

Desarrollo de aplicativo 3D compatible con AutoCAD para la optimización de sistemas de protección contra descargas atmosféricas

Otoniel Ordoñez Nuñez

Trabajo de Grado Presentado como Requisito Parcial para el Título de:

Tecnólogo en Eléctrica

Directores:

Joseph Sosapanta Salas

Santiago Bustamante Mesa

Línea de Investigación:

Energías renovables y sistemas eléctricos

Institución Universitaria Pascual Bravo

Facultad de Ingeniería

Noviembre 2024

Resumen

Este aplicativo será basado en la norma NTC 4552-1 2022 y NTC 4552-2 2023 aplicando el modelo electrogeométrico que consiste en hacer rodar una esfera imaginaria sobre elementos captadores tales como puntas captadoras o cables de guarda para que esta no toque la estructura que se desea proteger contra las descargas atmosféricas con el objetivo de garantizar la seguridad de las personas y equipos.

Generalmente la realización del diseño de sistemas de protección contra descargas atmosféricas en compañías consultoras de ingeniería se basa en la ejecución de un planimétrico que se genera de forma manual en AutoCAD, inicialmente en dos dimensiones, generando muchas secciones de dibujo lo cual resulta muy engorroso, debido a esto surge la necesidad de realizarlo en tres dimensiones. Sin embargo, no deja de ser manual, donde cualquier cambio significa muchas horas hombre, por consiguiente, se busca desarrollar un aplicativo que sea compatible con AutoCAD, que tenga la capacidad de realizar este entregable de forma automática buscando reducir el margen de error y que en el momento de generarse algún cambio sea más dinámico la realización del mismo.

Palabras clave: AutoCAD, apantallamiento, electrogeométrico, esfera rodante, puntos de captación,

Abstract

This application will be based on the NTC 4552-1 2022 and NTC 4552-2 2023 standards, applying the electrogeometric model which consists of rolling an imaginary sphere over capturing elements such as lightning rod or guard cables so that it does not touch the structure intended to be protected against atmospheric discharges with the aim of guaranteeing the safety of people and equipment.

Generally, the design of lightning protection systems in engineering consulting companies is based on the execution of a planimetric drawing generated manually in AutoCAD, initially in two dimensions, generating many drawing sections which is very complicated. Due to this, there arises the need to carry it out in three dimensions. However, it remains manual, where any change means many man-hours, therefore, the aim is to develop an application that is compatible with AutoCAD, capable of automatically generating this deliverable in order to reduce the margin of error and make it more dynamic when changes occur

Keywords: AutoCAD, lightning, electrogeometric, sphere, lightning rod.

Tabla de Contenido

Resumen.....	2
Abstract	3
Tabla de Contenido	4
Lista de tablas	6
Lista de figuras.....	7
Introducción	8
Motivación	8
Revisión de la literatura	9
Contribuciones	11
Organización del documento.....	11
Planteamiento del problema.....	12
Justificación	13
Objetivos.....	14
Objetivo general:	14
Objetivos específicos:	14
Metodología	15
Marco teórico.....	16
Daños causados por los rayos	16
Daños en una estructura	16
Efectos del rayo en una estructura	16
Fuentes y tipos de daños en una estructura	17
Tipos de pérdidas	18
Necesidad de la protección contra el rayo.....	20
Justificación económica de la protección contra el rayo.....	21
Niveles de protección contra el rayo (NPR)	21
Esfera Rodante	22
Múltiples electrodos de captación	25
Planimetría sistema de protección contra descargas atmosféricas	27
Marco legal	29
Caso de estudio	31
Análisis de resultados	33
Bloque “PtoCaptacion”	33
Aplicativos LISP de esfera rodante.....	33

Protección contra descargas atmosféricas	37
Conclusiones	39
Referencias bibliográficas.....	40

Lista de tablas

Tabla 1. Efectos del rayo en estructuras típicas.	16
Tabla 2. Daños y pérdidas de una estructura según el punto de impacto del rayo.	19
Tabla 3. Valores mínimos de los parámetros del rayo y radio de la esfera rodante asociada.....	21
Tabla 4. Listado de equipos relevantes.	31

Lista de figuras

Figura 1. Tipo de pérdida y sus riesgos correspondientes resultante de los diferentes tipos de daños.	19
Figura 2. Principio de la esfera rodante con múltiples puntos de captación.....	22
Figura 3. Protección del mástil contra la corriente de impacto I_{s1}	23
Figura 4. Modelo electrogeométrico vista tridimensional.	24
Figura 5. Protección de mástil en múltiples posiciones para corriente de impacto I_s	26
Figura 6. Protección mediante cables de guarda y mástiles.	26
Figura 7. Planimetría utilizando método de esfera rodante utilizando 2 dimensiones.	27
Figura 8. Planimetría utilizando método de esfera rodante utilizando 3 dimensiones.	28
Figura 9. Vista isométrica sistema de apantallamiento de una planta industrial a campo abierto.	28
Figura 10. Planta industrial.....	31
Figura 11. Niveles de protección para los equipos de la planta.....	32
Figura 12. Bloque “PtoCaptacion”.	33
Figura 13. Aplicativos.....	34
Figura 14. Comando “ESFERARONDATE3D”	34
Figura 15. Esfera rodante en puntos de captación.	35
Figura 16. Esfera rodante final.	35
Figura 17. Esfera rodante tres puntos de captación.	36
Figura 18. Sistema de apantallamiento final de planta industrial.	37
Figura 19. Planimetría Sistema de Protección Contra Descargas Atmosféricas.	38

Introducción

Un sistema de protección contra descargas atmosféricas, comúnmente conocido como apantallamiento, es un conjunto de elementos diseñados para proteger estructuras y personas de los efectos dañinos de los rayos durante tormentas eléctricas. Estos sistemas se instalan para desviar la energía eléctrica de los rayos hacia el suelo de manera segura, evitando daños materiales y lesiones humanas. El diseño del apantallamiento se plasma en un plano que ofrece una representación visual detallada, indicando la disposición de los componentes del sistema con respecto a la estructura protegida. Esto facilita tanto la instalación como el mantenimiento del sistema de protección contra descargas atmosféricas.

Motivación

En cada proyecto de construcción, ya sea de edificaciones o plantas industriales, resulta esencial la implementación de un sistema de apantallamiento eficaz. Este sistema desempeña un papel fundamental en la reducción de los riesgos asociados a las descargas atmosféricas, las cuales pueden causar daños en equipos eléctricos, interrupciones en el suministro de energía e incluso poner en peligro la vida de las personas. Es por ello que estos sistemas deben ser diseñados por expertos en electricidad, aplicando meticulosamente el método electrogeométrico de la esfera rodante, y luego plasmarlos en un plano para su implementación.

Al elaborar el plano de apantallamiento, que se realiza utilizando el método electrogeométrico de la esfera rodante es esencial tanto la calidad como el tiempo. En proyectos que demandan plazos más ajustados y una calidad superior día a día, resulta indispensable

aprovechar las diversas herramientas que ofrecen los programas para optimizar estos aspectos, creando un aplicativo para fortalecer la fiabilidad de los diseños presentados en el plano.

Revisión de la literatura

En esta tesis del autor Max G. Molina Bustamante (1979), en sus tiempos desarrolló un programa digital que permitía diseñar un sistema de apantallamiento de subestaciones bajo diferentes exigencias de confiabilidad. Para ello se emplea el modelo electrogeométrico tridimensional, presentando varias alternativas de solución al problema de apantallamiento en subestaciones, mediante el empleo de cables de guarda y/o mástiles. También describe que hasta 1929 se pensaba que era imposible proteger un sistema de potencia contra las descargas atmosféricas. En 1942 Charles F. Wagner publicó curvas de aplicación para el apantallamiento de subestaciones, las cuales estuvieron basadas en pruebas en laboratorios. Posteriormente, Gilman D.W. y Whitehead E.R. calibraron el modelo electrogeométrico, el cual fue extendido a un modelo tridimensional por el autor Michael A. Sargent (1972) que a su vez lo desarrolla como una técnica mejorada para evaluar la efectividad del apantallamiento de líneas de transmisión.

El artículo de los autores Javier Murcia, Camilo Velosa y Leonardo Porras (2017) examina en Colombia la relación técnica entre la amplitud de corriente pico de los rayos y la densidad de destellos de iluminación provenientes de nubes a tierra, utilizando datos recopilados durante 15 años con el objetivo de entender la razón detrás de la alta actividad de rayos en Colombia.

Luis Eduardo Morales Ventura (2019) se enfoca en desarrollar un programa en Visual Studio Code para diseñar apantallamientos en subestaciones, el cual permite ingresar

información de entrada con parámetros como alturas, cantidad de conductores por fase, tipo de subestación, distancias entre los cables de guarda, entre otros. Este programa inicia automáticamente los cálculos y muestra los resultados divididos en tres pestañas entre las que están el método Newton-Raphson utilizado para calcular el radio corona, la tabla de resultados finales del apantallamiento y una vista previa del plano de la subestación previamente seleccionada con la opción de descarga.

En la subestación de 34.5 kV del municipio de Guacamayas perteneciente a la Empresa de Energía de Boyacá S.A el autor Jhon Correa (2021) analiza y diseña el sistema de puesta a tierra y protección contra descargas atmosféricas, evaluando diseños existentes de la subestación, evaluando los componentes del apantallamiento como número y tipo de bajantes, conductores, captadores y dispositivos de sobretensión. El proyecto permitió elaborar memorias de cálculo, diseñar la subestación y establecer un plan de mantenimiento e infraestructura para minimizar los efectos de fallas en el sistema y descargas atmosféricas, especialmente en una región de alta densidad de estas últimas.

Mediante un algoritmo creado en Python, los autores (Paguay Llamuca, Alex Ivan, 2023) abordan la tarea de dimensionar los apantallamientos, e incorporan el sistema de puesta a tierra según el método de la esfera rodante. Este enfoque garantiza la viabilidad de los apantallamientos en una variedad de proyectos eléctricos, en conformidad con las normativas establecidas por la IEC 62605, obteniendo la reducción de tiempo en la ejecución del diseño de protección contra descargas atmosféricas.

Contribuciones

Este aplicativo marca una diferencia respecto a los avances previos al buscar no solo mejorar los tiempos del diseño de apantallamiento, sino también resaltar la importancia de reflejar adecuadamente dicho diseño en la representación gráfica del planimétrico. Se enfoca en destacar cada detalle del modelo de apantallamiento que se llevará a cabo mediante el desarrollo del aplicativo.

Utilizando el método electrogeométrico para simular el desplazamiento de una esfera a lo largo de los puntos de captación, promete reducir significativamente los tiempos de diseño. Al ofrecer una representación gráfica del funcionamiento del sistema de protección contra descargas atmosféricas, garantiza una mayor confiabilidad y calidad en un período de tiempo más corto, lo cual es crucial en un entorno donde los plazos de entrega son cada vez más ajustados. Los parámetros del aplicativo están en línea con la normativa vigente, la NTC 4552. En caso de cambios, simplemente se puede repetir el proceso en el aplicativo para asegurar su confiabilidad, destacando que el tiempo necesario será notablemente menor que el actual. Una vez validada la efectividad del apantallamiento por el usuario, se procederá a la elaboración del plano, basado en un diseño óptimo y modelado.

Organización del documento

El desarrollo del presente trabajo consta de un marco teórico que consta de los conceptos más relevantes del sistema de protección contra descargas atmosféricas y marco legal donde se describe las normas y reglamentos que se aplicaron en el mismo.

Planteamiento del problema

Cada vez más, los plazos de entrega de proyectos se reducen mientras se espera que la calidad se mantenga alta. En este escenario, es esencial aprovechar los avances tecnológicos, especialmente el lenguaje de programación de AutoCAD, utilizado en el proceso de diseño y desarrollo de empresas consultoras de ingeniería. En este contexto, ¿Cómo puede un aplicativo 3D mejorar la eficiencia y precisión en el diseño y análisis de sistemas de protección contra descargas atmosféricas, considerando las limitaciones de la presentación convencional en planimétricos?

Justificación

Para garantizar la conformidad con las normativas colombianas vigentes NTC 4552 y mejorar la eficiencia, precisión, seguridad y fiabilidad del sistema de protección contra descargas atmosféricas, se hace necesario implementar un aplicativo compatible con AutoCAD programado en el lenguaje "Lisp".

Es obligatorio en Colombia implementar medidas de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones domiciliarias, comerciales e industriales de acuerdo al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, (2024) RETIE, “1.5.1.3 Factores de riesgo eléctrico más comunes, Tabla 1.5.1.3.a. RAYOS”. Por lo tanto, este aplicativo se convierte en una herramienta fundamental para facilitar el desarrollo del entregable del sistema de protección contra descargas atmosféricas, cumpliendo con las regulaciones establecidas y garantizando la seguridad eléctrica en diversas estructuras.

Objetivos

Objetivo general:

- Desarrollar un aplicativo 3D compatible con AutoCAD para el diseño de sistemas de protección contra descargas atmosféricas.

Objetivos específicos:

- Realizar pruebas exhaustivas de funcionalidad y rendimiento del aplicativo 3D en diferentes escenarios y condiciones, incluyendo la verificación de su compatibilidad con distintas versiones de AutoCAD y la evaluación de su desempeño en términos de velocidad de procesamiento y estabilidad del sistema.
- Diseñar una interfaz de usuario intuitiva y funcional que permita a los usuarios crear y editar sistemas de protección contra descargas atmosféricas en un entorno 3D, facilitando la visualización y manipulación de los componentes del sistema y mejorando la eficiencia en el proceso de diseño.

Metodología

El método electrogeométrico consta de simular el movimiento de una esfera imaginaria sobre la superficie de la estructura a proteger, durante esta simulación, se identifican los puntos donde la esfera toca la estructura, lo que representa los posibles puntos de impacto de una descarga atmosférica. Con base a esta información, se determina la ubicación óptima de los dispositivos de protección contra descargas atmosféricas para interceptar las descargas para garantizar una protección adecuada contra los efectos del rayo.

Marco teórico

Daños causados por los rayos

Daños en una estructura

Los rayos que afectan a una estructura pueden producir daños en la propia estructura, a sus ocupantes y a sus contenidos, incluyendo fallas de los sistemas internos. Los daños y las fallas pueden también extenderse a los alrededores de la estructura e incluso implicar al medioambiente local. (NTC 4552-1, 2022)

Efectos del rayo en una estructura

La Tabla 1 indica los efectos del rayo en diferentes tipos de estructura. (NTC 4552-1, 2022)

Tabla 1. Efectos del rayo en estructuras típicas.

Tipo de estructura según su función y/o su contenido	Efectos del rayo
Viviendas	Fallas de aislamiento en instalaciones eléctricas, fuego y daños materiales Daños limitados normalmente a los objetos expuestos al punto de impacto o al paso de la corriente de rayo Fallo de los equipos y sistemas eléctricos y electrónicos instalados.
Industria	Efectos adicionales en función del contenido de las fábricas, en un rango que va desde años menores hasta daños inaceptables y pérdida de la producción

Refinería	Incendio y mal funcionamiento de la planta con consecuencias perjudiciales para el medioambiente local global
-----------	---

Fuente: adaptado de (NTC 4552-1, 2022).

Fuentes y tipos de daños en una estructura

La corriente del rayo es la causa del daño. En función de la situación del punto de impacto respecto a la estructura considerada, deben tomarse en consideración las situaciones siguientes:

S1: Descargas directas sobre la estructura pueden producir, daños mecánicos inmediatos, fuego, explosiones causadas por el propio arco del plasma caliente del rayo; por la corriente, que produce calentamiento óhmico de los conductores (conductores sobrecalentados), o por la carga eléctrica, que produce erosión por arco (fusión del metal)

S2: Descargas cercanas a la estructura pueden producir, fallos o mal funcionamiento de los sistemas internos debido al impulso electromagnético del rayo.

S3: Descargas directas a las líneas conectadas a la estructura pueden producir, fuego y/o explosiones producidas por sobretensiones y corrientes de rayo transmitidas a través de los servicios conectados a la estructura, lesiones a los seres vivos por choque eléctrico debido a las tensiones de contacto en el interior de la estructura.

S4: Descargas en las proximidades de las líneas conectadas a la estructura pueden producir, fallos a mal funcionamiento de los sistemas internos, debido a las sobretensiones transmitidas a través de las líneas conectadas a la estructura.

En conclusión, el rayo puede producir tres tipos básicos de daños:

D1: Lesiones a seres vivos por choque eléctrico debido a las tensiones de paso y de contacto

D2: daños físicos (fuego, explosión, destrucción mecánica, emanación química), producidos por los efectos de la corriente del rayo, incluyendo chispas.

D3: fallo de los sistemas internos debido al impulso electromagnético del rayo (NTC 4552-1, 2022)

Tipos de pérdidas

Cada tipo de daño relevante para la estructura a proteger, solo en combinación con otros puede producir diferentes tipos de pérdidas.

Se consideran los siguientes tipos de pérdidas, que pueden aparecer como consecuencia de los daños relativos a la estructura:

L1: pérdida de vida humana incluyendo lesiones permanentes

L2: pérdida de servicio para el público

L3: pérdida de patrimonio cultural

L4: pérdida de valor económico

Las pérdidas L1, L2 y L3 pueden considerarse como pérdidas de valor social, mientras que la L4 se puede considerar como pérdida puramente económica.

La relación entre las fuentes de los daños, los tipos de daños y las pérdidas se indica en la Tabla 2. (NTC 4552-1, 2022)

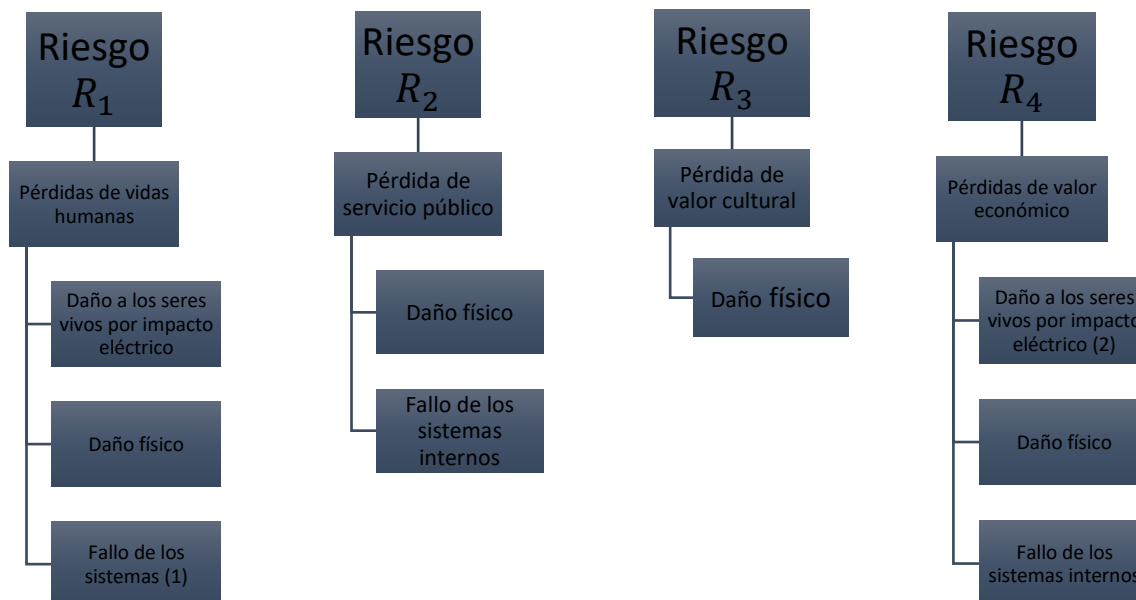
Tabla 2. Daños y pérdidas de una estructura según el punto de impacto del rayo.

Punto de impacto	Fuente del daño	Tipo de daño	Tipo de pérdida
En la estructura	S1	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
Cerca de la estructura	S2	D3	L1 ^b , L2, L4
Línea conectada a la estructura	S3	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
Cerca de una línea	S4	D3	L1 ^b , L2, L4

^a Solo para propiedades en las que puede haber pérdida de animales.
^b Sólo para estructuras con riesgo de explosión y para hospitales u otras estructuras en las que el fallo de los sistemas pone inmediatamente en peligro la vida humana

Fuente: adaptado de (NTC 4552-1, 2022).

En la Figura 1 se relacionan los tipos de pérdidas con los tipos de daños y sus correspondientes riesgos

Figura 1. Tipo de pérdida y sus riesgos correspondientes resultante de los diferentes tipos de daños.

- (1) solo para hospitales o en otras estructuras en las que el fallo de los sistemas internos pone en riesgo inmediato la vida humana
- (2) solo en propiedades en las que pueden perderse animales.

Fuente: adaptado de (NTC 4552-1, 2022).

Necesidad de la protección contra el rayo

Debe evaluarse la necesidad de la protección contra el rayo de una estructura o de un servicio, con el fin de reducir las pérdidas de valor social L1, L2 y L3.

Con el fin de determinar la necesidad o no de la protección contra el rayo, debe llevarse a cabo una evaluación del riesgo. Deben tenerse en cuenta los siguientes tipos de riesgo, que corresponden a los tipos de pérdidas.

R_1 : riesgo de pérdida de vidas o lesiones permanentes en personas

R_2 : riesgo de pérdida de servicio para el público

R_3 : riesgo de pérdida de patrimonio cultural

Es necesaria la protección contra el rayo si el riesgo $R(R_1 a R_3)$ es superior al riesgo tolerable R_T .

$$R > R_T$$

En este caso, deben aplicarse medidas de protección con el fin de reducir el riesgo $R(R_1 a R_3)$ al valor de riesgo tolerable R_T .

$$R \leq R_T$$

Si en el objeto a proteger puede aparecer más de un tipo de pérdida, la condición $R \leq R_T$ debe cumplirse para cada tipo de pérdida (L1, L2 y L3). (NTC 4552-1, 2022).

Justificación económica de la protección contra el rayo

Además de la valoración de la necesidad de la protección contra el rayo de la estructura a proteger, puede ser útil la valoración de los beneficios económicos que producen las medidas de protección que tienen como fin reducir las pérdidas económicas L_4 .

En este caso, debería evaluarse el riesgo R_4 de pérdidas de valor económico. La evaluación del riesgo R_4 permite el cálculo de las pérdidas económicas con y sin las medidas de protección adoptadas.

El costo de la protección del rayo es eficaz si la suma del costo de las pérdidas con medidas de protección, C_{RL} , y el costo de las medidas de protección, C_{PM} es inferior al costo total de las pérdidas sin medidas de protección, C_L . (NTC 4552-1, 2022).

$$C_{RL} + C_{PM} < C_L$$

Niveles de protección contra el rayo (NPR)

Se introducen cuatro niveles de protección contra el rayo (I a IV). Para cada NPR se fija un conjunto de parámetros máximos y mínimos de la corriente del rayo dentro de los cuales lo más relevantes para el presente trabajo son los siguientes:

Tabla 3. Valores mínimos de los parámetros del rayo y radio de la esfera rodante asociada.

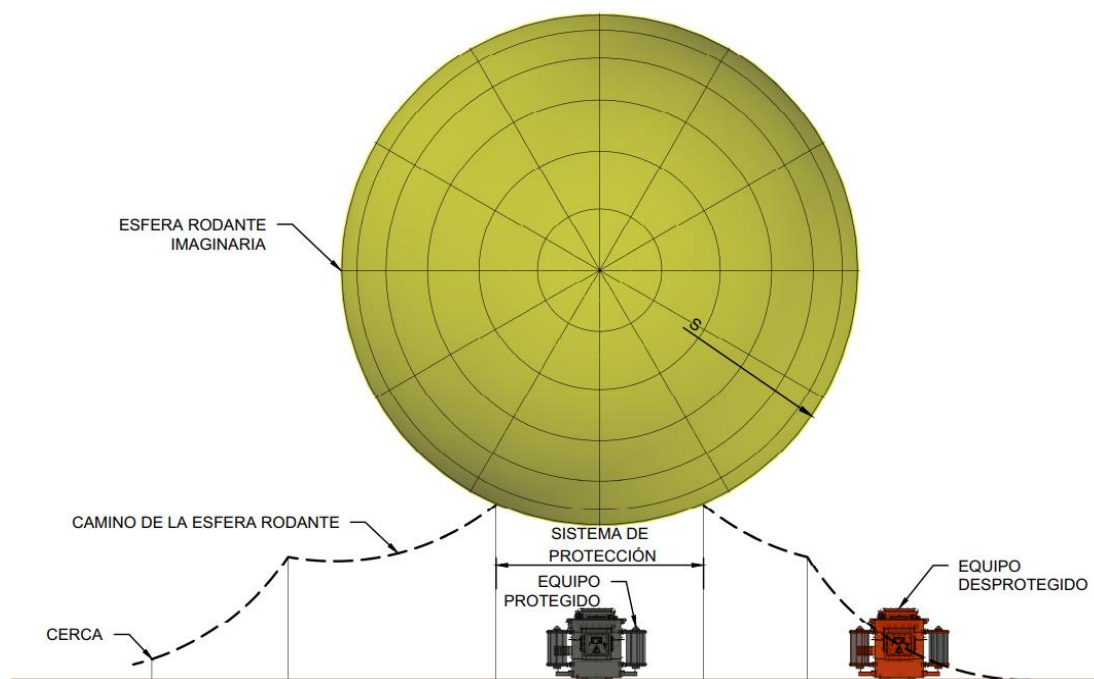
Criterios de intercepción			NPR			
	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Valor pico mínimo de la corriente	I	kA	3	5	10	10
Radio de la esfera rodante	S	m	20	30	45	60

Fuente: adaptado de (NTC 4552-1, 2022).

Esfera Rodante

El uso del método de la esfera rodante implica hacer rodar una esfera imaginaria de radio S sobre la superficie de una subestación. La esfera rueda hacia arriba y sobre mástiles pararrayos, cables de protección, cercas de subestaciones y otros objetos metálicos conectados a tierra que pueden proporcionar protección contra rayos. Se dice que un equipo está protegido de un golpe directo si permanece debajo de la superficie curva de la esfera en virtud de que la esfera está elevada mediante cables blindados u otros dispositivos. Los equipos que toquen la esfera o penetren en su superficie no están protegidos. El concepto básico se ilustra en la Figura 2 (IEEE STD 998, 2012)

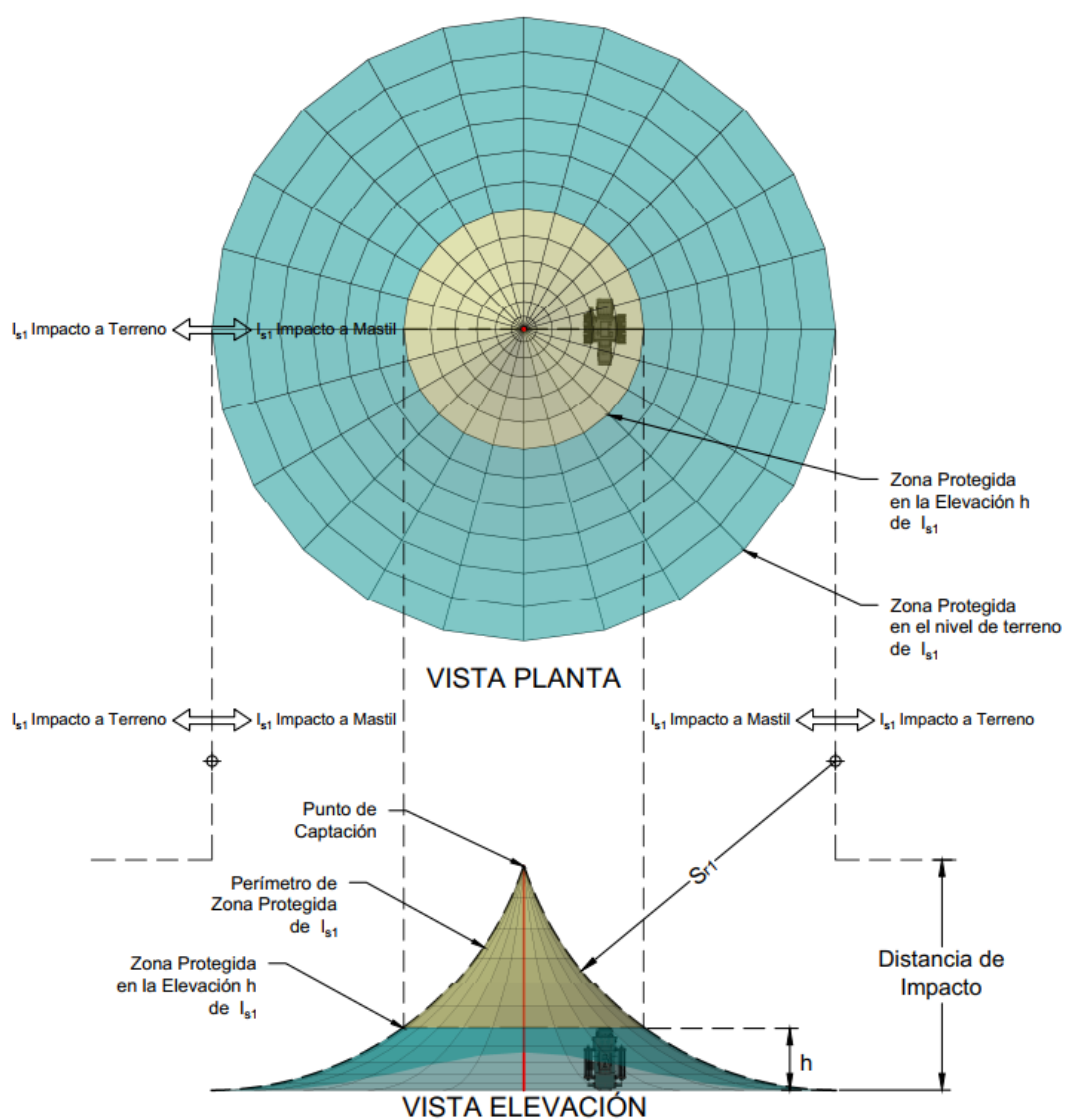
Figura 2. Principio de la esfera rodante con múltiples puntos de captación.



Fuente: Adaptada de (IEEE STD 998, 2012).

Para la protección contra la corriente de impacto I_{s1} se debe considerar primero un mástil único. El modelo geométrico de un mástil de protección, el plano de tierra, la distancia de impacto y la zona de protección se muestran en la Figura 3. En la Figura 3 se muestra un arco de radio S_{r1} que toca el mástil de protección y el plano de tierra. En este modelo, se espera que todos los puntos por debajo de este arco estén protegidos con la corriente de impacto I_{s1} . (IEEE STD 998, 2012)

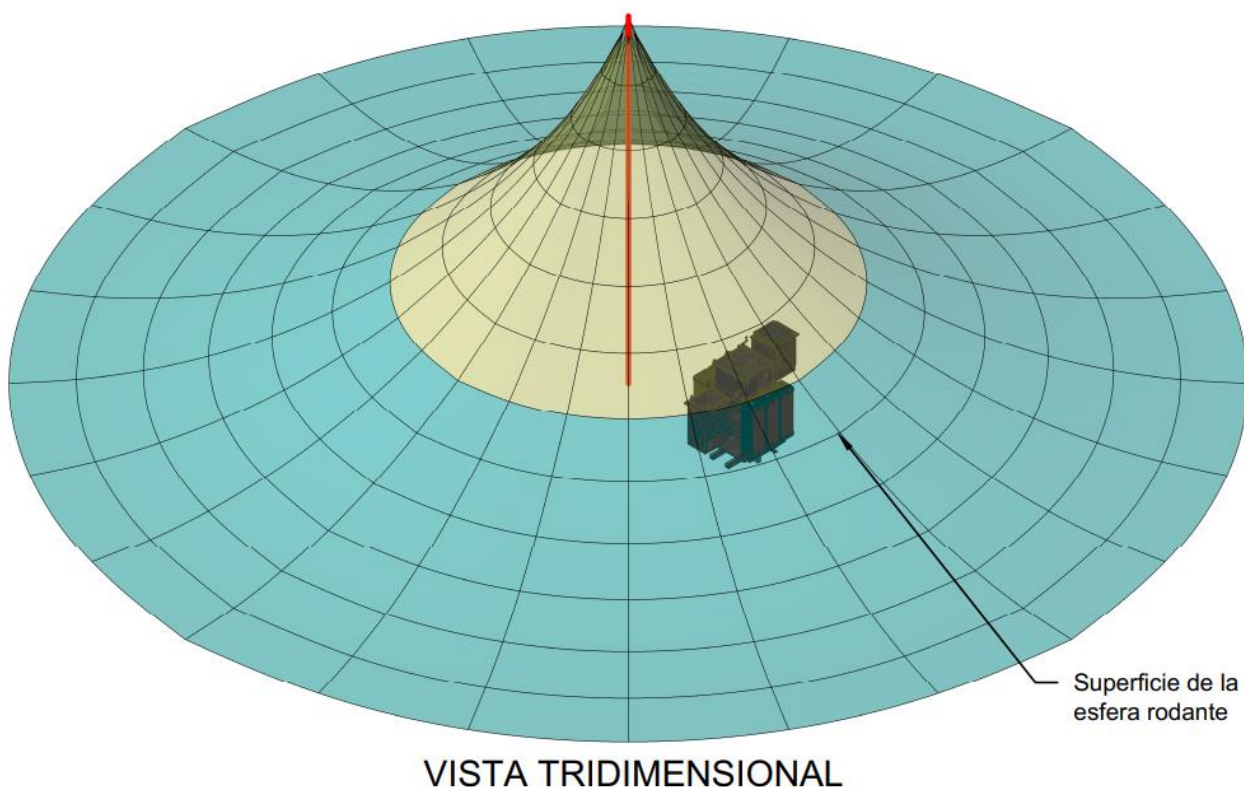
Figura 3. Protección del mástil contra la corriente de impacto I_{s1} .



Fuente: Adaptada de (IEEE STD 998, 2012).

Se dibuja un arco de radio S_r , con su centro ubicado en la línea discontinua vertical, de modo que el radio apenas toque el mástil. El camino de la esfera rodante que resulta en la corriente de impacto I_{s1} y que descienden fuera de la línea vertical tocaran el suelo. Si la altura del mástil es inferior a S_{r1} , la zona de protección se reducirá. A medida que la esfera rueda alrededor del mástil, se define una superficie de protección tridimensional como se muestra en la Figura 4. Es este concepto el que ha llevado al nombre de esfera rodante para aplicaciones simplificadas del modelo electrogeométrico. (IEEE STD 998, 2012)

Figura 4. Modelo electrogeométrico vista tridimensional.



Fuente: Propia.

Múltiples electrodos de captación

Una planta industrial puede llegar a ser mucho más compleja. Pueden tener varios niveles de voltaje y pueden utilizar una combinación de cables de guarda y pararrayos en una disposición tridimensional.

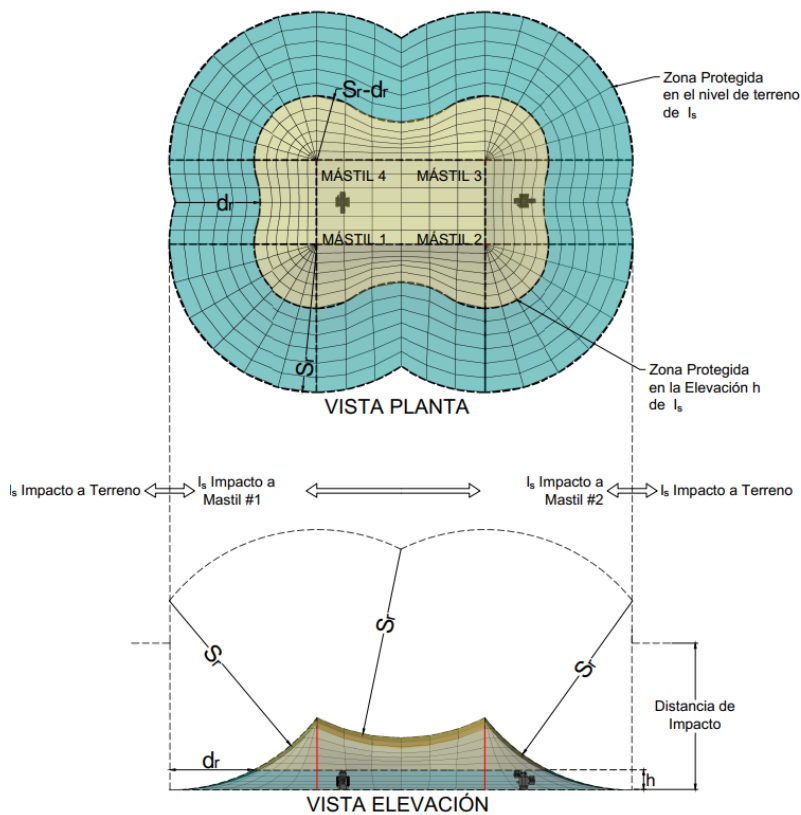
Los conceptos anteriores se pueden aplicar a múltiples mástiles de protección. La figura 5 muestra esta aplicación considerando cuatro mástiles de protección en una disposición de mástiles de protección múltiple. La zona protegida entre los mástiles está definida por un arco de radio S con centro en la intersección de los dos arcos discontinuos. La zona protectora puede visualizarse nuevamente como la superficie de una esfera con radio S , que se hace rodar hacia un mástil hasta tocar el mástil, luego se enrolla hacia arriba y sobre el mástil de manera que quede sostenida por los mástiles. Las líneas discontinuas serían el lugar geométrico del centro de la esfera a medida que rueda por la superficie de la subestación. Utilizando el concepto de esfera rodante y el radio adecuado, se puede determinar el área protegida de una subestación completa. Esto se puede aplicar a cualquier grupo de mástiles de protección de diferente altura. La Figura 6 muestra la aplicación de una combinación entre mástiles y cable de guarda. (IEEE STD 998, 2012)

$$d_r = \sqrt{2S_r h - h^2} \quad (1)$$

Donde:

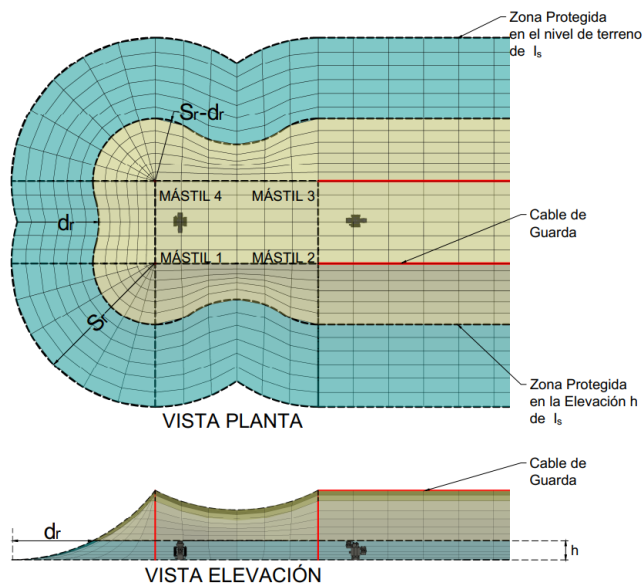
$$\begin{aligned} d_r &= \text{Radio de caída entre esferas} \\ S_r &= \text{Radio de la esfera rodante} \\ h &= \text{Altura} \end{aligned}$$

Figura 5. Protección de mástil en múltiples posiciones para corriente de impacto I_s .



Fuente: Adaptada de (IEEE STD 998, 2012).

Figura 6. Protección mediante cables de guarda y mástiles.

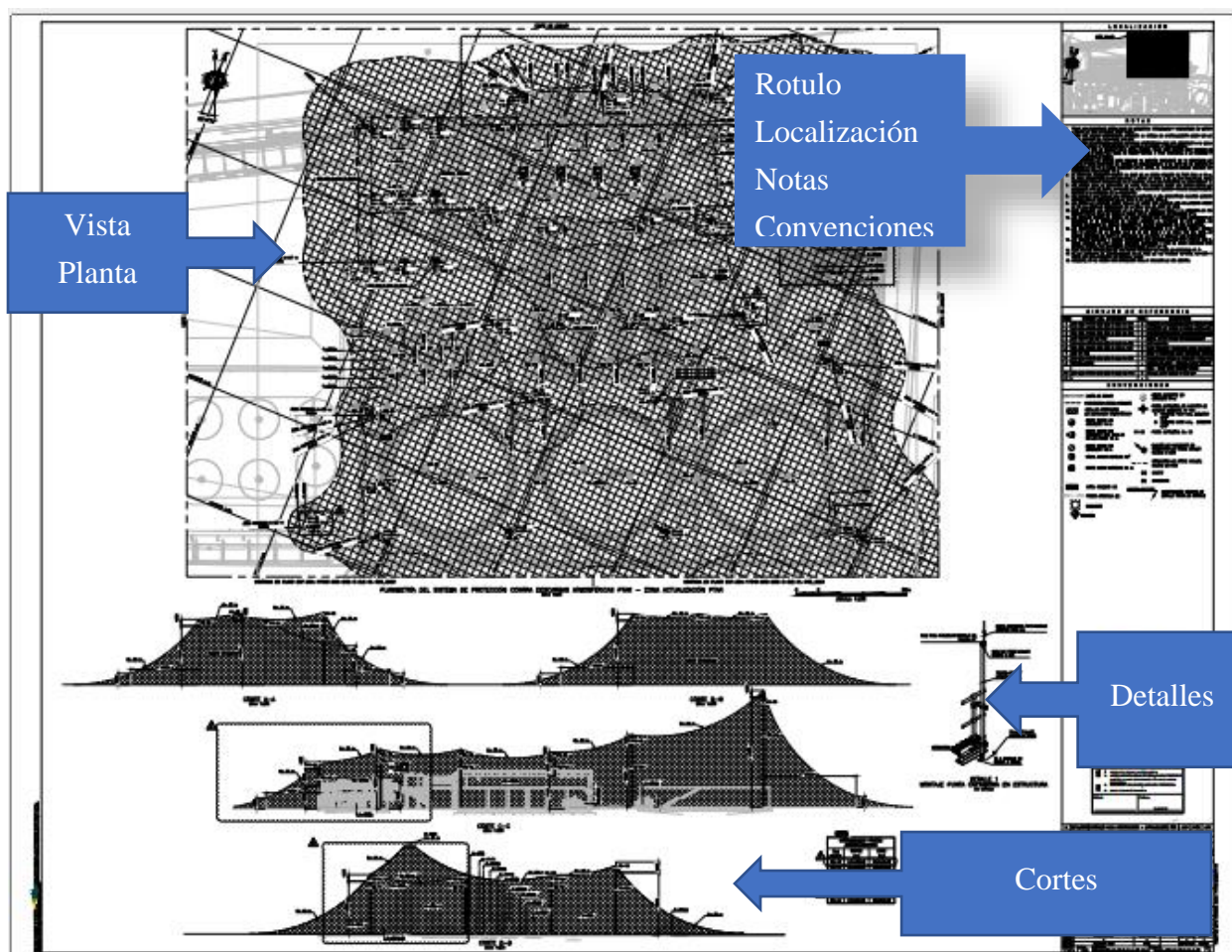


Fuente: Adaptada de (IEEE STD 998, 2012).

Planimetría sistema de protección contra descargas atmosféricas

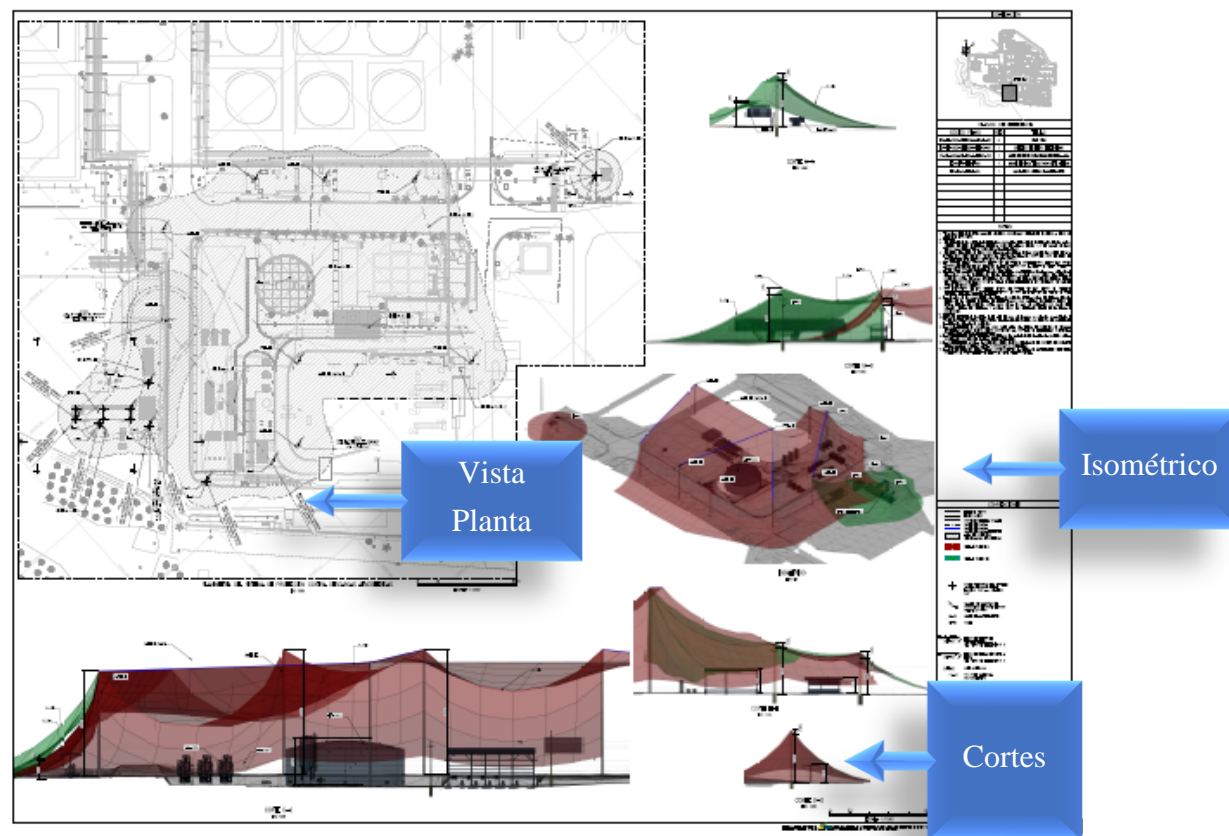
El planimétrico del sistema de protección contra descargas atmosféricas es un dibujo técnico que detalla la ubicación y distribución de todos los componentes de un sistema de protección contra rayos. Este incluye la posición de los puntos de captación tales como los pararrayos y cables de guarda. El objetivo del planimétrico es garantizar que todos los elementos estén correctamente colocados y conectados según el método electrogeométrico de la esfera rodante, facilitando tanto su instalación como su posterior mantenimiento.

Figura 7. Planimetría utilizando método de esfera rodante utilizando 2 dimensiones.



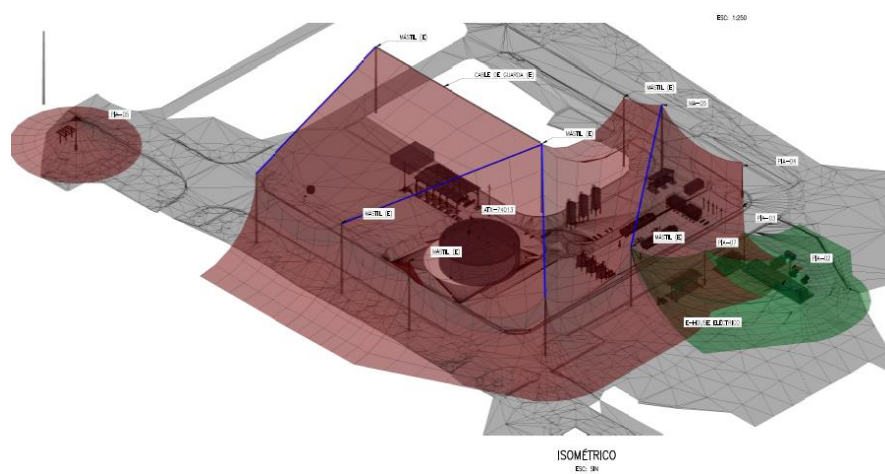
Fuente: Propia

Figura 8. Planimetría utilizando método de esfera rodante utilizando 3 dimensiones.



Fuente: Propia

Figura 9. Vista isométrica sistema de apantallamiento de una planta industrial a campo abierto.



Fuente: Propia

Marco legal

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, (2024) RETIE, en el apartado “1.5.1.3 Factores de riesgo eléctrico más comunes, Tabla 1.5.1.3.a. RAYOS”. nos indica que todas las instalaciones eléctricas tienen implícito un riesgo. El tratamiento preventivo de la problemática de los rayos son la utilización de pararrayos, bajantes de puestas a tierras, apantallamientos, además de suspender actividades de alto riesgo, cuando se tenga personal al aire libre.

La norma NTC 4552-1 (2022) sobre Protección contra el rayo, Parte 1: Principios generales, manifiesta que no existen dispositivos o métodos capaces de modificar los fenómenos atmosféricos naturales hasta el punto de impedir las descargas de los rayos. Los impactos de rayo son peligrosos para las personas, estructuras e instalaciones. Por esta razón son esenciales las medidas de protección contra el rayo, además proporciona una serie de conceptos claves para abordar los riesgos asociados con los efectos del rayo en estructuras, equipos y sistemas eléctricos. Al establecer principios, criterios y directrices para el diseño, instalación, inspección y mantenimiento de sistemas de protección contra el rayo, esta norma busca garantizar la seguridad de las personas, la preservación de los bienes y la integridad de los sistemas eléctricos. Al dar cumplimiento a las especificaciones de esta norma, se puede reducir de manera efectiva el impacto potencialmente devastador del rayo, promoviendo entornos más seguros y protegidos contra este fenómeno natural, dando lugar a la segunda parte de la NTC 4552-2 (2023) donde se evalúan y gestionan los riesgos en una estructura que se tienen por la acción de las descargas atmosféricas sobre estructuras. Define procesos que identifican los impactos del rayo y plantea estrategias de protección seguras teniendo en cuenta diferentes factores como el entorno, la economía y las estructuras.

La norma NTC 4552-3 (2023) se enfoca en la protección de estructuras contra daños físicos mediante sistemas de apantallamiento. Asimismo, aborda la prevención de lesiones a seres vivos debido a tensiones de contacto y de paso cerca de estos sistemas. Establece pautas para la selección de materiales de construcción apropiados, el tipo de aislamiento entre los terminales de captación, y la realización periódica de mantenimientos e inspecciones en los sistemas de protección contra descargas atmosféricas.

La norma IEEE STD 998 (2012) proporciona directrices para el diseño de sistemas de protección contra rayos en subestaciones eléctricas, incluyendo el método de la esfera rodante. Este método emplea una esfera imaginaria de un radio específico que se desplaza alrededor de las estructuras para identificar puntos vulnerables a los rayos. Los pararrayos y dispositivos de protección se colocan donde la esfera toca las estructuras, asegurando que los componentes críticos queden dentro de un área protegida. La norma también detalla metodologías de evaluación de riesgos y criterios para la selección y dimensionamiento de los componentes del sistema de apantallamiento, garantizando una protección eficaz y conforme a las normativas de seguridad.

Caso de estudio

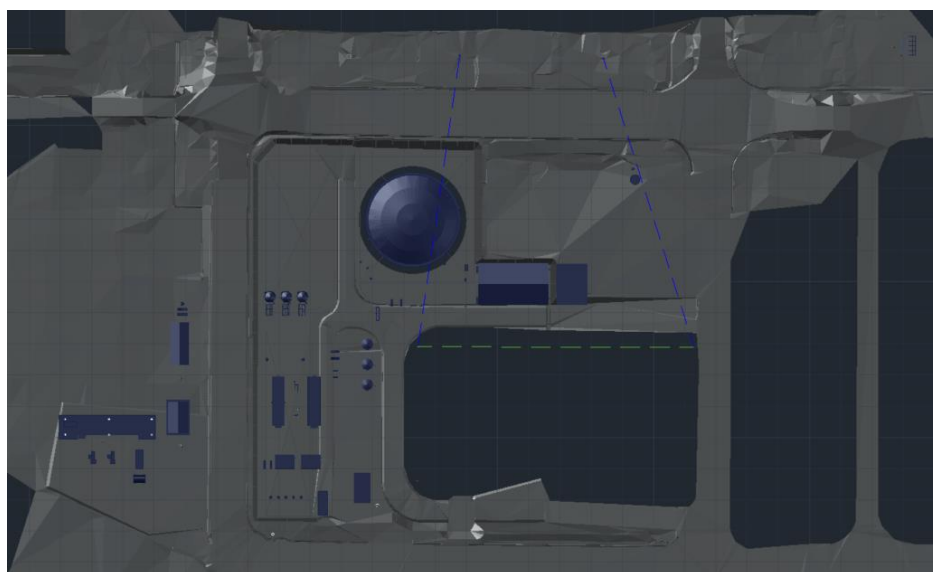
El aplicativo fue implementado en una planta industrial que cuenta con unos equipos que son esenciales para su operación, tal como se muestra en la figura 10. Entre estos, los equipos de mayor altura se relacionan en la tabla 4, y son el punto de partida para asegurar su protección efectiva contra las descargas atmosféricas. Para ello, se ha optado por la implementación de dos sistemas de captación de rayos: las puntas captadoras y los cables de guarda.

Tabla 4. Listado de equipos relevantes.

Equipo	Altura promedio a proteger
Tanque de almacenamiento	10 m
Casetas	4 m
Cuarto eléctrico	5 m
Filtros	12 m

Fuente: Propia.

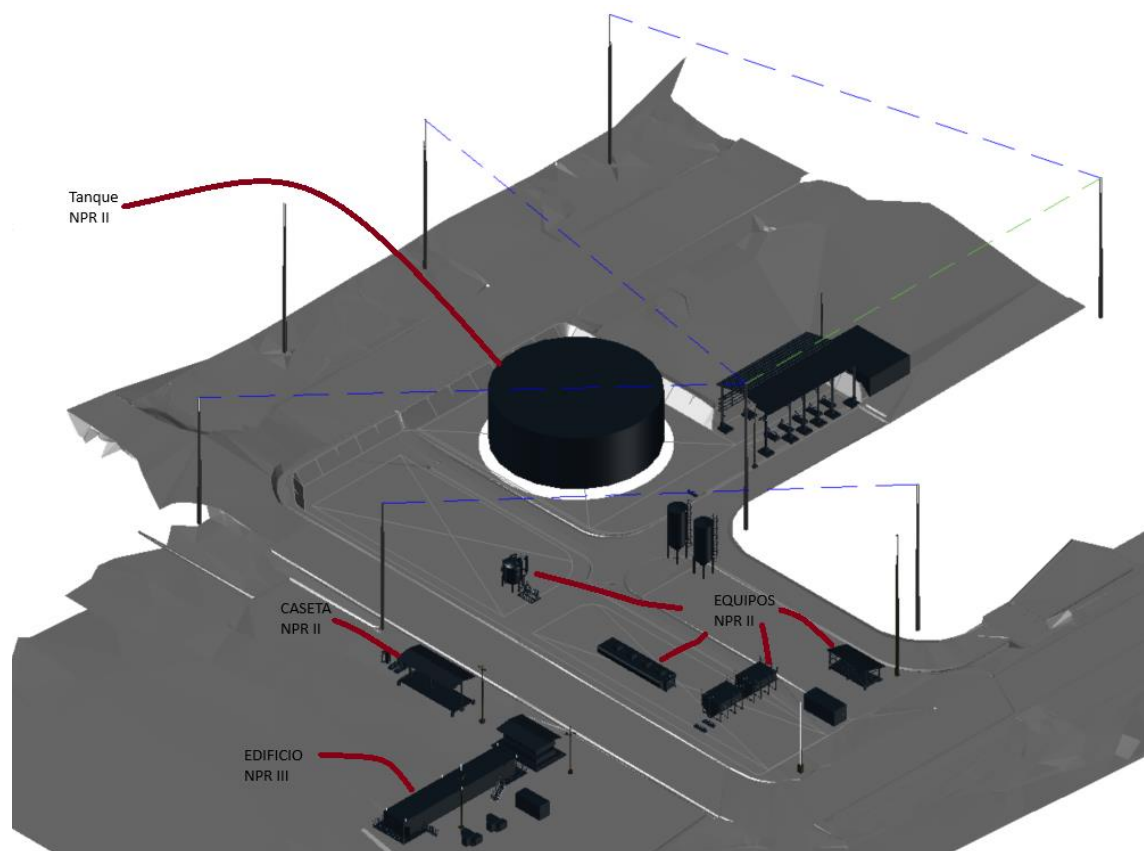
Figura 10. Planta industrial.



Fuente: Propia.

Tras el análisis de los equipos en la planta industrial, se ha identificado que esta se divide en dos zonas con niveles de riesgo II y III, tal como se muestra en la figura 11. Con base en esta información, se procederá a elaborar estudio de apantallamiento, tomando en cuenta las características específicas de cada zona para garantizar una protección eficaz de los equipos.

Figura 11. Niveles de protección para los equipos de la planta.



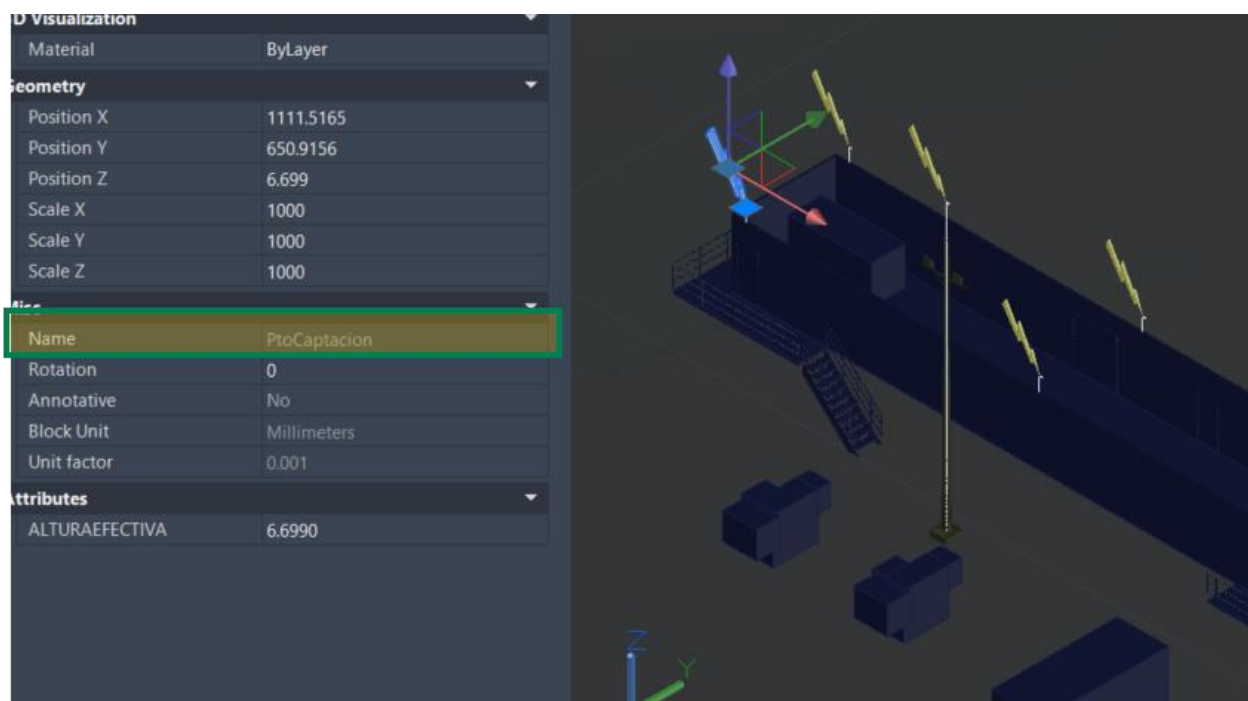
Fuente: Propia.

Análisis de resultados

Bloque “PtoCaptacion”

Una vez se tengan los radios de protección definidos de acuerdo con los niveles de riesgo se empiezan a definir los puntos de captación mediante el bloque creado “PtoCaptacion” como se indica en la figura 12 para que el aplicativo lo reconozca y realice el apantallamiento 3D.

Figura 12. Bloque “PtoCaptacion”.

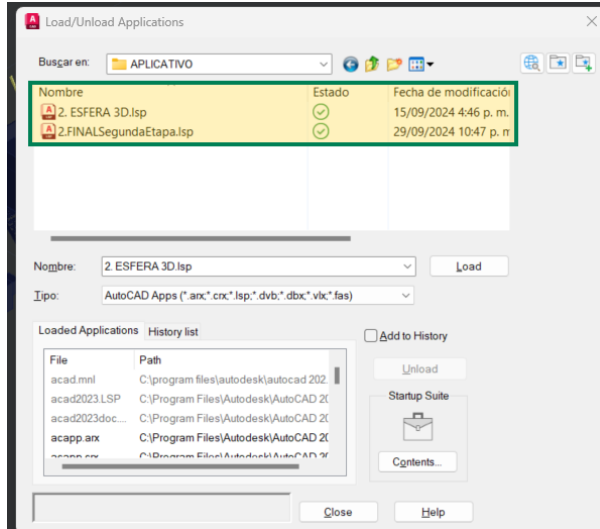


Fuente: Propia

Aplicativos LISP de esfera rodante

Se cargan los dos aplicativos desarrollados “2.ESFERA 3D.lsp” y “2.FINALSegundaEtapa.lsp” en AutoCAD mediante el comando “APPLOAD” tal como se muestra en la figura 13, para dar paso a utilizar los comandos “ESFERARODANTE3D” y “ROTESF”.

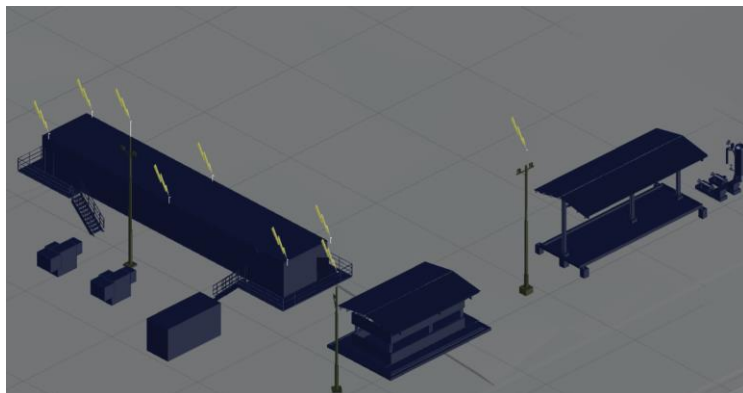
Figura 13. Aplicativos



Fuente: Propia

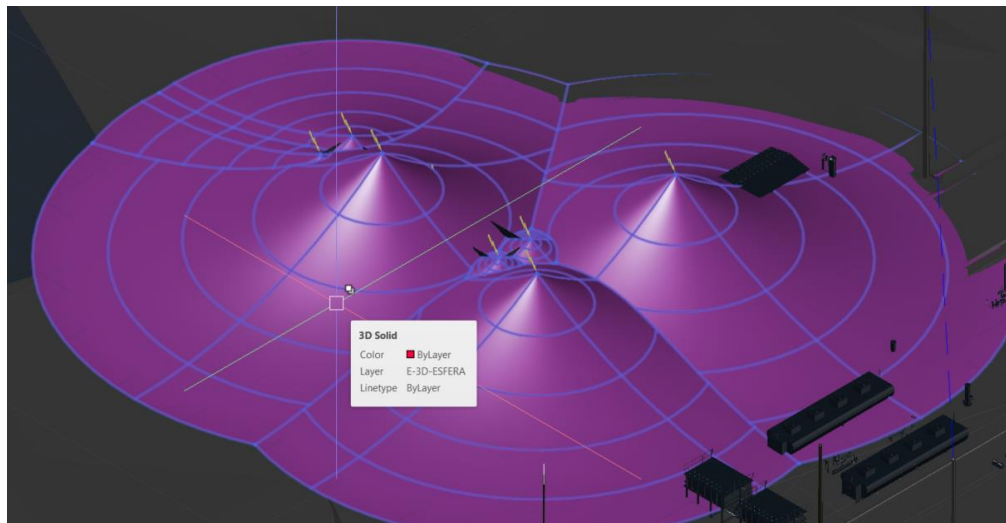
La figura 14 ilustra el proceso inicial en el que, utilizando el comando "ESFERARODANTE3D", se asigna automáticamente el radio de la esfera según el nivel de protección establecido. El sistema detecta de manera automática los bloques "PtoCaptacion" y simula el movimiento de la esfera rodante, que gira alrededor del punto de captación conforme a la ecuación (1). Este procedimiento puede observarse con mayor detalle en la figura 15, donde se muestra cómo la esfera sigue su trayectoria en función de los parámetros definidos.

Figura 14. Comando “ESFERARONDATE3D”



Fuente: Propia

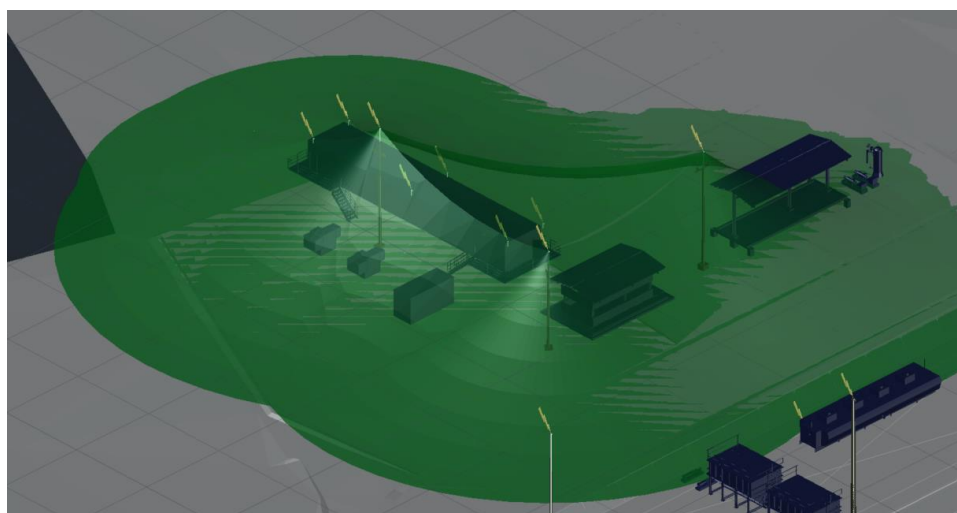
Figura 15. Esfera rodante en puntos de captación.



Fuente: Propia

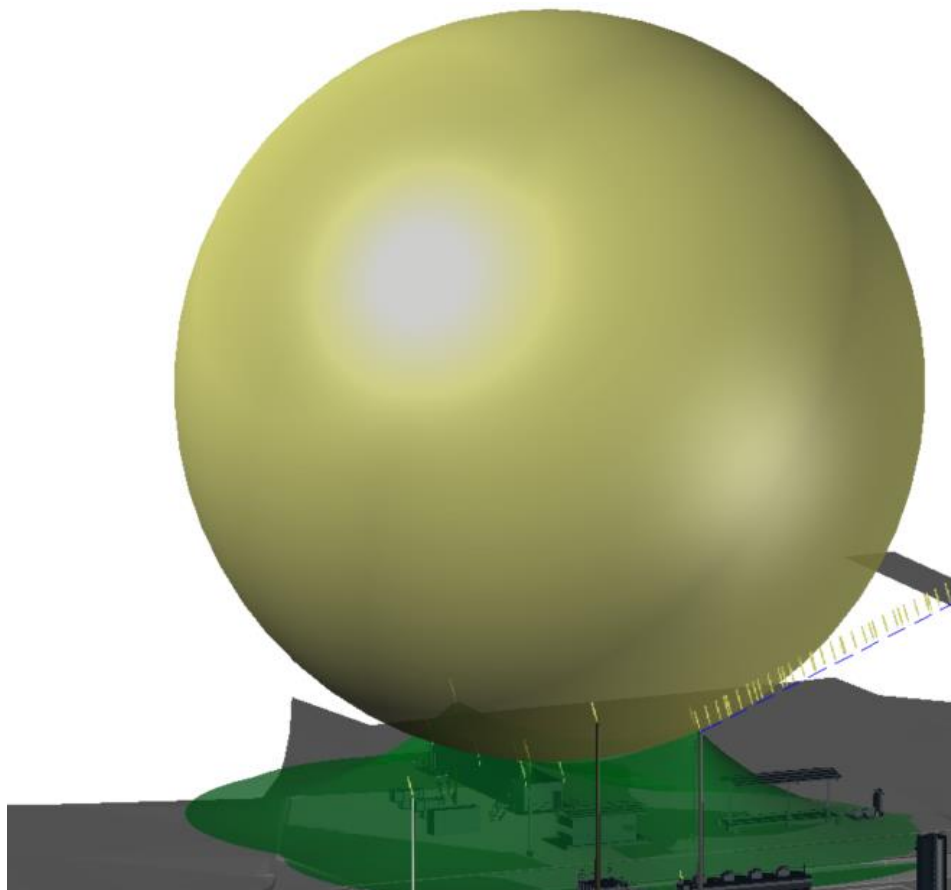
Finalmente, se emplea el comando "ROTESF" para hacer rodar la esfera entre tres puntos de captación, con el propósito de completar la cobertura de protección y verificar que los equipos estén adecuadamente protegidos. Este proceso asegura que los equipos queden dentro del área de protección definida. Los resultados y el objetivo del comando pueden apreciarse en las figuras 16 y 17, donde se muestra cómo se logra dicha cobertura.

Figura 16. Esfera rodante final.



Fuente: Propia

Figura 17. Esfera rodante tres puntos de captación.

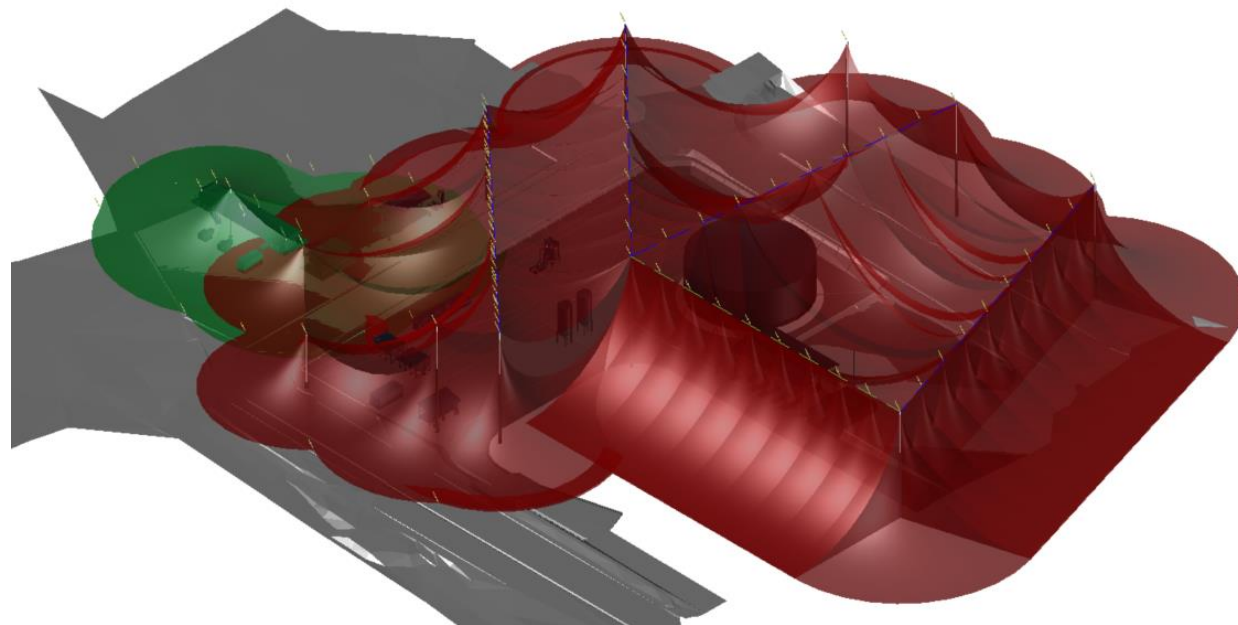


Fuente: Propia

Finalmente, en la figura 18 se analiza el tramo restante de la planta utilizando los comandos desarrollados por los aplicativos para completar el recorrido de la esfera rodante. Este análisis permite finalizar la cobertura total de la planta, asegurando que todas las áreas queden protegidas de manera efectiva.

Protección contra descargas atmosféricas

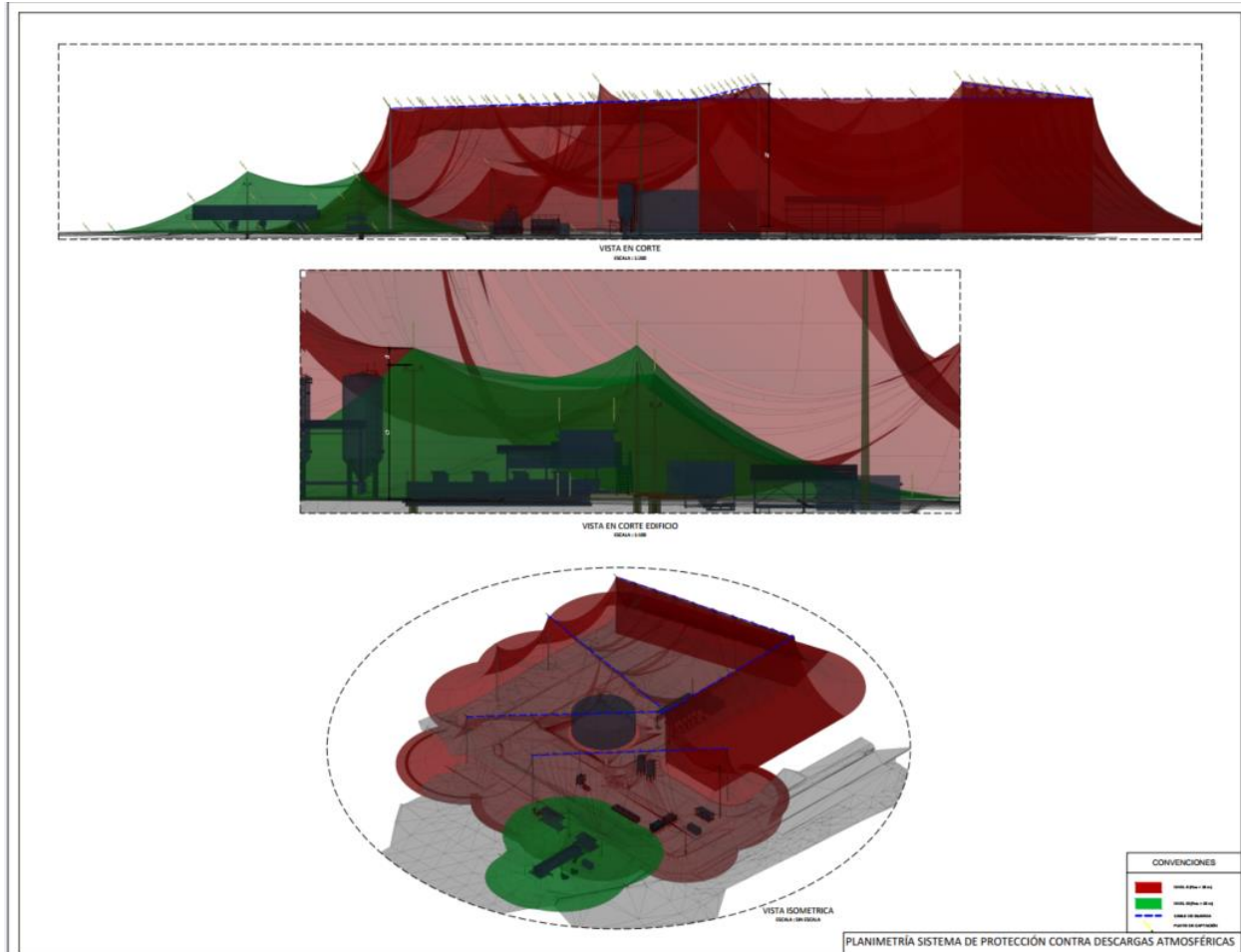
Figura 18. Sistema de apantallamiento final de planta industrial.



Fuente: Propia

Una vez implementado el sistema de protección contra descargas atmosféricas en 3D, se valida el resultado final, confirmando que se ha optimizado tanto la calidad como el tiempo de ejecución. Con el diseño finalizado, el proyecto queda listo para la elaboración de la planimetría correspondiente, que será presentada al cliente final.

Figura 19. Planimetría Sistema de Protección Contra Descargas Atmosféricas.



Para ver plano ver enlace [Planimetría SIPRA](#)

Fuente: Propia

Conclusiones

Del análisis del comportamiento del aplicativo en un caso real, se concluye que este optimiza significativamente el tiempo de ejecución, reduce la probabilidad de errores y mejora la precisión en la simulación de la esfera rodante, garantizando así la protección efectiva tanto de los equipos como del personal. No obstante, como mejora futura, se sugiere desarrollar un aplicativo específico para el análisis del cable de guarda, ya que en el caso estudiado este proceso consumió más tiempo del esperado al realizarse de manera semi automatizada. La implementación de dicho aplicativo permitiría reducir notablemente el tiempo de ejecución y automatizar pasos que antes costaban más trabajo, permitiendo un análisis más detallado y eficiente de la ubicación de los puntos de captación dando así, una mayor calidad del producto final, al optimizar no solo el tiempo, sino también la precisión en la protección contra descargas atmosféricas.

Referencias bibliográficas

Michael A. Sargent (1972) Monte Carlo Simulation of the Lightning Performance of Overhead Shielding Networks of High Voltage Stations. Obtenido de IEEE Xplore: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4074901/authors#authors>

Max G. Molina Bustamante (1979) *Apantallamiento de subestaciones. Diseño y evaluación mediante métodos digitales*. Obtenido de Escuela Politécnica Nacional: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5060>
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5060/1/T834.pdf>

IEEE STD 998 (2012) *IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations* Obtenida de IEEE Xplore: <https://ieeexplore-ieee-org.bepm.basesdedatosezproxy.com/document/6514042>

Javier Herrera Murcia, Camilo Younes Velosa, Leonardo Porras (2017) *Variation of lightning peak current parameter as a function of cloud-to-ground lightning flash density in Colombia* Obtenido de IEEE Xplore: <https://ieeexplore-ieee-org.bepm.basesdedatosezproxy.com/document/8116948>

Luis Eduardo Morales Ventura (2019) *Desarrollo de software, para el cálculo con vista gráfica del apantallamiento en subestación eléctrica aislada en aire, utilizando el método electrogeométrico, según la Norma IEEE STD998 revisión 2012*. Obtenido de Universidad de San Carlos de Guatemala: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/13765/>
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/13765/1/Luis%20Eduardo%20Morales%20Ventura.pdf>

Jhon Fredy Correa Lagos (2021) *Análisis y diseño de sistemas de puesta a tierra y sistema integrado de protección contra rayos para subestación de 34,5 kv del municipio de Guacamayas*. Obtenida de Universidad Antonio Nariño: <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5973>
http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/5973/4/2021_JhonFredyCorreaLagos.pdf

NTC 4552-1 (2022) *Protección contra el rayo. Parte 1: Principios generales* Obtenido de ICONTEC: <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-proteccion-contra-el-rayo-parte-1-principios-generales-ntc4552-1-2022.html>

NTC 4552-2 (2023) *Protección contra el rayo. Parte 2: Evaluación del riesgo* Obtenido de ICONTEC: <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-proteccion-contra-el-rayo-parte-2-evaluacion-del-riesgo-ntc4552-2-2023.html>

NTC 4552-3 (2023) *Protección contra el rayo. Parte 3: Daños físicos a estructuras y riesgos a la vida* Obtenido de ICONTEC: <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-proteccion-contra-el-rayo-parte-3-danos-fisicos-a-estructuras-y-riesgos-a-la-vida-ntc4552-3-2023.html>

Paguay Llamuca, Alex Ivan (2023). *Desarrollo de un algoritmo para el dimensionamiento de protección contra descargas atmosféricas en edificaciones basado en el método de la esfera rodante*. Obtenido de Universidad Técnica de COTOPAXI: <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11253>
<https://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/11253/1/PI-002622.pdf>

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. (2024). *RETIE*. Bogota D.C.