

Sistema de Apantallamiento y Puesta a Tierra para edificaciones residenciales, comerciales e Industriales

Shield and Grounding System for Residential, Commercial, and Industrial Buildings

A. Paguay¹, B. Vilca²

Recibido 22 de mayo de 2022; revisión aceptada 9 de octubre de 2022

RESUMEN:

Los Sistemas de Apantallamiento contra descargas atmosféricas conjuntamente con los sistemas de puesta a tierra permiten brindar una protección a personas, animales y objetos. Este documento establece el procedimiento para el desarrollo de estos sistemas, para ello se determina la siguiente secuencia: se inicia modelando la edificación mediante el software SOLIDWORKS, luego utiliza la normativa IEC-62305-2 para realizar un análisis de riesgo en base a la forma de la edificación, posteriormente para el diseño del sistema de apantallamiento se aplica el método electrogeométrico. En el caso del sistema de puesta a tierra se inicia realizando la medida de resistividad del terreno, y mediante el programa de código abierto IP2Win se obtiene el modelo del terreno con ello se calcula el sistema de puesta a tierra utilizando el procedimiento establecido en la Normativa IEEE std-80. En este caso se aplicó la metodología al edificio de la Casa de la Cultura Ecuatoriana "Benjamín Carrión Núcleo de Cotopaxi", el cual no cuenta con sistemas de protección contra descargas atmosféricas y contiene objetos de interés histórico a proteger. Los resultados obtenidos permiten determinar la ubicación adecuada de los pararrayos, así como las trayectorias del cableado y la estructura del sistema de puesta a tierra con lo cual se consigue tener una protección adecuada contra descargas atmosféricas.

Palabras claves: Riesgo eléctrico, resistividad del terreno, descargas atmosféricas.

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi, UTC, CIYA, alex.paguay4248@utc.edu.ec

² Universidad Técnica de Cotopaxi, UTC, CIYA, blanca.vilca9@utc.edu.ec

ABSTRACT:

The shielding systems against atmospheric discharges together with the grounding systems protect people, animals, and objects. This document establishes the procedure for the development of these systems, for which the following sequence is determined: in the first place the building is modeled using SOLIDWORKS software, then the IEC-62305-2 standard is used to perform a risk analysis based on the shape of the building, then the electrogeometric method is applied for the design of the shielding system. In the case of the grounding system, the ground resistivity measurement of the ground is started and using the open-source program IP2Win, the ground model is obtained and then the grounding system is calculated using the procedure established in the IEEE std-80 Standard. In this case, the methodology was applied to the building of the Casa de la Cultura Ecuatoriana "Benjamín Carrión Núcleo de Cotopaxi", which does not have protection systems against atmospheric discharges and contains objects of historical interest to be protected. The results obtained allow us to determine the adequate location of the lightning rods, as well as the wiring trajectories and the structure of the grounding system, thus achieving adequate protection against lightning strikes.

Keywords: *Electrical risk, soil resistivity, atmospheric discharges.*

1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador, existe un alto nivel isoceráunico debido a la zona de los trópicos de Cáncer y Capricornio. En la región Amazónica se presenta la mayor densidad de descargas atmosféricas, con un pico de 120 descargas atmosféricas por kilómetro cuadrado al año. En las demás regiones su promedio va de 40 a 60 descargas atmosféricas. Varios trabajos muestran la importancia de conocer el nivel isoceraunico para determinar un correcto sistema de apantallamiento.

En [1] se realiza un análisis geográfico del nivel isoceráunico, donde se identifica que la principal referencia para descargas eléctricas atmosféricas es un mapa desactualizado elaborado por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación, causando problemas en la toma de decisiones y dimensionamiento técnico en el sector eléctrico. En [2] se desarrolló un nuevo mapa isoceráunico, utilizando datos del Centro de Recursos de Hidrología Global de la NASA.

Respecto a la protección contra descargas atmosféricas, en [3] se propone el estudio de la implementación de un Sistema de Protección contra descargas atmosféricas (LPS) en un edificio y se evalúa el desempeño de acuerdo a distintos niveles de protección previstos en la IEC 62305-1, 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. Mientras que [4] llegó a la conclusión que las normas más utilizadas para la protección contra descargas atmosféricas son la norma europea IEC y la estadounidense ANSI /NFPA 78-1989, y la norma estadounidense NEC basada en la NFPA y los métodos utilizados para la protección contra descargas eléctricas son los siguientes: esfera rodante, malla, ángulo de protección y cono de protección.

Un caso interesante para el apantallamiento lo constituye la Casa de la Cultura Ecuatoriana "Benjamín Carrión Núcleo de Cotopaxi", edificio histórico que no dispone de un sistema de apantallamiento o puesta a tierra, pero cuya infraestructura contiene objetos de valor histórico. En este contexto se plantea el diseño del apantallamiento y puesta a tierra, el mismo que se desarrolló en cuatro etapas. 1) levantamiento de información y modelado de la edificación en SolidWorks, 2) análisis de riesgo eléctrico según la normativa IEC 62305-2, 3) determinación del lugar de instalación de puntas captadoras mediante el método electrogeométrico establecido en la IEC 62305-3 4) Finalmente, se calcula el sistema de puesta a tierra para la edificación siguiendo los pasos recomendados por la IEEE Std 80.

Este trabajo se estructura de la siguiente manera sección II en la que se revisa la metodología utilizada para resolver el problema. En la sección III se presenta los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección IV se discute los resultados, así como las limitaciones de trabajo.

Objetivo

Establecer un procedimiento para el desarrollo de sistemas de apantallamiento y puesta a tierra para brindar una protección adecuada contra descargas atmosféricas en edificaciones residenciales, comerciales e industriales.

2. METODOLOGÍA

Se propone una metodología de cuatro etapas para desarrollar un sistema de apantallamiento para la Casa de la Cultura Ecuatoriana "Benjamín Carrión Núcleo de Cotopaxi". En la primera etapa, se recopila información y se crea un modelo en 3D de la edificación mediante el software SolidWorks. En la segunda etapa, se realiza un análisis de riesgo de acuerdo con la normativa IEC 62305-2 para determinar el nivel de riesgo eléctrico. En la tercera etapa, se aplica el método electrogeométrico para determinar las trayectorias de las descargas eléctricas y ubicar las puntas captadoras. Finalmente, en la cuarta etapa, se toman medidas de la resistividad del suelo utilizando el método de Wenner y se utiliza el software IPI2win para calcular el sistema de puesta a tierra de acuerdo con la normativa IEEE Std 80.

Análisis del nivel de riesgo según la IEC 62305-2

En la Figura 1 se observa el Diagrama de Bloques correspondiente a 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 [5].

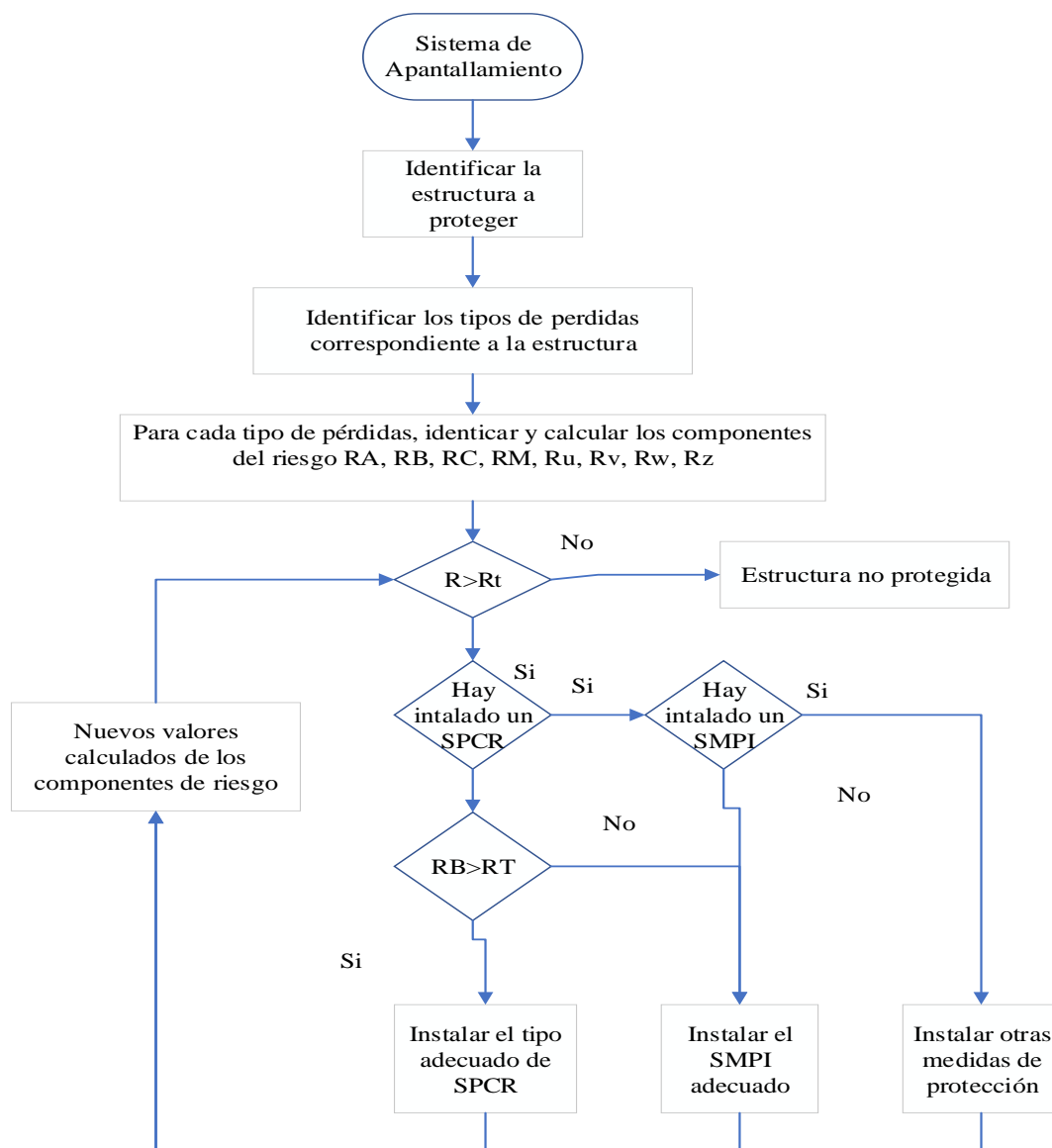


Figura 1 Análisis del riesgo [5]

Método Electrogeométrico

El método de la esfera rodante es una técnica utilizada para diseñar el apantallamiento para la protección de una edificación contra rayos. Consiste en una esfera ficticia de radio igual a la

distancia de impacto r_{sc} que rueda sobre las estructuras a proteger, haciendo contacto solo con las puntas captadoras. Se establece un nivel de protección en base a la Tabla 1. Se consideran protegidos aquellos puntos que se encuentran dentro de la zona definida por la superficie de la esfera y la superficie exterior de la estructura. Los puntos donde la esfera toca directamente en la estructura y el suelo no se encuentran protegidos, por lo que son propensos a ser alcanzados por las descargas atmosféricas [6].

Tabla 1 Nivel de Protección [5]

Nivel de protección	Radio de la esfera rodante r_s y su correspondiente valor de corriente de rayo i		Altura de la terminal aérea a partir del plano a proteger (h)
	r_s (m)	i (kA)	m
I	20	3	≤ 20
II	30	6	≤ 30
III	45	10	≤ 45
IV	60	16	≤ 60

NOTA - La corriente i (kA) se calcula de acuerdo al Apéndice A, para el radio r_s (m) correspondiente. Esta corriente representa el valor mínimo al cual el nivel de protección ofrece una protección eficiente.

Sistema de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra es esencial para proteger una instalación contra descargas atmosféricas ya que se encarga de disipar las corrientes del rayo. Cuando se produce una descarga atmosférica, la corriente de fuga se concentra en el punto de impacto y el potencial de tierra se distribuye de forma desigual. Esto afecta a la distribución de la corriente y los campos electromagnéticos debido a las diferencias de potencial entre los puntos de conexión a tierra [7].

Metodologías de medición de la resistividad del terreno

Se escogió el método Wenner para medir la resistividad del suelo, este método implica instalar cuatro puntas de prueba o electrodos en el suelo a una misma profundidad y un espaciamiento específico, conocido como "a". Los electrodos de corriente se denotan como C1 y C2, mientras que los electrodos de potencial se denotan como P1 y P2. A partir de la Ecuación (1) se puede calcular la resistividad aparente del suelo medida en Ω m.

$$\rho = 2\pi aR \quad [\Omega.m] \quad (1)$$

Cálculo de la malla de puesta a tierra

Una vez obtenidos los datos de la resistividad del suelo se ingresan a IPI 2win para obtener el modelo de 2 capas, de forma paralela en [8] desde el Geo portal Web de ELEPCOSA se determinan los datos del transformador, los cuales se utilizarán para el cálculo del sistema de puesta a tierra.

El procedimiento para el cálculo del sistema de puesta a tierra se detalla en la Figura 2, está basado en la normativa IEEE Std. 80. Este procedimiento incluye la evaluación de las condiciones de suelo, el diseño de la malla de puesta a tierra, la selección de los conductores y sus componentes. Los cálculos se basan en el peso de una persona, utilizando 50 kg para mujeres y 70 kg para hombres.

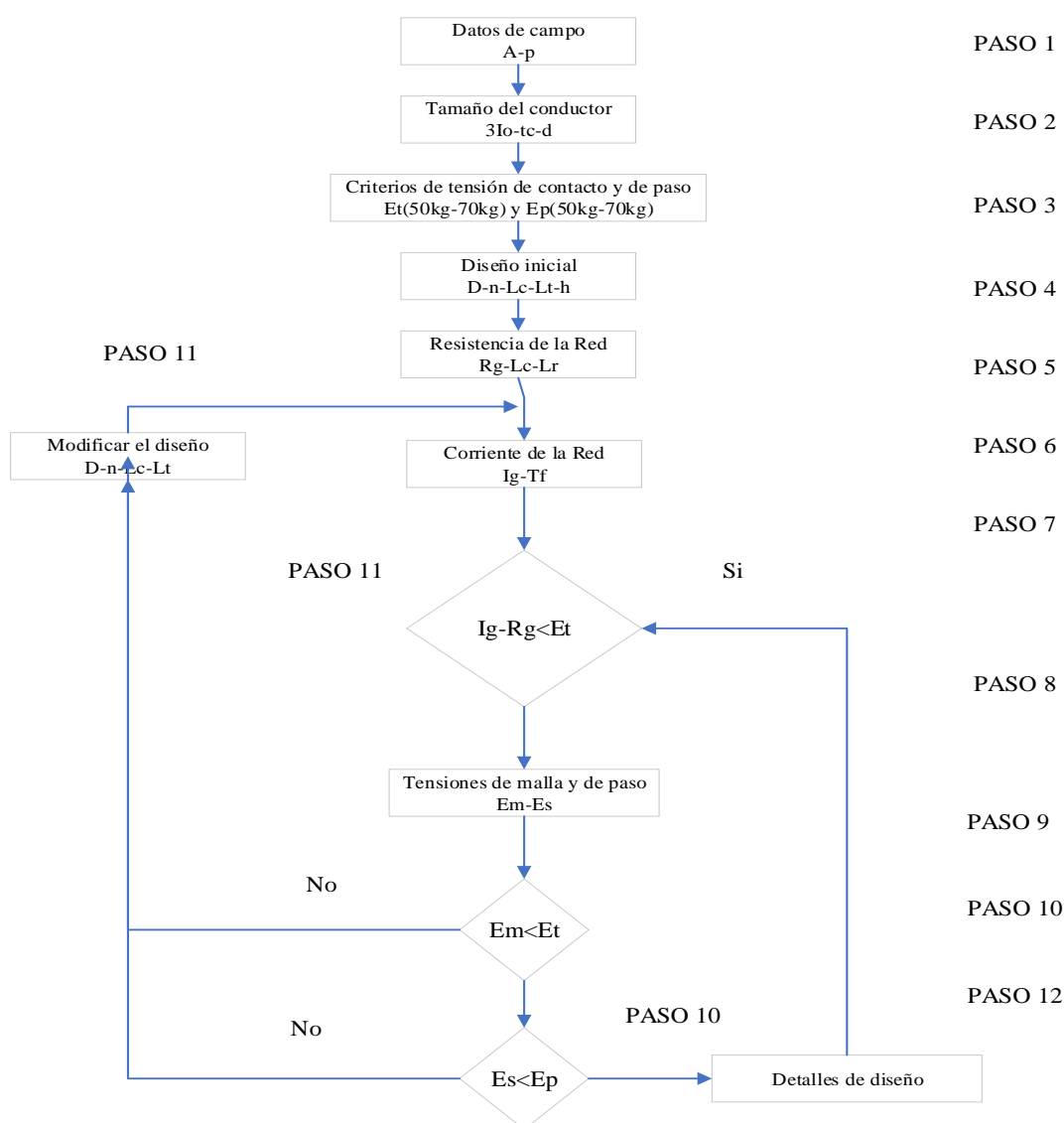
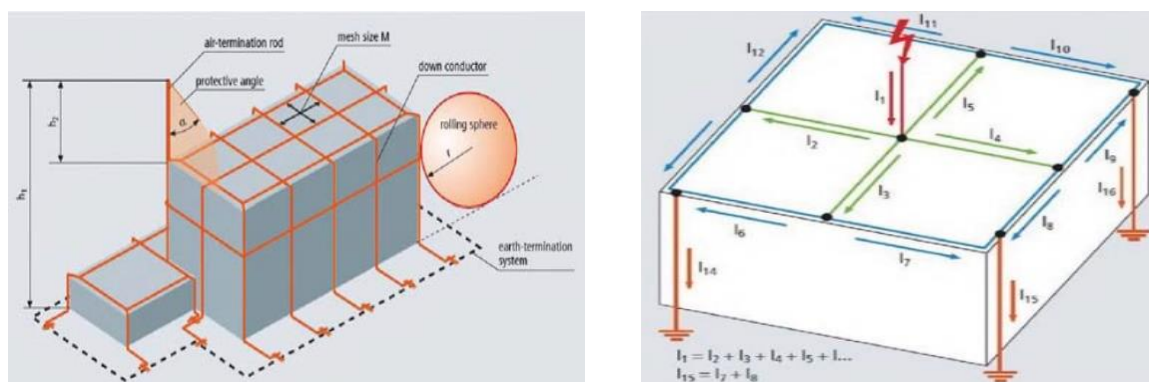


Figura 2 Pasos para realizar el Sistema de Puesta a tierra [7]

Equivalentes eléctricos de Lightning Protection Standard (LPS).

En el LPS se consideran diferentes métodos de protección, para este trabajo se optó por el método de la Jaula de Faraday, este considera varillas y mástiles, conductores suspendidos y conductores en una rejilla. En la Figura 3 A, se observa un esquema del método mencionado, el cual se encarga de interceptar los rayos en el edificio y conducir la corriente de rayo desde el punto de impacto hasta la tierra, dispersándola en el suelo sin causar daños [3].

En la Figura 3 B, se identifican tres subsistemas los cuales son: subsistema de terminación aérea, subsistema de bajantes y subsistema de puesta a tierra. Se menciona también el principio básico de protección propuesto por Michael Faraday conocido como el método de la rejilla, que utiliza conductores de captura dispuestos en una topología en forma de anillo, con el fin evitar la entrada de la corriente de rayo dentro del edificio [3].



A) Subsistemas de terminación aérea

B) Corrientes en los sistemas de terminación aérea

Figura 3 Lightning Protection Standard (LPS) [3].

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del levantamiento de información, análisis de riesgo, la aplicación del método electrogeométrico y el sistema de puesta a tierra. Para determinar el sistema de apantallamiento y puesta a tierra para la Casa de la Cultura Ecuatoriana "Benjamín Carrión Núcleo de Cotopaxi"

Medición de la resistividad del suelo mediante el método Wenner.

Con los valores de resistencia obtenidos a través de mediciones realizadas con un Telurómetro, y con el uso de la Ecuación (1) se determina la resistividad aparente, estos resultados se

ingresaron al IPI2win con el fin de obtener una mejor comprensión de la resistividad del suelo, con el modelo de dos capas representado en la **Figura 4**.

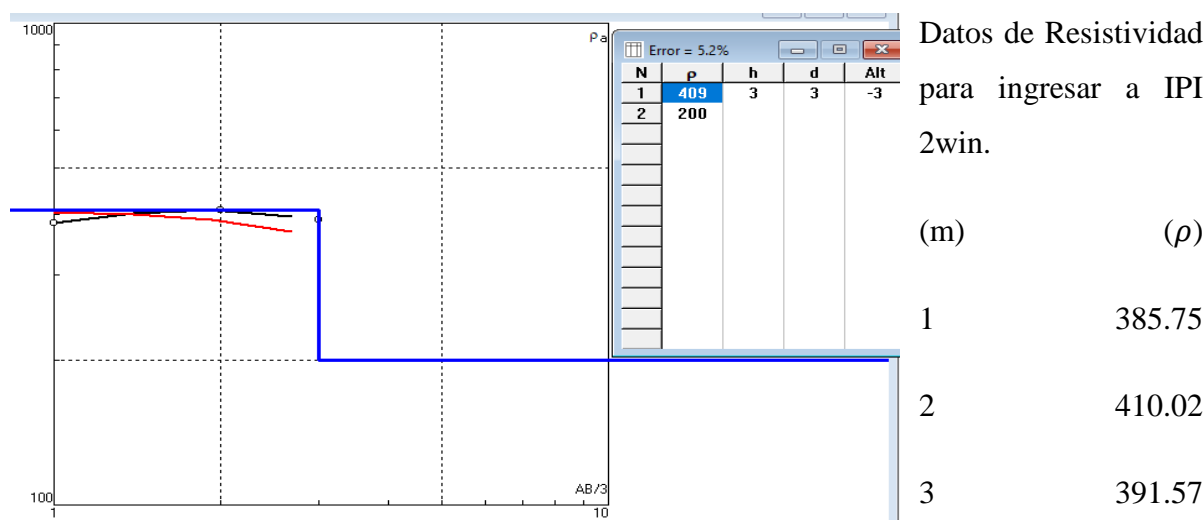


Figura 4 Modelo de dos capas de la resistividad el suelo

Evaluación del riesgo eléctrico según la IEC 52305-2

La presente información es importante para evaluar el riesgo en una estructura, la cual incluye características ambientales y físicas, como la densidad de rayos por año y las dimensiones de la estructura, información sobre la protección de la estructura y la protección externa. Este análisis se realizó en base a la norma IEC 52305-2 [5]. La Tabla 2 determina los parámetros del análisis de riesgo,

Tabla 2 Parámetros del análisis de riesgo

Parámetros del análisis de riesgo	Simbología	Valor
Densidad de descargas a tierra	Ng	3,38
Superficie de captación de descargas	Ad	
Superficie de forma compleja	A'd	6302,50
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	0,08
Evaluación del valor medio anual de sucesos peligrosos por descargas en un servicio	NL	0,00
Superficie de captación de las descargas que inyectan en el servicio	A1	60,67
Superficie de captación de las descargas a tierra cerca del servicio	Ai	15167,81
Evaluación del valor medio anual de sucesos peligrosos por descargas cerca de un servicio	N1	0,01

Una vez realizada la evaluación del riesgo eléctrico en el software Risk Assessment se obtuvieron los siguientes resultados detallados en la Tabla 3. Los valores obtenidos indican que

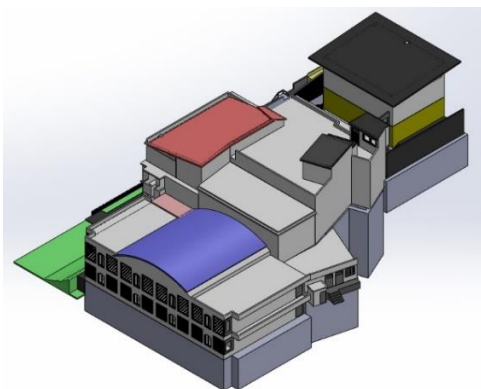
es necesario corregir los riesgos de pérdidas de vidas humanas con un valor de $1,4 * 10^{-1}$ y riesgos económicos con un valor de $1,1 * 10^{-3}$. Sin embargo, no se requiere corregir el riesgo de pérdida de patrimonio con un valor de $1,35 * 10^{-5}$ y el riesgo de pérdida de servicios públicos con un valor de 0.

Tabla 3 Resultados obtenidos del análisis de riesgos eléctricos

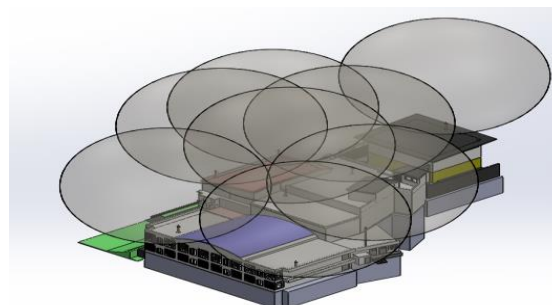
Tipo de Riesgo	Valor	Observación
Riesgo de pérdida de patrimonio	$1,59 * 10^{-6}$	No es necesario Corregir
Riesgo de pérdidas de vidas humanas	$1,68 * 10^{-3}$	Corregir
Riesgo de pérdida de servicios públicos	$1,67 * 10^{-4}$	No es necesario Corregir
Riesgo de pérdidas económicas	$2.45 * 10^{-5}$	Corregir

Método electrogeométrico

La aplicación del método electrogeométrico se efectúa una vez levantada la información de la edificación y cuando ya se disponga del modelo en 3D en SolidWorks. En la Figura 5 se observa a la Casa de la Cultura Ecuatoriana "Benjamín Carrión Núcleo de Cotopaxi", con un sistema de apantallamiento.



A) Sin sistema de Apantallamiento



B) Con Sistema de Apantallamiento

Figura 5 Aplicación del sistema de apantallamiento

Sistema de puesta a tierra

Un sistema de puesta a tierra es un conjunto de componentes y dispositivos utilizados para conectar un conductor eléctrico a la tierra, con el objetivo de reducir el riesgo de electrocución y proteger los equipos eléctricos de sobretensiones y corrientes de falla. Mediante AutoCAD se realiza un diseño en 2D de la malla para ser llevado hacia el software ETAP para que se determine los parámetros del mallado.

Vinculación AutoCAD con ETAP

Para vincular el software AutoCAD con ETAP, es necesario seguir una serie de pasos para que el software reconozca el diseño del sistema de apantallamiento y puesta a tierra que se planea instalar. El primer paso es restablecer el archivo ETMenu2006.cuix de la opción menú de AutoCAD para que aparezca la opción ETAP Tools en la barra de comandos de AutoCAD. Esta opción permite exportar el dibujo de la malla para el sistema de apantallamiento, utilizando un lenguaje de comunicación común entre los programas.

Para que el programa reconozca las varillas y los conductores, se utiliza una circunferencia para representar a las varillas y una línea para representar a los conductores en AutoCAD como se puede observar en la Figura 6. Una vez que se han asignado estas representaciones, el programa muestra la ruta de guardado y una notificación de que el diseño se ha exportado de manera exitosa.

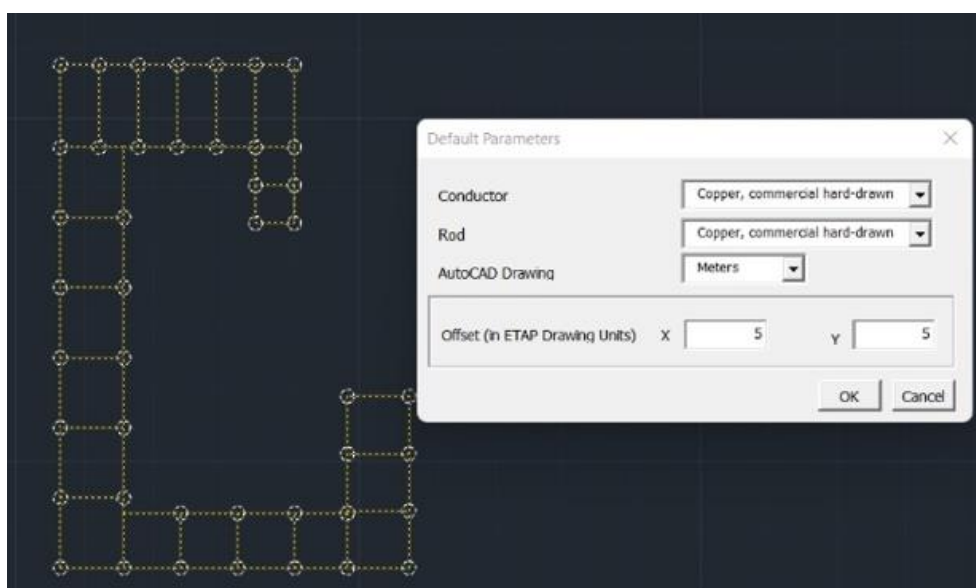


Figura 6 Definición del tipo conductor y varilla a utilizarse y unidades de medida.

Resultados obtenidos mediante el software ETAP

Los resultados obtenidos mediante el software ETAP se presentan en la Tabla 4, se puede observar que los valores de voltaje de toque y paso tolerables para personas con un peso de 70 kg son superiores a los calculados, además que la resistencia de la malla es de 1.64 Ω . Con estos datos se asegura el cumplimiento de los parámetros del sistema de puesta a tierra según la normativa IEEE Std 142.

Tabla 4 Resultados obtenidos mediante el software ETAP

Voltaje de toque	Voltaje tolerable	Voltaje de paso	Voltaje tolerable	GPR	Rg
------------------	-------------------	-----------------	-------------------	-----	----

76,10	117,50	817,50	2663,30	310,10	1,64
-------	--------	--------	---------	--------	------

En la Figura 7 se puede observar el comportamiento del Aumento de Potencial de Tierra GPR, voltaje de toque y el voltaje de paso respectivamente, en donde en los tres casos se aprecia una protección homogénea para toda el área del caso de estudio garantizando la fidelidad del sistema, cabe recalcar que existe una elevación de potencial en una parte del sistema a instalar ya que según la configuración estipulada en la parte superior derecha el predio colinda con un terreno ajeno limitando así la instalación del mallado en esa área.

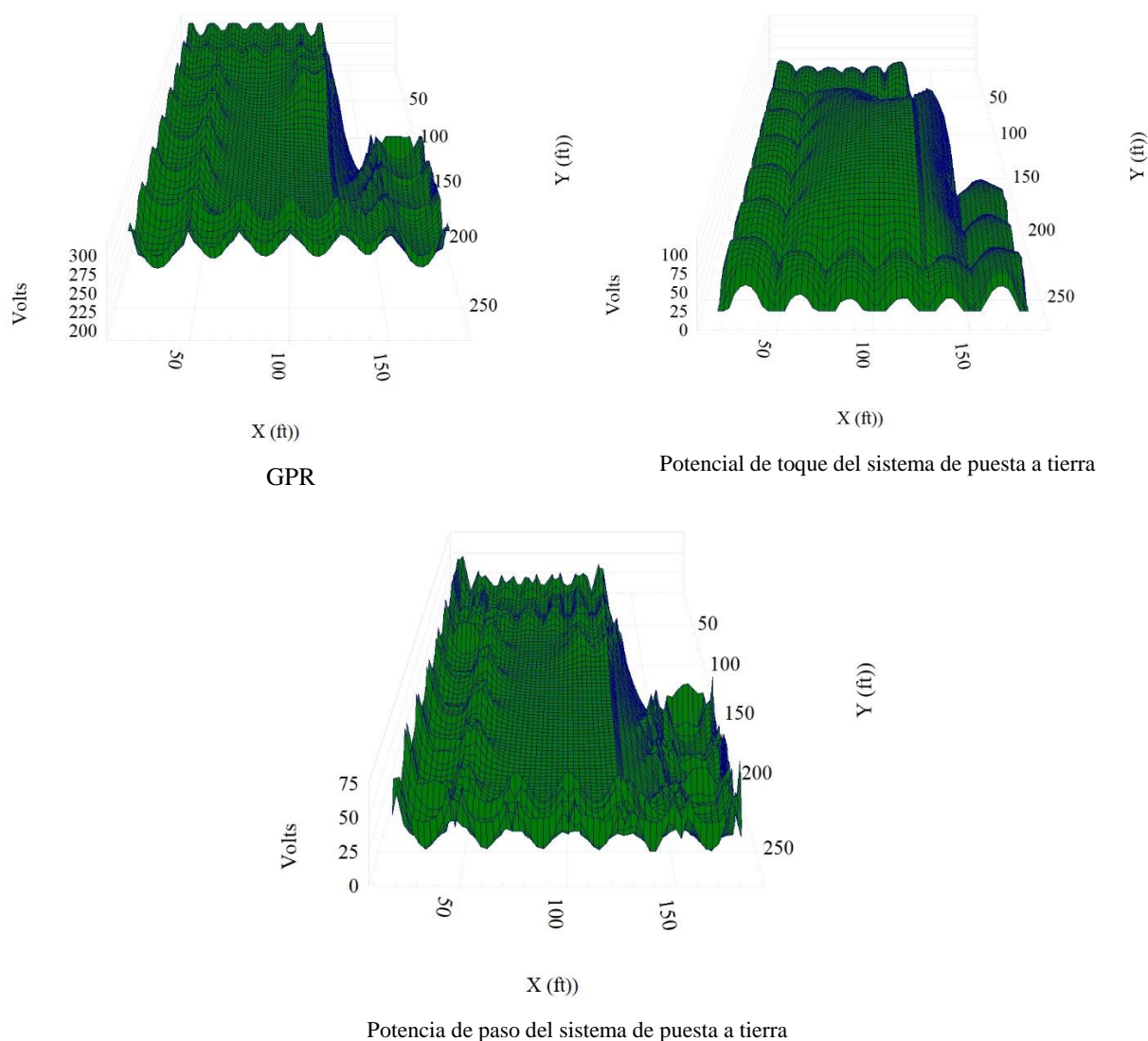


Figura 7 Modelo en 3D del sistema de puesta a Tierra

Comprobación del análisis de riegos

Una vez implementado el sistema de apantallamiento y el sistema de puesta a tierra en la edificación, se debe realizar nuevamente el análisis de riesgo eléctrico en el software Risk

Assessment. En la **Tabla 5** se identifica que ya no hay riesgo eléctrico que necesita ser corregido.

Tabla 5 Análisis final de riesgos eléctricos

Tipo de Riesgo	Valor	Observación
Riesgo de pérdida de patrimonio	$1,81 \times 10^{-6}$	No es necesario Corregir
Riesgo de pérdidas de vidas humanas	$1,81 \times 10^{-6}$	No es necesario Corregir
Riesgo de pérdida de servicios públicos	$3,03 \times 10^{-4}$	No es necesario Corregir
Riesgo de pérdidas económicas	$3,91 \times 10^{-5}$	No es necesario Corregir

4. CONCLUSIONES

Con el cálculo inicial del análisis de riesgo se pudo demostrar que el peligro de pérdidas de vidas humanas se encuentra fuera de los valores permitidos siendo necesario medidas correctivas para evitar sucesos peligrosos de descargas atmosféricas, es por eso que se diseñó un sistema de apantallamiento guiado a la protección de cada uno de los tipos de riesgo.

Las puntas captadoras se encargan de conducir las corrientes de la descarga atmosférica captada por el subsistema aéreo, y conducirlo mediante las bajantes a tierra y disiparla en un sistema de puesta a tierra.

La ubicación óptima de puntas captadoras en una edificación permite evitar problemas causadas por descargas atmosféricas que pueden impactar, por lo que es de vital importancia una correcta aplicación de la normativa internacional IEC 62305-3.

Los sistemas de apantallamiento y puesta a tierra son fundamentales para brindar protección contra descargas atmosféricas. Se utilizaron métodos y normativas específicas para el diseño de estos sistemas en el edificio de la Casa de la Cultura Ecuatoriana, logrando una protección adecuada.

Mediante la elaboración de este artículo se presentó una serie de procedimientos para el análisis, diseño y construcción del sistema puesta a tierra, basados en la normativa IEEE Sdt 80, a fin de establecer los criterios, procesos y especificaciones que se debe seguir para correcto diseño de una puesta a tierra.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diego Arias *et al.*, «Panorama Eléctrico 2021», *Agencia de Regulación y Control de Energías y Recursos Naturales No Renovables*, vol. 1, n.º 6, pp. 24-28, sep. 2021, Accedido: sep. 05, 2022. [En línea]. Available: <moz-extension://6b07b22a-db3d-4b82-bf35-d80881395969/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fwww.controlrecursosyenergia.gob.ec%2Fwp-content%2Fuploads%2Fdownloads%2F2021%2F09%2FPanoramaElectricoVI-Septiembre-Baja.pdf>
- [2] Manuel Alejandro Zurita Álvarez, «Mapa isocerámico georreferenciado para la coordinación de protecciones frente a descargas atmosféricas.», Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Quito, 2020. Accedido: nov. 30, 2022. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18815/1/UPS%20-%20TTS019.pdf>
- [3] T. Lucietti, V. L. Coelho, y 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.
- [4] 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 Ucsq, y U. E. la Facultad De Arquitectura, «Estudio, Diseño E Implementación De Las Protecciones Eléctricas, Puesta A Tierra Y Pararrayos Para Los Sistemas», Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2010.
- [5] IEC Norma Internacional y UNE Norma Europea, «Protección contra el rayo, Parte 2: Evaluación del riesgo», *Asociación Española de Normalización y Certificación*, vol. 1, 2006, Accedido: dic. 06, 2022. [En línea]. Available: https://drive.google.com/drive/folders/1XfJ67RSMQZpId_73UJafKECUoo3kbVyP
- [6] IEEE Power Engineering Society. Substation Committee., American National Standards Institute., Institute of Electrical and Electronics Engineers., y IEEE Standards Board., «IEEE Std. 998 Guía para rayos directos - Blindaje de Subestaciones.», 1996, Accedido: ene. 15, 2023. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4237>
- [7] IEEE, «Guide for Safety in AC Substation Grounding», *IEEE Standards Association*, vol. 1, ene. 2013, Accedido: dic. 01, 2022. [En línea]. Available: https://drive.google.com/drive/folders/1XfJ67RSMQZpId_73UJafKECUoo3kbVyP
- [8] Elepco S.A., «Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi - Elepcosa», *Geoportal Web*. <https://elepcosa.com.ec/> (accedido ene. 05, 2023).