;">2</td></tr> </table> <p>Configuración Varillas(1_esquinas)(2_no esquinas)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="background-color: black; color: green;">1</td></tr> </table>	1	2	1									
1													
2													
1													
<input type="button" value="Atrás"/>													

Fig. 3.18 Ingreso de datos para el algoritmo del sistema de puesta a tierra.

3.3.7. Estructura de Programación Para los Equivalentes Eléctricos.

A continuación, se proporciona una descripción de la metodología general utilizada en el código: El código importa las bibliotecas math y tkinter para realizar cálculos matemáticos y crear una interfaz gráfica, respectivamente. Luego se define las funciones que tendrá el código: calculate_rod_parameters(): Esta función calcula los parámetros de una varilla de tierra en función de los valores ingresados por el usuario. Los cálculos incluyen la resistencia, capacitancia e inductancia de la varilla. A continuación, se determina las funciones ocupadas en el algoritmo desarrollado:

`calculate_grid_parameters()`: Esta función calcula los parámetros de una malla de puesta a tierra en función de los valores ingresados por el usuario. Los cálculos incluyen la resistencia, capacitancia, inductancia y conductancia de la malla.

`calcular_cable_horizontal()`: Esta función calcula los parámetros de un cable horizontal en función de los valores ingresados por el usuario. Los cálculos incluyen la capacitancia, inductancia y resistencia del cable.

`calcular_cable_vertical()`: Esta función calcula los parámetros de un cable vertical en función de los valores ingresados por el usuario. Los cálculos incluyen la capacitancia, inductancia y resistencia del cable.

`def mostrar_tabla()`: Esta función muestra los datos necesarios para ingresar en la interfaz para el cálculo de los equivalentes de los conductores o bajantes.

`def Datos_Varilla()`: Esta función muestra los datos necesarios para ingresar en la interfaz para el cálculo de los equivalentes de la varilla copperwelld.

Se crea una ventana principal utilizando la biblioteca tkinter. Se definen etiquetas y campos de entrada para que el usuario ingrese los valores necesarios. Se crean botones que llaman a las funciones de cálculo correspondientes. Se crean etiquetas para mostrar los resultados de los cálculos. Se inicia el bucle principal de la interfaz gráfica (`window.mainloop()`), lo que permite que la ventana sea interactiva y responda a las acciones del usuario. En la Fig. 19 se muestra el diagrama de flujo del código.

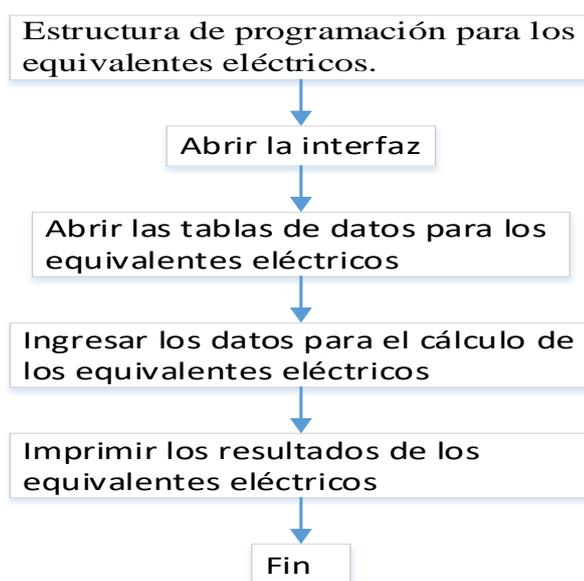


Fig. 3.19 Diagrama de flujo de la estructura de programación para los equivalentes eléctricos

3.3.8. 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 150000 A y su tiempo de onda completa es $1.2 * 10^{-6}$ 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 “P14” 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, se obtienen los valores máximos de corriente y tiempo para cada simulación y se muestran en una interfaz gráfica creada con tkinter. En la Fig. 20 se establece el diagrama de flujo para el funcionamiento del algoritmo.

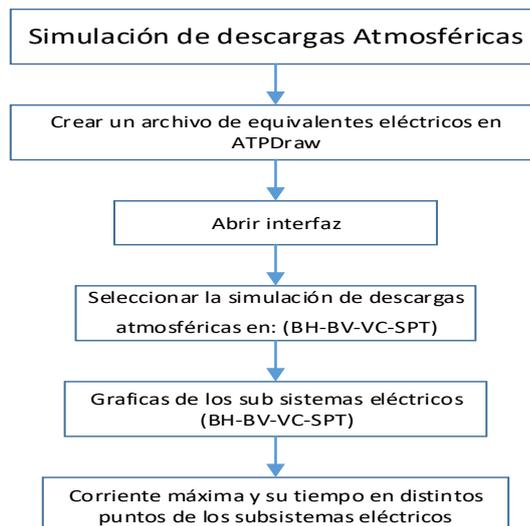


Fig. 3.20 Diagrama de Flujos de la simulación de descargas atmosféricas

En la Fig. 21 está la interfaz gráfica de la simulación de descargas atmosféricas en los sub sistemas de protección eléctricos según la IEC 62305, se presenta cuatro botones para graficar las ondas de corrientes y a su vez imprimir los datos de la corriente máxima y en el tiempo que ocurrió en el sistema analizado.

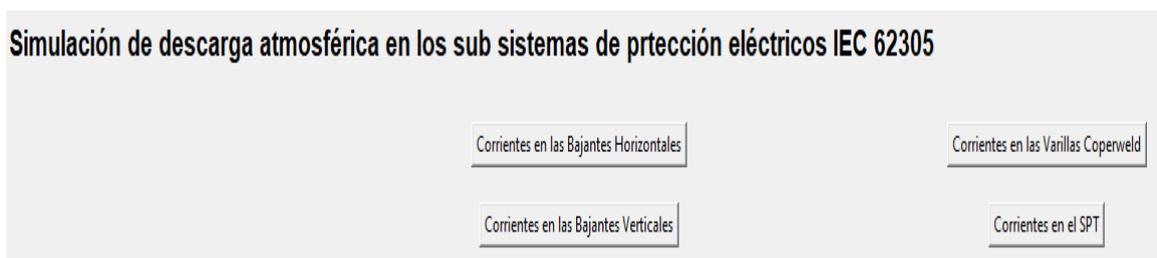


Fig. 3.21 Interfaz gráfica de la simulación de la descarga atmosférica

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El capítulo de análisis de resultados se centra en la evaluación del riesgo eléctrico según la norma IEC 52305-2. Se utilizó el software Risk Assessment para llevar a cabo la evaluación. Los parámetros del análisis de riesgo incluyen dimensiones de la estructura, características ambientales, protección de la estructura y protección externa. Los resultados del análisis mostraron 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). Para cumplir con las necesidades de la edificación, se realizó el cálculo de la resistividad del suelo mediante la normativa IEEE Std. 80. Luego se debe realizar el cálculo de la esfera rodante mediante el algoritmo desarrollado en el cual se indica que es necesario doce puntas captadoras, el cálculo de la puesta a tierra es necesario para cumplir con la normativa que especifica que por que cada puntada captadora debe haber mínimo una varilla copperweld, las fórmulas están dadas por la normativa IEEE Std. 142. El cálculo del sistema de puesta a tierra se desarrolló a través de la normativa IEEE Std. 80 en el cual se determina un ejemplo de aplicación para su validación. También se determinan los equivalentes eléctricos de los sub sistemas y se realizaron simulaciones contra descargas atmosféricas. El análisis de riesgo eléctrico después de la instalación de los sub sistemas de protección indicó que no hay riesgo en la edificación. La interfaz principal se muestra en el Anexo 15.

4.1. EVALUACIÓN DEL RIESGO ELÉCTRICO SEGÚN LA IEC 52305-2

La Tabla 2 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 [32].

Tabla 4.2 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

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. La información ingresada en el programa se observa en el Anexo 16 ,las cuales son: las dimensiones de la estructura, características de la estructura, influencias ambientales, las pérdidas ocasionadas, características de la alimentación eléctrica y si la infraestructura se encuentra protegida y en la Fig. 22 esta los resultados.

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	3,62E-05	4,46E-04	1,77E-06	3,54E-05	Necesaria	Consultar	Necesaria	Consultar	

Fig. 4.22 Datos ingresados para el cálculo del riesgo eléctrico

Una vez realizada la evaluación del riesgo eléctrico con el software Risk Assessment se obtuvieron los siguientes resultados, según se detalla en la Tabla 1 .Los valores obtenidos indican que es necesario corregir los riesgos de pérdidas de vidas humanas con un valor de $8.5 * 10^{-4}$. De acuerdo con los resultados obtenidos es necesario 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 4.3 Resultados obtenidos del análisis de riesgo

Tipo de Riesgo	Valor	Observación
Riesgo de pérdida de patrimonio	$1.77 * 10^{-6}$	No es necesario Corregir
Riesgo de pérdidas de vidas humanas	$3.62 * 10^{-5}$	Corregir
Riesgo de pérdida de servicios públicos	$4.46 * 10^{-4}$	No es necesario Corregir
Riesgo de pérdidas económicas	$3.54 * 10^{-5}$	No es necesario Corregir

4.2. CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

En [33] 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. 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. El promedio de la resistividad del estudio es de $37.687 \Omega \cdot m$.

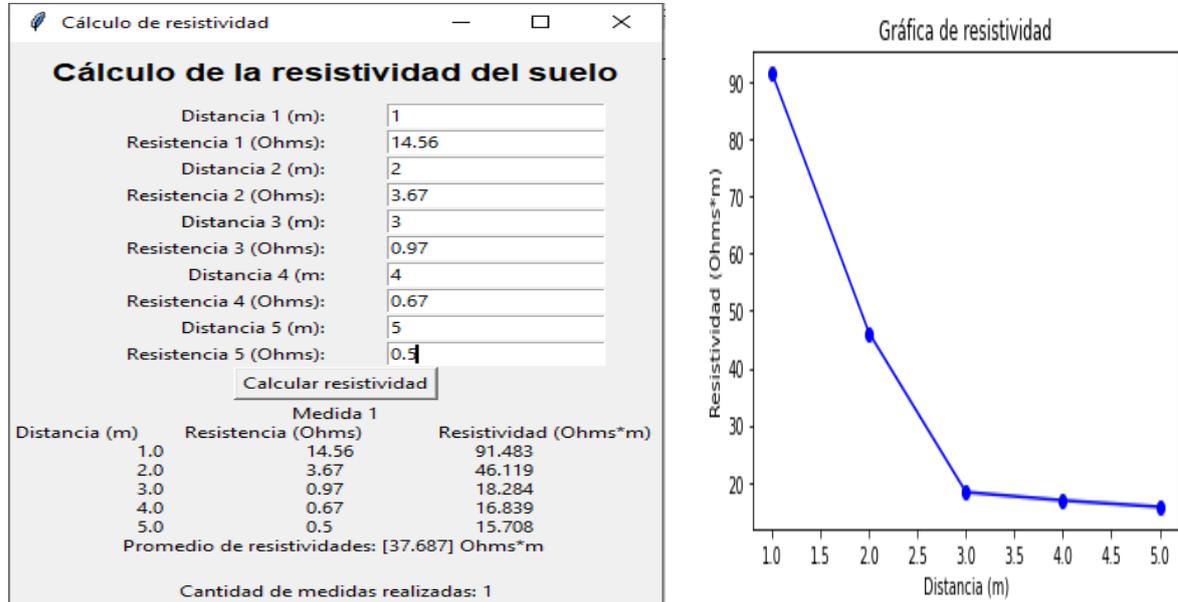


Fig. 4.23 Interfaz de la resistividad del suelo

4.3. CÁLCULO DEL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE IEC 62305

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 [34], 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 Fig. 14 y en la Fig. 24 esta los resultados del algoritmo.

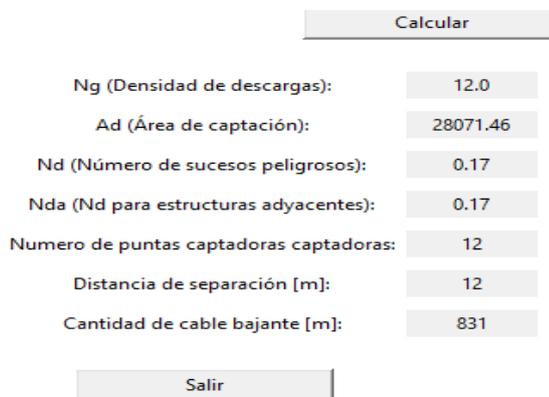


Fig. 4.24 Resultados de la estructura rectangular

En la Fig. 4.25 está el modelado en AutoCAT dado por el algoritmo desarrollado, a su vez está el diseño realizado por el estudio para la protección contra descargas atmosféricas [35], en

ambos casos el resultados es de 12 puntas captadoras como lo indica el Anexo 20, 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.

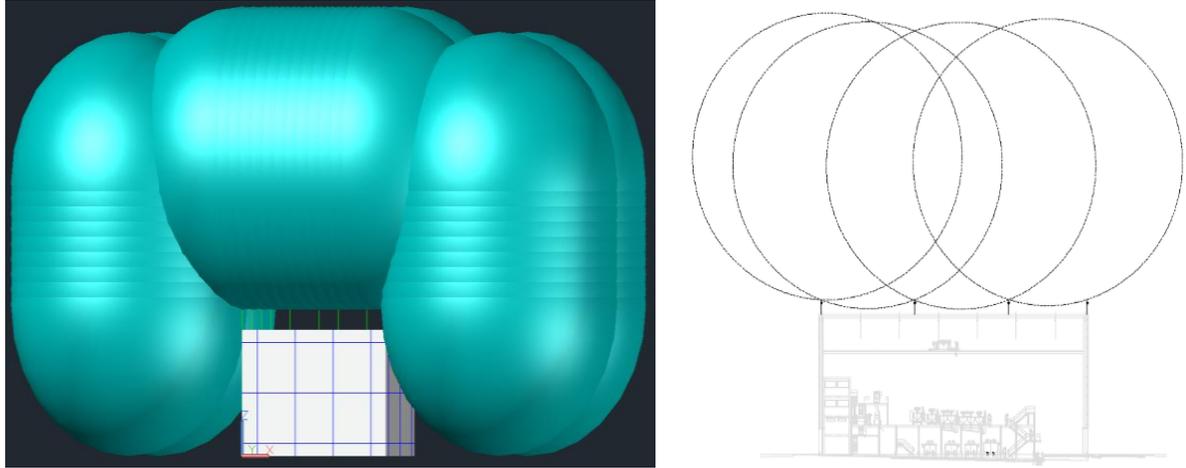


Fig. 4.25 Modelado en 3D del método de la esfera rodante en AutoCAD

4.4. CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS A TIERRA SEGÚN LA NORMATIVA IEEE STD. 142

En [35] se 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 el interfaz se muestra una variedad de varillas copperweld junto con sus características, para este caso se determina que el radio es de 0.007938 m, la longitud 1.8m, la resistividad del suelo es de 99.2 Ω . El resultado es de 33.266 Ωm .

Ingrese el valor del radio (a)	0.007938
Ingrese el valor de la longitud (L)	3
Ingrese el valor del espaciado (s)	1
Ingrese el valor de la resistividad del suelo (ρ)	99.2
Ingrese el valor del diámetro de la varilla (D)	0.0012
Ingrese el valor del diámetro del conductor (d)	0.006
Ingrese el valor de la profundidad (b)	1
Seleccione la fórmula	One ground rod
R = 33.266 Ohms	
Calculate	
Varilla Coperweld	
Mostrar Imagen	

Fig. 4.26 Interfaz grafico del cálculo de las resistencias a tierra

4.5. RESULTADOS DEL ALGORITMO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Para el desarrollo del algoritmo en Python de sistema de puesta a tierra se basó en los pasos establecidos en la Fig. 16 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, en la Fig. 27 se establece la interfaz del sistema de puesta a tierra.

SISTEMA DE PUESTA A TIERRA



Seleccione el tipo de malla:

Seleccione el tipo de sistema:

Salir

Siguiente

Fig. 4.27 Interfaz gráfico del sistema de puesta a tierra

En la Fig. 28 se identifica todos los datos de entrada que necesita el programa para calcular el sistema de puesta a tierra, los cuales son datos del transformador, la configuración de la malla y la resistividad del suelo. Estos datos se identifican al estar dentro del recuadro de fondo negro. Los resultados obtenidos son la corriente de falla I_0 , la tensión de paso E_{step} , la tensión de toque E_{touch} , la resistencia de la malla R_g , el aumento de potencial de tierra GPR , la tensión de paso tolerable E_s y la tensión de toque tolerable E_m . Además, ofrece una comparación entre los voltajes calculados y tolerables de la malla, así también, entre la resistencia de la malla y la máxima del sistema seleccionado. Por último, cuando la malla no cumpla los criterios de la normativa IEEE std. 80 me recomienda posibles soluciones para una nueva reconfiguración de la malla.

Resultados:	
I0	1059.9190885845512
Estep	2696.0971414098503
Etouch	840.5479323218946
Rg	2.8309140330568727
GPR	5400.971679201942
Em	932.0767001971977
Es	547.856564586191

No Cumple con el criterio Etouch70 >= Em

Cumple con el criterio Estep70 >= Es

Cumple con el criterio Rg_max >= Rg

Posibles Soluciones:

1. Incrementar el número de varillas
2. Aumentar la sección y longitud de la varilla.
3. Disminuir el espaciado entre conductores.
4. Instalar mallas equipotenciales.
5. La resistividad del suelo no supere los 500 ohm.m

Fig. 4.28 Interfaz de cálculo del Sistema de puesta a tierra de Python.

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 4, se identifica los resultados dados por la normativa y el programa de SPT en Python son muy similares. En el Anexo 18 se puede observar el cálculo de la malla en “L” utilizando el algoritmo.

Tabla 4.4 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 %	$8,49 * 10^{-5}$	$-3,71 * 10^{-4}$	$-2,94 * 10^{-3}$	$-3,94 * 10^{-5}$	$-3,48 * 10^{-5}$	0	0

4.5.1. Resultados del Algoritmo Para los Equivalentes Eléctricos de los Sub Sistemas

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 Fig. 24 están los datos de la estructura, en el Anexo 19 está la interfaz de los equivalentes, para el ingreso de datos se considera una varilla copperweld de 1.80 metros y un conductor para la malla AWG 2/0 para las bajantes AWG 2. Todos los datos de ingreso para el cálculo están detallados en los Anexo 12 y Anexo 13. En la Tabla 5 se determina los resultados, los cuales para ser simulados deben ser ingresados dependiendo al tipo de modelo eléctrico en ATPDraw.

Tabla 4.5 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 I_h	2.2939 e-07
Inductancia L_{rod}	2.1293 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 I_v	2.5453 e-07
Inductancia L_{grid}	1.0684 e-06	Resistencia R_v	0.197 Ω
Conductancia G_{grid}	110772256.37 S		

4.5.2. Resultados del Algoritmo Para la Simulación Contra Descargas Atmosféricas

Mediante el circuito eléctrico de los equivalentes de los sub sistemas de protección realizados en ATPDraw, el cual está representado en el Anexo 20, para la simulación de la descarga atmosférica se realiza a través de un generador Heidler ubicado en la parte superior de la estructura, los datos del mismo están en el Anexo 21. Se realiza el algoritmo de programación en Python su interfaz muestra cuatro botones los cuales son: Corrientes en las bajantes horizontales, Corrientes en las bajantes verticales, Corrientes en las varillas copperweld, Corrientes en el sistema de puesta a tierra, al seleccionarlos me muestra la gráfica de las corrientes en distintos puntos de los subsistemas de protección, los cuales se muestran desde el Anexo 21 hasta el Anexo 24. En Anexo 20 está el resultado en la interfaz de las corrientes máximas y en el tiempo que ocurrió, y en la Tabla 6 están tabulados los resultados. La máxima corriente se da en el cable horizontal superior, la corriente se dispare por distintos puntos, en los conductores verticales la corriente de descarga ya se ve muy reducida al instalar la puesta a tierra y el sistema de puesta a tierra la corriente tiende a cero.

Tabla 4.6 Resultados de las corrientes en los sub sistemas eléctricos

Características	Corriente máxima (A)	Tiempo de Ocurrencia (s)
Conductor horizontal frontal	2215.4834	3.50E-05
Conductor horizontal Lateral Izquierda	5573.4287	3.80E-05
Conductor horizontal Posterior	10276.673	4.70E-05
Conductor horizontal Lateral Derecha	5229.824	7.30E-05
Conductor horizontal Superior	14822.391	6.20E-05
Conductor vertical frontal	30.9487	2.00E-06
Conductor vertical lateral Derecha	15.5557	2.00E-06
Conductor vertical lateral Izquierda	33.5454	2.00E-06
Conductor vertical Posterior	28.0778	2.00E-06
Conductor vertical Superior	63.842	2.00E-06
Varilla copperweld Posterior	10.1516	2.00E-06
Varilla copperweld Interior	57.9777	2.00E-06
Varilla copperweld lateral Derecha	16.3803	2.00E-06
Varilla copperweld lateral Izquierda	8.2986	2.00E-06
Varilla copperweld Frontal	4.1175	2.00E-06
Sistema de Puesta a Tierra lateral Derecha	3.88E-11	1.00E-06
Sistema de Puesta a Tierra Posterior	3.16E-11	1.00E-06
Sistema de Puesta a Tierra Interna	2.52E-11	1.00E-06
Sistema de Puesta a Tierra Lateral Izquierda	1.89E-11	1.00E-06
Sistema de Puesta a Tierra Frontal	3.06E-11	1.00E-06

4.5.3. Resultado del Análisis de Riesgo Eléctrico Instalado los Sub Sistemas Eléctricos de Protección

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 Fig. 29.

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 SPCR**	Tipo SPCR	
70.371,46	2,61E-06	4,46E-04	1,77E-06	3,54E-05	Ya protegido	Nivel II	Ya protegido	IEC62305-4	

Fig. 4.29 Análisis del riesgo eléctrico instalados los sub sistemas de protección

4.6. ANÁLISIS DEL ERROR DEL ALGORITMO DESARROLLADO

Para determinar la valides del algoritmo desarrollado es necesario compararlo mediante las normativas aplicadas para su desarrollo, de esta manera en la Tabla 4.7 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 4.7 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%

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. 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.

5.2. 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.

6. REFERENCIAS

- [1] Lightning and Surge Protection, “BS EN 62305-1: 2011 Protección contra rayos,” *Parte 1*, 2016. <https://www.lsp-international.com/es/bs-en-62305-12011-protection-against-lightning-part-1-general-principles/> (accessed Apr. 18, 2023).
- [2] D. De Un *et al.*, “Diseño de un sistema de protección de descarga atmosférica y sobre tensiones para un edificio de apartamentos,” 2018. Accessed: Apr. 18, 2023. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/250145732.pdf>
- [3] Zurita M., “Mapa isocerámico georreferenciado para la coordinación de protecciones frente a descargas ” tesis de ingeniería eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana,” Quito, 2020.
- [4] A. , A. L. M. , & C. I. L. R. P. (2021, S. Chafra, “Diseño y modelado del sistema de puesta a tierra y apantallamiento para la estación Cotopaxi del instituto geográfico militar.,” 2021.
- [5] T. Lucietti, V. L. Coelho, and G. D. L. Canever, “Simulation of a Lightning Protection System Considering the Different Protection Levels,” *2019 15th International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2019*, Sep. 2019, doi: 10.1109/SIPDA47030.2019.8951587.
- [6] Vargas Silvia, “Diseño e implementación de las protecciones eléctricas, puesta a tierra y pararrayos para los sistemas,” Universidad Católica de Santiago de Guayaquil,” Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2010. Accessed: Apr. 18, 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8951587>
- [7] N. I. Ahmad, Z. Ali, M. Z. A. A. Kadir, M. Osman, N. H. Zaini, and M. H. Roslan, “Analysis of lightning-induced voltages effect with spd placement for sustainable operation in hybrid solar pv-battery energy storage system,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 12, Jun. 2021, doi: 10.3390/SU13126889.
- [8] D. Committee of the IEEE Power and E. Society, “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines Sponsored by the Transmission and Distribution Committee IEEE Power & Energy Society,” 2011.
- [9] Maciej Serda *et al.*, “Software de aplicación para el diseño de sistemas de apantallamiento contra descargas atmosféricas,” 2018. doi: 10.2/JQUERY.MIN.JS.

- [10] UNE-EN 62305-1:2007, “Protection against lightning - Part 1: General principles,” International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland,” 2007.
- [11] UNE-EN 62305-2:2007, “Protection against lightning - Part 2: Risk assessment,” International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland,” 2007.
- [12] UNE-EN 62305-3:2007, “Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard,” International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland,” vol. 3, pp. 20–80, 2007.
- [13] R. Romero and A. Vega, “Diseño de un sistema de apantallamiento contra descargas atmosféricas para los edificios de la Unimeta,” *Mujeres en ingeniería: Empoderamiento, Liderazgo y Compromiso*, vol. 1, pp. 8–11, 2021. doi: <https://doi.org/10.26507/ponencia.1836>.
- [14] Hugo Rodolfo Solis Diaz, “Protecciones contra sobretensiones por descargas atmosféricas,” Instituto Tecnológico De Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla-México, 2018. Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: <moz-extension://6b07b22a-db3d-4b82-bf35-d80881395969/enhanced-reader.html?openApp&pdf=http%3A%2F%2Frepositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F1271%2FMDRPIECA2018023.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy>
- [15] ISASTUR, “Manual Seguridad,” vol. 1, 2010. Accessed: May 01, 2023. [Online]. Available: https://www.isastur.com/external/seguridad/data/es/1/1_5_3_3.htm
- [16] Emanuel De Jesús Quintanilla Portillo David Fernando Rivera Orellana Gerson Isaí Rosa Siciliano, “Protección al impacto directo de rayos en subestaciones de potencia usando la norma IEEE Std 998-2012,” Universidad del Salvador, 2020.
- [17] Galizia C., “Evolución del Conocimiento Sobre los Efectos de la Corriente Eléctrica,” vol. 1, pp. 10–25, Jul. 2009, Accessed: May 25, 2023. [Online]. Available: <http://www.ingenierogalizia.com.ar/images/stories/EVOL-DEL-CONOC-DE-LA-CORRIENTE-EN-EL-CUERPO.pdf>
- [18] Emanuel de Jesús Quintanilla Portillo, David Fernando Rivera Orellana, and Gerson Isaí Rosa Siciliano, “Protección al aimpacto directo de rayos en subestaciones de potencia usando la norma IEEE Std 998-2012,” Universidad de el Salvador, 2020.

- [19] S. Darío Orozco Andrade Darío Enrique Villegas Fuentes José Javier García González Iván Andrés Castro Grunauer Gabriela Maritza Ruilova Aguirre Alex Ronald Gadway Barzallo, S. Patricia Vargas Verdezoto, D. DE Comunicación La UcsG, and U. E. La Facultad De Arquitectura, “Estudio, diseño e implementación de las protecciones eléctricas, puestas a tierra y pararrayos para los sistemas de comunicación de la UCSG, ubicado en la Facultad de Arquitectura.” 2010, Accessed: May 06, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/8582>
- [20] IEEE, “IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations,” *IEEE Std 998-1996*, no. Feb, pp. 1–176, 1996, doi: 10.1109/IEEESTD.1996.81546.
- [21] Zurita Álvarez, “Mapa isocerámico georeferenciado para la coordinación de protecciones frente a descargas atmosféricas,” Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2020. Accessed: May 06, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18815/1/UPS%20-%20TTS019.pdf>
- [22] S. E. Silva, “Método de superficies Ionizantes: nuevo enfoque para la protección contra descargas atmosféricas,” vol. 1, 2009, Accessed: May 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329127742002.pdf>
- [23] IEEE Power and Energy Society, “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)*, no. February, pp. 1–226, 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078.
- [24] IEEE Std., “Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems,” 2007, doi: 10.1109/IEEESTD.2007.4396963.
- [25] S. Committee, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System - Redline,” *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983) - Redline*, vol. 2012, no. December, pp. 1–192, 2012, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6392181.
- [26] Tuany Lucietti, Wilson Luis Coelho, and Giovanna de Lorenzi Canever, “Simulación de un Sistema de Protección contra Rayos Considerando los Diferentes Niveles de Protección,” *IEEE Explore*, vol. 1, pp. 1–8, Oct. 2014.
- [27] Joe Llenara I., *Codifica en Python*, vol. 1. Quito, 2020. Accessed: May 08, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19346>

- [28] H. W. Hnin and K. K. Zaw, “Element Fill-in-Blank Problems in Python Programming Learning Assistant System,” *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Information Technologies, ICAIT 2020*, pp. 88–93, Nov. 2020, doi: 10.1109/ICAIT51105.2020.9261778.
- [29] Programas-gratis.net, “Risk Assessment,” 2023. <https://risk-assessment-software.programas-gratis.net/> (accessed May 26, 2023).
- [30] IEEE, “Guide for Safety in AC Substation Grounding,” *IEEE Standards Association*, vol. 1, Jan. 2013, Accessed: Dec. 01, 2022. [Online]. Available: https://drive.google.com/drive/folders/1XfJ67RSMQZpId_73UJafKECUoo3kbVyP
- [31] IEEE, “IEEE 81 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System.”
- [32] IEC Norma Internacional and UNE Norma Europea, “Protección contra el rayo, Parte 2: Evaluación del riesgo,” *Asociación Española de Normalización y Certificación*, vol. 1, 2006, Accessed: Dec. 06, 2022. [Online]. Available: https://drive.google.com/drive/folders/1XfJ67RSMQZpId_73UJafKECUoo3kbVyP
- [33] M. S. Sazali, C. L. Wooi, S. N. M. Arshad, T. S. Wong, Z. Abdul-Malek, and H. Nabipour-Afrouzi, “Study of soil resistivity using wenner four pin method: Case study,” *PECon 2020 - 2020 IEEE International Conference on Power and Energy*, pp. 386–391, Dec. 2020, doi: 10.1109/PECON48942.2020.9314400.
- [34] Portilla Javier, “Estudio de un Sistema de Protección Atmosférica Según Normas IEC 62305 Para una Nave Industrial en el Departamento de Junín,” Universidad César Vallejo, Trujillo, 2021. Accessed: Jul. 03, 2023. [Online]. Available: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/67696/Portilla_SJA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [35] Chiliquinga Jhoana and Guanoluisa Luis, “Evaluación del sistema de puesta a tierra de la línea de subtransmisión Ambato – Samanga y Samanga - Pillaro a 69 kv perteneciente a la empresa eléctrica Ambato para proponer alternativas que permitan mejorar el sistema,” Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2017. Accessed: Jun. 12, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4469/1/PI-000593.pdf>

ANEXOS

7. ANEXOS

7.1. INFORME ANTIPLAGIO PROYECTO DE TITULACIÓN

Facultad:	Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas
Carrera:	Ingeniería en Electricidad
Nombre del docente evaluador que emite el informe:	Ms.C. Xavier Alfonso Proaño Maldonado
Documento evaluado:	Desarrollo de un algoritmo para el dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones basado en el método de la esfera rodante.
Autor del documento:	Paguay Llamuca Alex Ivan
Programa de similitud utilizado:	Sistema COMPILATION
Porcentaje de similitud según el programa utilizado:	2%
Observaciones: Calificación de originalidad atendiendo a los siguientes criterios:	-- x --
<ul style="list-style-type: none"> • El documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones. • El documento cumple criterios de originalidad, con observaciones. • El documento no cumple criterios de originalidad. 	
Fecha de realización del informe:	08/08/2023
Captura de pantalla del documento analizado:	
<p>CERTIFICADO DE ANÁLISIS magister</p> <p>2023-08-10_Paguay</p> <p>2% Similitudes < 1% Texto entre comillas 0% similitudes entre comillas < 1% Idioma no reconocido</p> <p>Nombre del documento: 2023-08-10_Paguay.pdf ID del documento: aa4200d0a3169a6619cd29a1f4a61a6d3d4add50 Tamaño del documento original: 1001,28 kB</p> <p>Depositante: XAVIER ALFONSO PROAÑO MALDONADO Fecha de depósito: 10/8/2023 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 10/8/2023</p> <p>Número de palabras: 13.081 Número de caracteres: 83.564</p> <p>Ubicación de las similitudes en el documento:</p> <p style="text-align: center;">Atentamente</p> <p>.....</p> <p style="text-align: center;">Ms.C. Xavier Alfonso Proaño Maldonado</p> <p style="text-align: center;">CC: 050265642-4</p>	

Anexo 1 Datos del Nivel Isocerámico

Sector	Latitud	Longitud	DJF ISR Flashes km ²	MAM ISR Flashes km ²	JJA ISR Flashes km ²	Son ISR Flashes km ²	Promedio	Descargas * km ² * Año	TD Isocerámico
Vía E20 Cerca De Plan Piloto	-0,05	-79,35	0,00932	0,03213	0,0025 1	0,00145	4,1449400	4,14494000	34,5411667
San Antonio,	0,05	-78,45	0,00539	0,01845	0,00423	0,01729	0,0113430	4, 1401950	34,5016250
Selva Alegre	0,25	-78,55	0,00545	0,02220	0,00452	0,01258	0,0112020	4,08873000	34,0727500
Pujilí	-1,05	-78,65	0,01061	0,01330	0,00262	0,01795	0,0111237	4,06016875	33,8347396
Eloy Alfaro (San Felipe)	-0,95	-78,65	0,01007	0,01383	0,00260	0,01793	0,0111145	4,05679250	33,8066042
San José De Minas	0, 15	-78,45	0,00515	0,01891	0,00442	0,01503	0,0108810	3,97156500	33,0963750
Valle Hermoso	-0,05	-79,25	0,00909	0,03027	0,00211	0,00188	0,0108430	3,95769500	32,9807917
Vía Guayllabamba	0,05	-78,25	0,00587	0,01362	0,00470	0,01864	0,0107107	3,90942375	32,5785313
Malchtngut	0,05	-78,35	0,00536	0,01488	0,00415	0,01790	0,0105777	3,86087875	32,1739896
Selva Alegre	0,25	-78,45	0,00500	0,01850	0,00380	0,01246	0,0099450	3,62992500	30,2493750
Angochagua	0,25	-78,05	0,00595	0,01015	0,00804	0,01475	0,0097285	3,55090250	29,5908542
Atahualpa	0,15	-78,35	0,00473	0,01470	0,00405	0,01535	0,0097125	3,54506250	29,542 187
San Rafael	0,15	-78,25	0,00478	0,01245	0,00448	0,01588	0,0094020	3,43173000	28,597750

Anexo 2 Efectos de la corriente en el cuerpo Humano

Efecto	Intensidad	Efectos
1	0-0.0 mA	No se observan sensaciones ni efectos. El umbral de percepción se sitúa en 0.05 mA.
2	0.5-10 mA	Calambres y movimientos reflejos musculares. El umbral de no soltar se sitúa en 10 mA.
3	10-25 mA	Contracciones musculares. Agarrotamiento de brazos y piernas con dificultad de soltar objetos. Aumento de la presión arterial y dificultades respiratorias
4	25-40 mA	Fuerte tetanización. Irregularidades cardiacas. Quemaduras, Asfixia a partir de 4 segundos.
5	40-100 mA	Efectos anteriores con mayor intensidad y gravedad. Fibrilación y arritmias cardiacas.
6	1:00 a. m.	Fibrilación y paro cardiaco. Quemaduras muy graves. Alto riesgo de muerte.
7	1-1.5 A	Quemaduras muy graves. Parada cardiaca con elevada probabilidad de muerte

Anexo 3 Clasificación del nivel de protección

Estructuras comunes	Efectos de las descargas eléctricas	Nivel de protección
Residencia	Daño a instalación eléctrica, equipo y daños materiales a la estructura. Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra.	III o IV
Granja	Riesgo principal de incendio y potenciales de paso. Riesgo secundario derivado de la pérdida de suministro eléctrico provocando posibles desperfectos por falla de controles de ventilación y de suministro de alimentos para los animales.	II o III
Tanques de agua elevados: metálicos Concreto con elementos metálicos salientes.	Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra, así como posibles daños al equipo de control de flujo de agua.	III
Edificios de servicios tales como: aseguradoras, centros comerciales, aeropuertos, puertos marítimos, centros de espectáculos, escuelas, estacionamientos, centros deportivos, estaciones de autobuses, estaciones de trenes, estaciones de tren.	Daño a las instalaciones eléctricas, y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo, alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	II
Hospital Asilos Reclusorio	Falla de equipo de terapia intensiva. Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo, alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	II
Industria, tales como: maquinas herramientas, ensambladoras, textil, papelera, manufactura, almacenamiento no inflamable, fábrica de conductores, fábrica de electrodomésticos, armado equipo de cómputo, muebles, artefactos eléctricos, curtidurías, agrícola, cementeras, caleras, laboratorios y plantas bioquímicas, potabilizadoras.	Efectos diversos dependientes del contenido, variando desde menor hasta inaceptable y pérdida de producción.	I o II
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de vestigios culturales irremplazables	II
Telecomunicaciones	Interrupciones inaceptables, perdidas por daños a la electrónica, altos costos de reparación y perdidas económicas por falta de continuidad en el servicio.	I

Anexo 4 Distancias Típicas de separación [12].

Clase del SPCR	Distancias Típicas (m)
I	10
II	10
III	15
IV	20

Anexo 8 Componentes del riesgo eléctrico [11]

Riesgos	Descripción	Pérdidas
RA	Componente relacionado con daños de los seres vivos por tensiones de contacto y de paso hasta 3m exterior a la estructura, que podría parecer pérdidas de tipo L1	L1
RB	Relacionado con los daños físicos producidos por chispas peligrosas en el interior de la estructura causantes de fuego o de explosiones	N/A
RC	Relacionado con las fallas de los sistemas internos debido al impulso electromagnético del rayo. Se podría producir pérdidas tipo L1, L2 y L4	L1, L2, L4
RM	Relacionada con los fallos de los sistemas internos debidos a IEMR producir pérdidas de tipo L2 y L4	L2, L4
RZ	Relacionada con los fallos de los sistemas internos causados por sobretensiones incluidas líneas tipo L2, L4 junto a un tipo L1	L1, L2, L4
RU	Daño de seres vivos producidos por tensiones de contacto en el interior de la estructura, debido a la I inyectada en una línea y de entrada en la estructura podría ocurrir pérdidas L1	L1
RV	Daños físicos producidos por la I del Rayo transmitida a través de las líneas entrantes. Puede ocurrir un L1, L2, L3 y L4	L1, L2, L3, L4
RW	Relacionada con las fallas de los sistemas internos por sobretensiones inducidas en las líneas que entran a la estructura. Pérdidas de tipo L1, L2 y L4	L1, L2, L4

Anexo 9 Datos de la varilla Copperweld y el conductor

Diámetro (mm)	Longitud (m)	Radio Típico (mm)	Radio del Conductor (mm)
9.5	1.8	175	6.0
12.7	2.4	225	8.0
15.9	3.0	275	10.0
19.1	3.6	325	12.0
22.2	4.2	375	14.0
25.4	4.8	425	16.0
28.6	5.4	475	18.0
31.8	6.0	525	20.0
34.9	6.6	575	22.0
38.1	7.2	625	24.0

Anexo 10 Estructura de Programación de Python [27].

Aspecto	Descripción	Ejemplo
Comentarios	Se utilizan para agregar notas explicativas al código con el (#).	# Esto es un comentario
Importaciones	Se utilizan para importar módulos y bibliotecas externas.	import math
VARIABLES	Se escribe el nombre de la variable seguido de un signo igual (=) y su valor.	x = 5
Operadores	Se realiza operaciones matemáticas, lógicas y de comparación.	+, -, *, /, >, <, ==
Bucles	Las estructuras de control (if, else, elif) y bucles (for, while).	if x > 10:
Funciones	Las funciones se definen utilizando la palabra clave "def" seguida del nombre de la función y los parámetros de entrada.	def suma (a, b) : return a + b
Salida	La función "print" se utiliza para imprimir resultados y mensajes en la salida.	print("Hola mundo")
Entrada	La función "input" se utiliza para obtener datos de entrada del usuario.	nombre = input ("nombre: ")

Anexo 11 Configuración de puesta a tierra según la normativa IEEE Std. 142 [24].

Configuración	Ecuación
“Hemisphere radius a”	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
“One ground rod”	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
“Two ground rod(s>L)”	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
“Two ground rod(s<L)”	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
“Buried horizontal wire”	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
“Right-angle\n”	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2146 \frac{s}{L} + 0.1035 \frac{s^2}{L^2} - 0.0424 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
“Three-point star\n”	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209 \frac{s}{L} + 0.238 \frac{s^2}{L^2} - 0.054 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
“Four-point star\n”	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s}{L} + 0.645 \frac{s^2}{L^2} - 0.145 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
“Six-point star”	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 6.851 - 3.128 \frac{s}{L} + 1.758 \frac{s^2}{L^2} - 0.490 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
“Eight-point star\n”	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10.98 - 5.51 \frac{s}{L} + 3.26 \frac{s^2}{L^2} - 1.17 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
“Ring of wire”	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
“Buried horizontal strip”	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
“Buried horizontal round plate”	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{s^2} + \frac{33}{40} \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$

Anexo 12 Datos para las bajantes horizontales y verticales del sistema de apantallamiento

Cable	Radio (mm)	Sección (mm ²)	Diámetro (mm)	Conductividad (MS/m)
2 AWG	6.54	33.6	8.25	58
1 AWG	7.35	42.4	9.27	58
1/0 AWG	8.25	53.5	10.4	58
2/0 AWG	9.27	67.4	11.7	58
3/0 AWG	10.4	85	13.1	58
4/0 AWG	11.7	107.2	14.7	58
250 MCM	12.4	127	15.7	58
300 MCM	13.2	152	16.6	58
350 MCM	14	177	17.5	58
400 MCM	14.7	203	18.4	58
500 MCM	16	253	20.2	58

Anexo 13 Datos de ingreso para el cálculo de equivalentes eléctricos para varilla copperweld

Longitud (metros)	Diámetro (mm)	Sección Transversal (mm ²)	Resistividad del electrodo (Ω/m)
1.8	6	28.27	1.72 x 10 ⁻⁸
2.4	6	28.27	1.72 x 10 ⁻⁸
3	8	50.27	1.72 x 10 ⁻⁸
3.6	8	50.27	1.72 x 10 ⁻⁸
4.2	10	78.54	1.72 x 10 ⁻⁸
4.8	10	78.54	1.72 x 10 ⁻⁸
5.4	12	113.1	1.72 x 10 ⁻⁸
6	12	113.1	1.72 x 10 ⁻⁸
6.6	12	113.1	1.72 x 10 ⁻⁸
7.2	12	113.1	1.72 x 10 ⁻⁸

Anexo 14 Funciones del algoritmo de programación del método de la esfera rodante

Función	Descripción
mostrarImg	Muestra una imagen dependiendo de la opción seleccionada en un combobox
callbackFunc	Función de callback que se ejecuta cuando se selecciona una opción en un combobox
validar	Valida la selección en un combobox y llama a la función correspondiente
mostrarMapa	Muestra un mapa en una nueva ventana utilizando Tkinter y PIL
estructuraCompleja()	Función principal que crea la interfaz gráfica y llama a las funciones anteriores en respuesta a las interacciones del usuario.
estructuraRectangular	Función principal que calcula y muestra resultados basados en la opción "Rectangular" seleccionada
validarR	Realiza validaciones y cálculos para la opción "Rectangular"
calcularR	Calcula varios valores y muestra los resultados en una ventana

Anexo 15 Interfaz principal del algoritmo.

Dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones basado en el método de la esfera rodante



Anexo 16 Datos de ingreso para el análisis de riesgo inicial

DIMENSIONES		PÉRDIDAS		LÍNEAS DE SERVICIOS	
Longitud (L)	38,00 m.	Tipo 1. Pérdidas de vidas humanas	Por incendios	D. Siempre ocupadas.	Suministro eléctrico
Anchura (W)	250,00 m.	Por riesgo de pánico	Consecuencia de los daños	B. Bajo (menos de 100 persc	Situación del cable
Altura tejado (H)	25,00 m.	Por sobretensiones	Por sobretensiones	A. No aplica.	Tipo de cable
Altura prominencia (Hp)	25,00 m.				Transformador MT/BT
Superficie exposición (Ad)	70.371,46 m ²				
	<input type="checkbox"/> Fijada manualmente	Tipo 2. Pérdidas de servicios esenciales			Otros servicios aéreos
CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA		Pérdida de servicios	Tipo 3. Pérdidas de patrimonio cultural		Número de servicios
Tipo de cubierta	B. Hormigón.		Pérdida de patrimonio	B. Pérdida de patrimonio cull	Tipo de cable
Tipo de estructura	B. Hormigón.	Tipo 4. Pérdidas económicas			Otros servicios enterrados
Riesgo de incendio	A. Bajo.	Riesgos especiales			Número de servicios
Tipo de cableado interno	B. Apantallado.	Por incendios	Por incendios	A. Valor común.	Tipo de cable
INFLUENCIAS AMBIENTALES		Por sobretensiones	Por tensión paso/contacto	A. Sin riesgo de shock.	MEDIDAS DE PROTECCIÓN EXISTENTES
Situación	C. Estructura aislada.	Riesgo tolerable de pérdidas		C. 1 en 1.000 años.	Clase SPCR
Factor ambiental	B. Urbano.				Protección sobretensiones
Días de tormenta	120 Días / año				
Densidad anual impactos	12,00 Impactos / km ²				
Tipo de terreno	B. Roca blanda.				

Anexo 17 Resultados del caso de estudio para la protección de descargas atmosféricas

Norma Aplicada	Filas	Columnas	Número Total de pararrayos
Existentes NFPA	2	3	6
IEC 62305	3	4	12

Anexo 18 Validación del programa de sistema de puesta a tierra en Python

Resultados:

I0	1059.919
Etouch	2696.573
Estep	840.667
Rg	2.74
GPR	5228.0
Em	761.135
Es	574.581

Cumple con el criterio Etouch70 >= Em

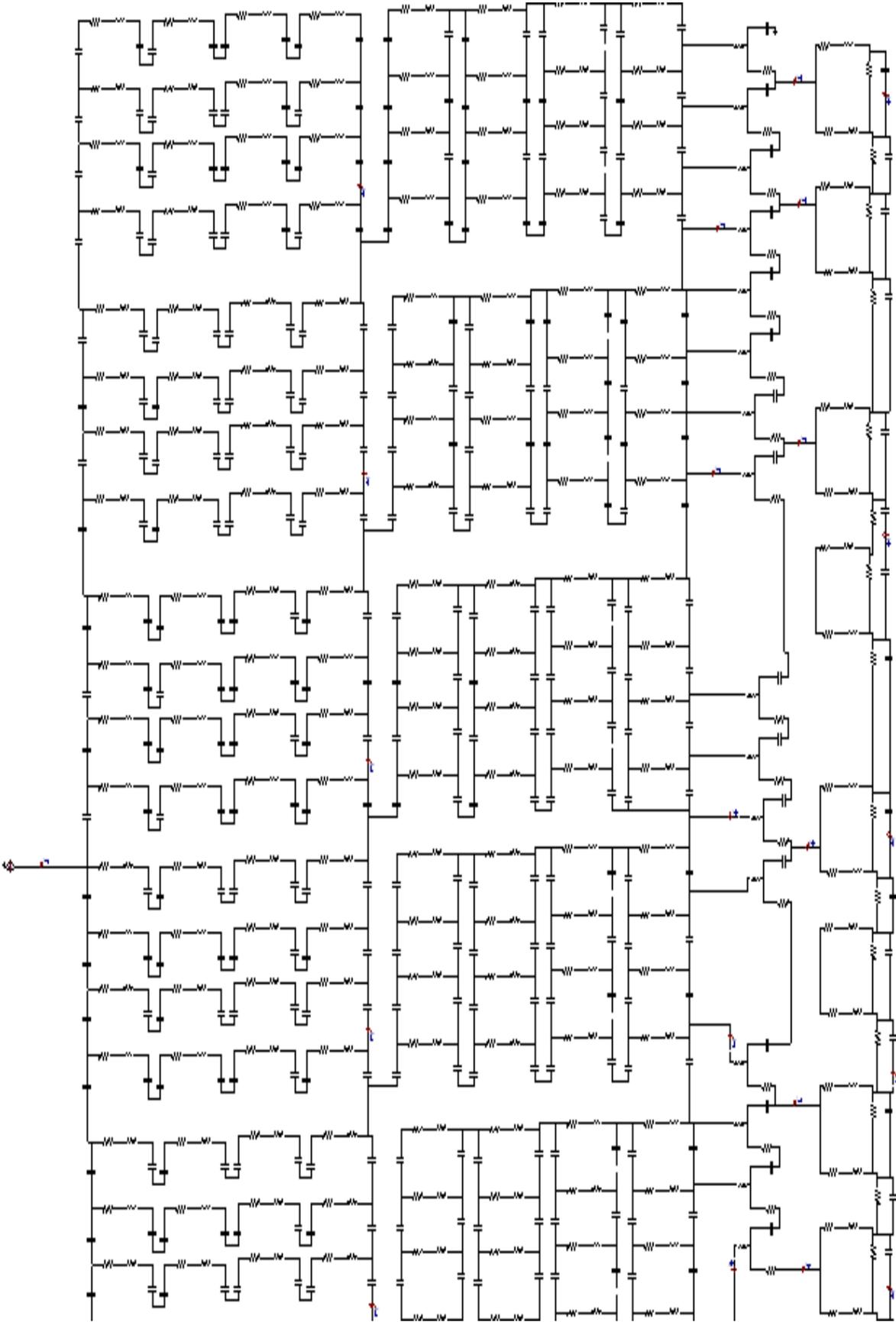
Cumple con el criterio Estep70 >= Es

Cumple con el criterio Rg_max >= Rg

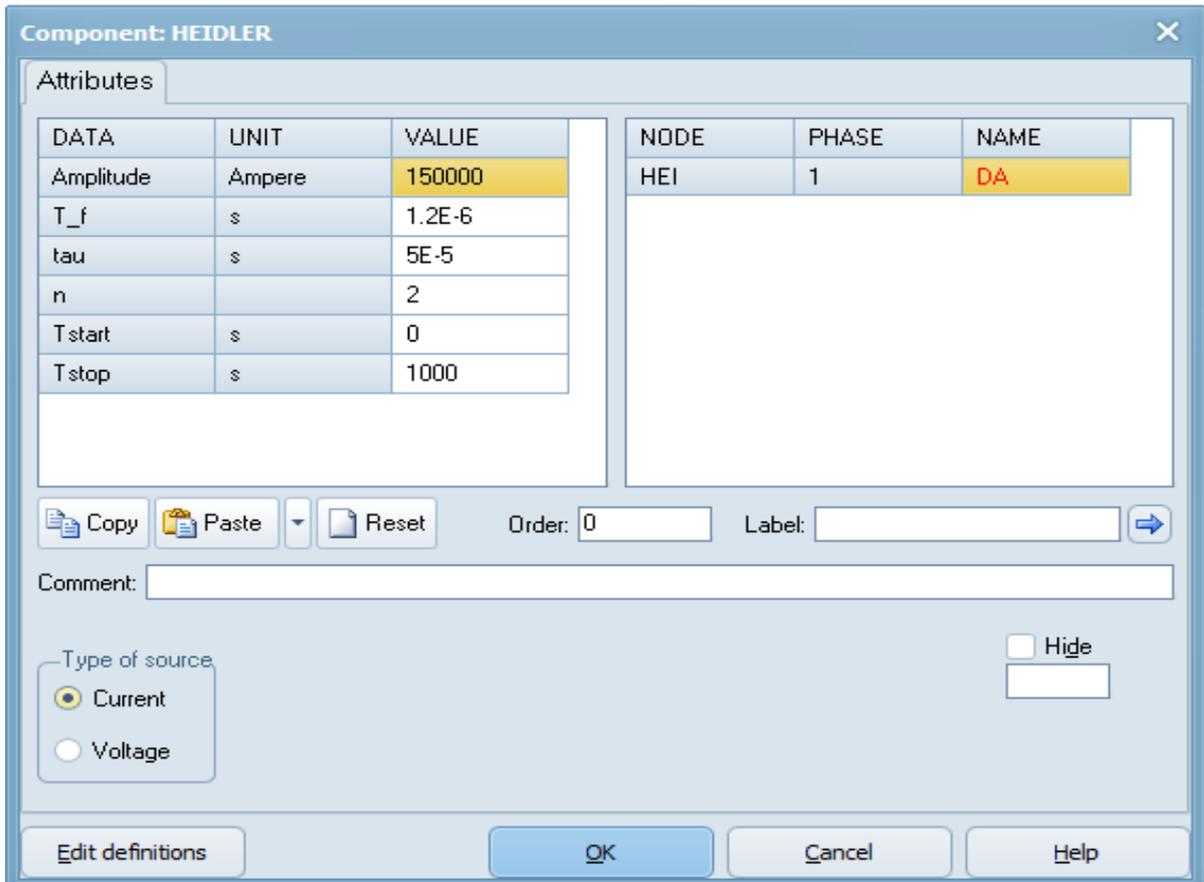
Anexo 19 Equivalentes eléctricos de un sistema de protección contra descargas atmosféricas

Longitud de la varilla z:	Radio del cable horizontal (a):
<input type="text" value="1.80"/>	<input type="text" value="0.00327"/>
Diámetro de la varilla:	Resistencia R_rod: 19.709412286012675 Ω
<input type="text" value="0.0143"/>	Capacitancia C_rod: 1.693001765642731e-10 F
Resistividad del suelo ρ_s:	Inductancia L_rod: 2.129300621387363e-06 H
<input type="text" value="37.687"/>	Resistencia R_grid: 0.00019211914365497985 Ω
Resistividad del electrodo ρ_e:	Capacitancia C_grid: 1.686937399670029e-11 F
<input type="text" value="0.0000000172"/>	Inductancia L_grid: 1.0684776187599204e-06 H
Sección transversal del electrodo S_e:	Conductancia G_grid: 110772256.37538868 S
<input type="text" value="0.00016115"/>	Profundidad de la malla (h):
Profundidad de la malla (h):	<input type="text" value="0.5"/>
<input type="text" value="0.5"/>	Capacitancia del cable horizontal: 6.38069187264052e-11 F
Longitud entre conductores zc:	Inductancia del cable horizontal: 2.2939206050983085e-07 H
<input type="text" value="10"/>	Resistencia del cable: 0.3955584071808492 Ω
Diámetro del conductor de la malla dc:	Capacitancia del cable vertical: 7.080195701345274e-11 F
<input type="text" value="0.00927"/>	Inductancia del cable vertical: 2.545399014969707e-07 H
	Resistencia del cable: 0.1977792035904246 Ω

Anexo 20 Diseño de los sub sistemas electricos de protección en ATPDraw



Anexo 21 Datos del generador Heidler

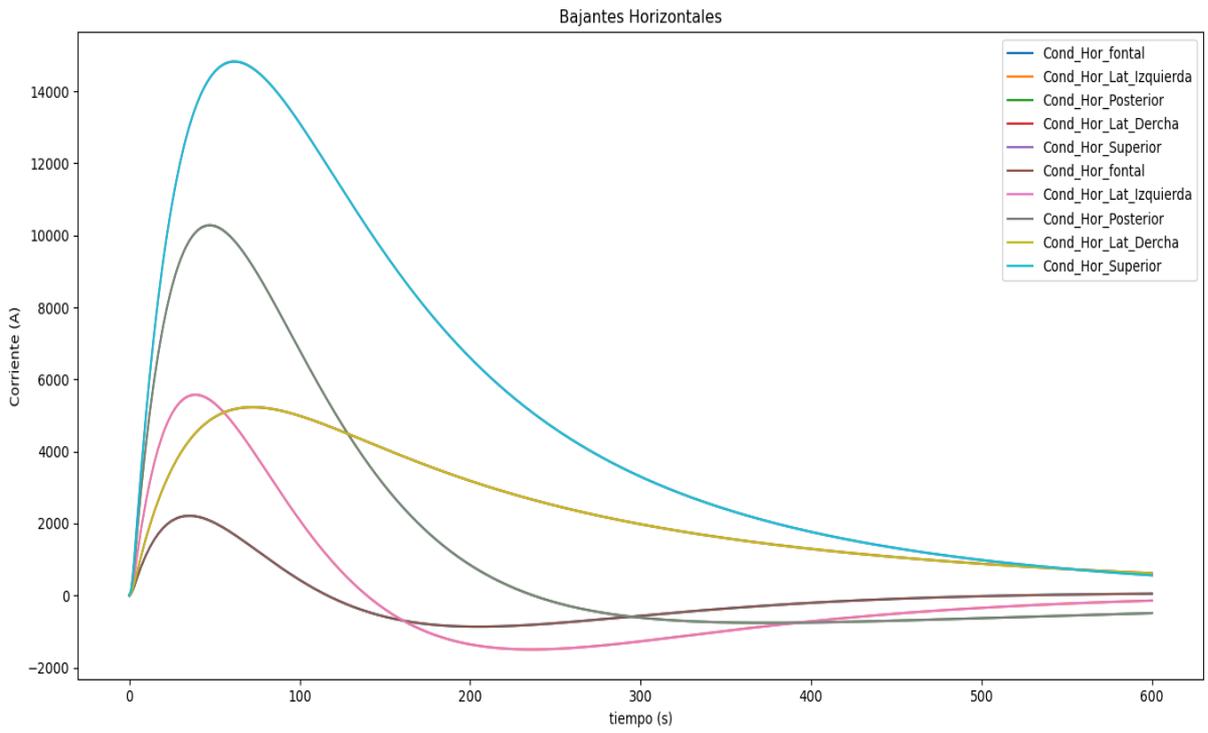


Anexo 20 Resultados de la simulación de la descarga atmosférica en la edificación

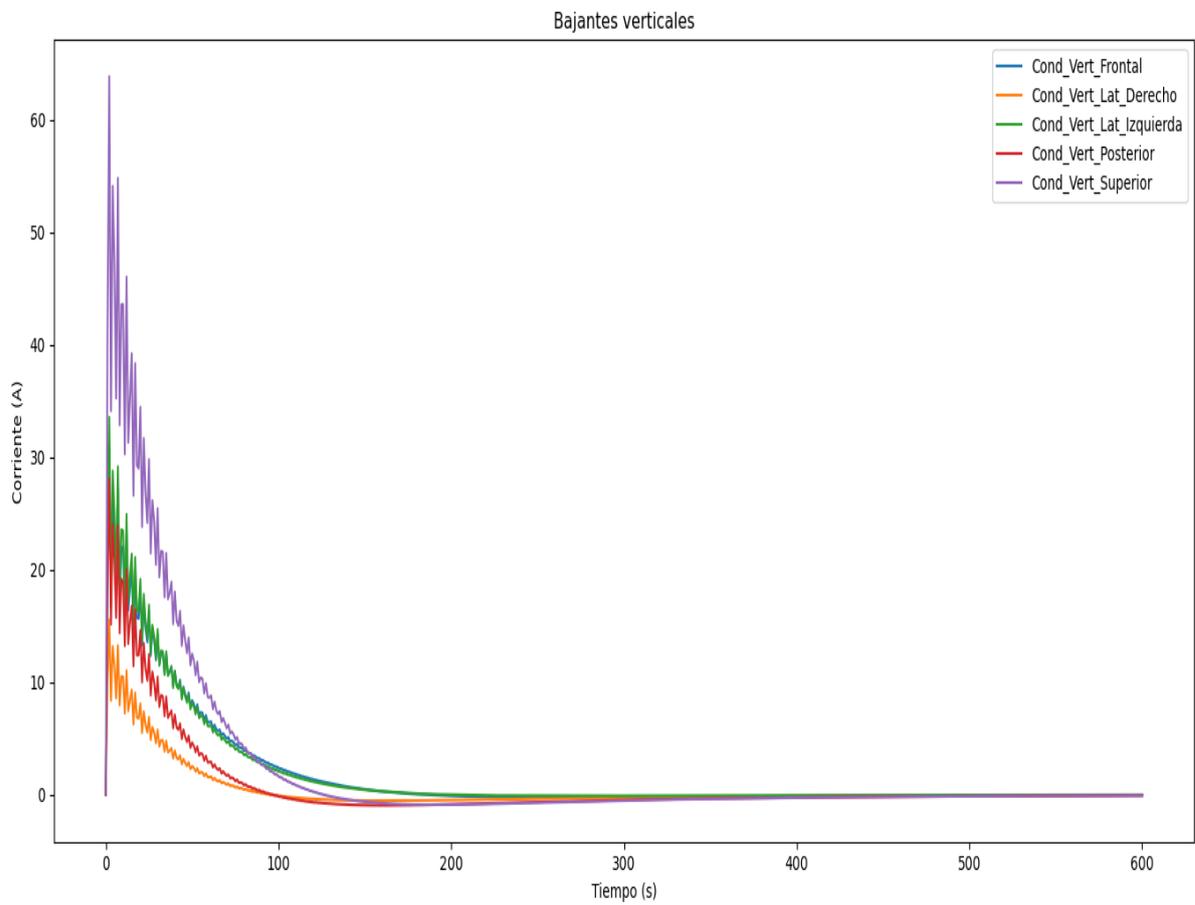
Simulación de descarga atmosférica en los sub sistemas de prtección eléctricos IEC 62305

Corrientes en las Bajantes Horizontales			Corrientes en las Varillas Copenweld		
Corrientes en las Bajantes Verticales			Corrientes en el SPT		
Variable: Cond_Hor_fontal	Corriente máxima: [2215.4834] A	Tiempo de ocurrencia: [3.5e-05] s	Variable: Cond_Vert_Frontal	Corriente máxima: [30.948719] A	Tiempo de ocurrencia: [2.e-06] s
Variable: Cond_Hor_Lat_Izquierda	Corriente máxima: [5573.4287] A	Tiempo de ocurrencia: [3.8e-05] s	Variable: Cond_Vert_Lat_Derecho	Corriente máxima: [15.555769] A	Tiempo de ocurrencia: [2.e-06] s
Variable: Cond_Hor_Posterior	Corriente máxima: [10276.673] A	Tiempo de ocurrencia: [4.7e-05] s	Variable: Cond_Vert_Lat_Izquierda	Corriente máxima: [33.545433] A	Tiempo de ocurrencia: [2.e-06] s
Variable: Cond_Hor_Lat_Dercha	Corriente máxima: [5229.824] A	Tiempo de ocurrencia: [7.3e-05] s	Variable: Cond_Vert_Posterior	Corriente máxima: [28.077871] A	Tiempo de ocurrencia: [2.e-06] s
Variable: Cond_Hor_Superior	Corriente máxima: [14822.391] A	Tiempo de ocurrencia: [6.2e-05] s	Variable: Cond_Vert_Superior	Corriente máxima: [63.842033] A	Tiempo de ocurrencia: [2.e-06] s
Variable: Var_Coper_Posterior	Corriente máxima: [10.151669] A	Tiempo de ocurrencia: [2.e-06] s	Variable: SPT_Later_Derecho	Corriente máxima: [3.884293e-11] A	Tiempo de ocurrencia: [1.e-06] s
Variable: Var_Coper_Interior	Corriente máxima: [57.977077] A	Tiempo de ocurrencia: [2.e-06] s	Variable: SPT_Posterior	Corriente máxima: [3.1575693e-11] A	Tiempo de ocurrencia: [1.e-06] s
Variable: Var_Coper_Lat_Derecha	Corriente máxima: [16.380352] A	Tiempo de ocurrencia: [2.e-06] s	Variable: SPT_Interno	Corriente máxima: [2.5245622e-11] A	Tiempo de ocurrencia: [1.e-06] s
Variable: Var_Coper_Lat_Izquierda	Corriente máxima: [8.298685] A	Tiempo de ocurrencia: [2.e-06] s	Variable: SPT_Lateralizquierdo	Corriente máxima: [1.891555e-11] A	Tiempo de ocurrencia: [1.e-06] s
Variable: Var_Coper_Frontal	Corriente máxima: [4.117563] A	Tiempo de ocurrencia: [2.e-06] s	Variable: SPT_Frontal	Corriente máxima: [3.0614497e-12] A	Tiempo de ocurrencia: [1.e-06] s

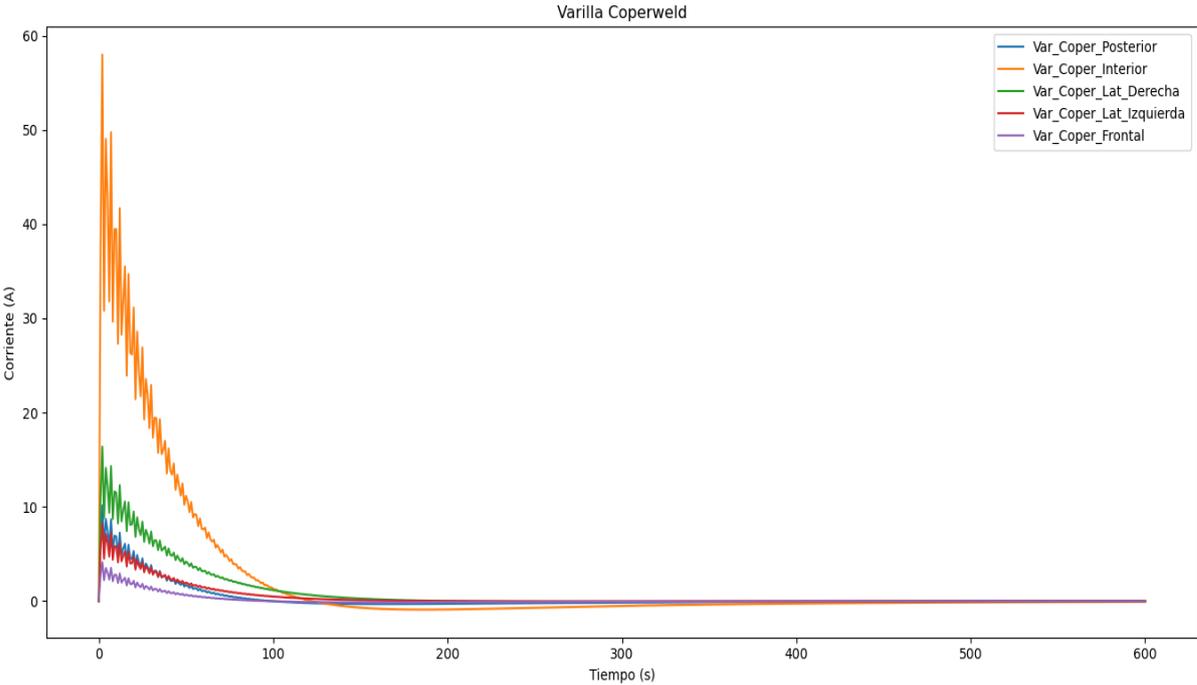
Anexo 21 Bajantes Horizontales



Anexo 22 Bajantes Verticales



Anexo 23 Varilla Copperweld



Anexo 24 Sistema de puesta a Tierra

