



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE PERFILES DE PROTECCIÓN
DE PARARRAYOS EN PARQUES EÓLICOS Y REDES
INDUSTRIALES

Que para obtener el Grado de
Maestro En Ingeniería Eléctrica

Presenta
Ing. Alan David Mendoza García
G10070729

Director de Tesis
Dr. Gastón Hernández Martínez

Director de Tesis
M.C. Hermenegildo Cisneros Villegas

Cd. Madero, Tamaulipas

Junio 2020



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cd. Madero, Tams., a 17 de Junio de 2020

OFICIO No.: U.036/20
ÁREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN
DE TESIS

ING. ALAN DAVID MENDOZA GARCÍA
No. DE CONTROL G10070729
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"SOFTWARE PARA EL CALCULO DE PERFILES DE PROTECCIÓN DE PARARRAYOS EN PARQUES EOLICOS Y REDES INDUSTRIALES"

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

| | | |
|--------------------|------|--------------------------------|
| PRESIDENTE: | DR. | GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ |
| SECRETARIO: | M.C. | HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS |
| VOCAL: | M.C. | RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ |
| SUPLENTE: | DR. | PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE |
| DIRECTOR DE TESIS: | DR. | GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ |
| CO-DIRECTOR: | M.C. | HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS |

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Por mi patria y por mi bien"

DR. JOSÉ AARÓN MELO BANDA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p.- Archivo

JAMB 'MIE 'RCG**



Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios y las pequeñas cosas que hacemos para que se mueva esta gran maquinaria que se llama vida.

El mejor de los agradecimientos es para mis padres, quienes nunca dejaron de confiar en mí y me apoyaron en todas las etapas la vida. Los amo.

Agradezco a mi prometida y mi futura esposa Alondra, por apoyarme e instarme a seguir adelante desde que la conocí en cada uno de los aspectos que se relacionan a este proyecto.

Un agradecimiento muy especial para CONACYT SENER, por haberme dado un buen apoyo durante la duración del posgrado en el instituto.

De manera muy especial agradezco a mi Director de tesis, Dr. Gastón Hernández, por su apoyo desde antes de haber entrado al posgrado y durante todas las etapas que llevamos en el proyecto, compartir su conocimiento sin negación alguna.

A cuatro mis amigos que entramos juntos al posgrado y a los demás que conocí de los demás semestres estando dentro, los cuales hicieron más llevadero el tiempo en los salones de clase y laboratorio junto a comidas, anécdotas y risas.

Cerrando con broche de oro, agradezco a todos los maestros que me brindaron su conocimiento durante la estancia en la institución.

Dedicatoria

Este gran logro va dedicado a mis padres, por ellos luché día a día para hacer que se sientan orgullosos de tener un gran hijo, al que apoyan y que ese esfuerzo que tuvieron se siga recompensando aún más de lo que ya se tiene.

Este es un paso más hacia todos los logros que se avecinan más adelante.

Para ustedes queridos papás y por siempre, nunca dejemos de apoyarnos.

Los amo.

Contenido

Página

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Lista de Figuras..... | IV |
| Lista de Tablas..... | VII |
| Resumen..... | VIII |
| Abstract..... | VIII |
| Capítulo 1: Introducción..... | 1 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 2 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN..... | 2 |
| 1.3. OBJETIVO GENERAL..... | 3 |
| 1.4. OBJETIVO ESPECÍFICO..... | 3 |
| 1.5. HIPÓTESIS..... | 3 |
| 1.6. ALCANCES..... | 4 |
| 1.7. LIMITACIONES..... | 4 |
| 1.8. MARCO TEÓRICO..... | 5 |
| 1.8.1. Sistema Externo de Protección Contra Descargas Atmosféricas..... | 5 |
| 1.8.2. Puntas Captadoras..... | 6 |
| 1.8.2.1. Características..... | 7 |
| 1.8.3. Nivel Isoceraúnico..... | 8 |
| Capítulo 2: Antecedentes..... | 10 |
| 2.1. ANTECEDENTES..... | 11 |
| 2.2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS..... | 14 |
| 2.2.1. Características de las Descargas..... | 14 |
| 2.2.2. La Formación de las Tormentas..... | 15 |
| 2.2.3. El Fenómeno de los Rayos..... | 19 |
| 2.2.4. Principio de una Descarga..... | 20 |
| 2.2.5. Clasificación de los Rayos..... | 21 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.6. Parámetros Característicos de los Rayos..... | 24 |
| 2.2.7. Principales Efectos de los Rayos..... | 25 |
| 2.2.8. Tipos de Sobretensiones Transitorias Atmosféricas..... | 26 |
| 2.2.9. Modos de Propagación..... | 28 |
| 2.2.10. Consecuencias de las Sobretensiones Transitorias Atmosféricas..... | 29 |
| 2.3. NORMATIVIDAD..... | 30 |
| 2.3.1. Artículo 4.2 – Valoración de Riesgo..... | 30 |
| 2.3.2. Artículo 4.2.1 – Frecuencia de Rayos Directos a una Estructura..... | 31 |
| 2.3.3. Artículo 4.2.2 – Frecuencia Anual Permitida de Rayos Directos a una Estructura | 32 |
| 2.3.4. Artículo 4.2.3 – Área Equivalente de Captura | 33 |
| 2.3.5. Artículo 4.2.4 – Evaluación de la Necesidad de Protección..... | 38 |
| 2.3.6. Artículo 4.3 – Diseño del Sistema Externo de Protección SEPTE..... | 40 |
| 2.3.7. Artículo 4.3.2 – Terminales Aéreas..... | 40 |
| 2.3.8. Artículo 4.3.2.1 – Terminales Aéreas en SEPTE Aislado..... | 41 |
| 2.3.9. Artículo 4.3.2.2 – Terminales Aéreas en SEPTE No Aislado..... | 41 |
| 2.3.10. Artículo 4.3.2.3 – Número y Ubicación de Terminales..... | 41 |
| 2.3.11. Artículo 4.3.3.3.1 – Terminales Aéreas y Conductores de Bajada para un Sistema Externo de Protección SEPTE Aislado..... | 45 |
| 2.3.12. Artículo 4.3.3.3.2 - Terminales Aéreas y Conductores de Bajada para un Sistema Externo de Protección SEPTE no Aislado..... | 46 |
| 2.3.13. Artículo 4.4.1 - Unión Equipotencial..... | 47 |
| 2.3.14. Artículo 4.4.1.6 – Unión Equipotencial y Blindaje Electromagnético..... | 48 |
| 2.3.15. Artículo 5.1 – Sistema de Protección Contra Descargas Atmosféricas de Estructuras con Peligro de Fuego y/o Explosión – Generalidades..... | 50 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.16. Artículo 5.2 – Instalaciones que Contienen Material Solido con Peligro de Fuego y/o Explosión | 51 |
| 2.3.17. Artículo 5.3 – Contenedores para Material Líquido o Gaseoso con Peligro de Fuego y/o Explosión | 51 |
| 2.3.18. Artículo 5.4 – Instalaciones Diversas con Peligro de Fuego y Explosión..... | 53 |
| 2.3.19. Artículo 5.4.1 – Áreas de Procesos..... | 53 |
| 2.3.20. Artículo 5.4.3 – Elementos de Gran Altura..... | 54 |
| 2.3.21. Artículo 5.4.4 – Edificios Administrativos..... | 54 |
| 2.3.22. Artículo 5.4.5 – Estaciones de Llenado | 54 |
| 2.3.23. Artículo 6.2.1 – Terminales Aéreas..... | 55 |
| 2.3.24. Artículo 7.2.3 – Factores de Comprobación..... | 55 |
| Capítulo 3: Métodos de protección..... | 57 |
| 3.1. MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE..... | 58 |
| 3.1.1 Método de la Esfera Rodante para Generadores Eólicos..... | 61 |
| 3.2. MÉTODO DEL ÁNGULO DE PROTECCIÓN..... | 63 |
| 3.3. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS AL SECTOR INDUSTRIAL..... | 67 |
| Capítulo 4: Desarrollo del software | 69 |
| 4.1. METODOLOGÍA..... | 70 |
| 4.1.1. Edificios Industriales con Torre de Comunicación | 71 |
| 4.1.2. Edificios Industriales..... | 72 |
| 4.1.3. Parques Eólicos..... | 73 |
| 4.2. DESARROLLO EN MATLAB..... | 74 |
| 4.3. ALGORITMO DE FUNCIONAMIENTO..... | 85 |
| Capítulo 5: Resultados | 86 |
| 5.1. RESULTADOS..... | 87 |

| | <i>Página</i> |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 5.1.1. Simulación gráfica para edificios con torre de comunicación..... | 88 |
| 5.1.2. Simulación gráfica para edificios industriales..... | 89 |
| 5.1.3. Simulación gráfica para parques eólicos..... | 91 |
| Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros..... | 92 |
| 6.1 CONCLUSIONES..... | 93 |
| 6.2 TRABAJOS FUTUROS..... | 94 |
| Referencias | 95 |

Lista de Figuras

| | <i>Página</i> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Figura 1.1. Sistema de protección de pararrayos externo..... | 6 |
| Figura 1.2. Puntas captadoras tipo Franklin de diferentes materiales..... | 7 |
| Figura 1.3. Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra..... | 9 |
| Figura 2.1. Descarga vertical del rayo..... | 15 |
| Figura 2.2. Nube Cumulonimbus..... | 16 |
| Figura 2.3. Formación de una nube Cumulonimbus..... | 16 |
| Figura 2.4. Inicio del mecanismo de la electrificación..... | 17 |
| Figura 2.5. Inicio de la fase activa..... | 17 |
| Figura 2.6. Maduración de la fase activa..... | 18 |
| Figura 2.7. Fin de la fase activa..... | 18 |
| Figura 2.8. Campo eléctrico en el suelo..... | 19 |
| Figura 2.9. Campo eléctrico amplificado por una irregularidad en el terreno..... | 19 |
| Figura 2.10. Etapas de una descarga..... | 20 |
| Figura 2.11. Mecanismo de una descarga de un rayo descendente negativo (rayo nube-tierra)..... | 22 |
| Figura 2.12. Proceso de descarga de un rayo ascendente negativo (rayo tierra-nube)..... | 23 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.13. Mecanismo de descarga de un rayo descendente positivo (rayo nube-tierra)..... | 23 |
| Figura 2.14. Proceso de descarga de un rayo ascendente positivo (rayo tierra-nube)..... | 24 |
| Figura 2.15. Sobretensiones transitorias conducidas..... | 27 |
| Figura 2.16. Sobretensiones debidas al aumento del potencial de tierra..... | 28 |
| Figura 2.17. Procedimiento para la aplicación de la norma mexicana..... | 31 |
| Figura 2.18. Mapa promedio anual de densidad de rayos en el estado de Tamaulipas..... | 32 |
| Figura 2.19. Área de captura equivalente para una estructura con techo plano y terreno plano..... | 34 |
| Figura 2.20. Área de captura equivalente para una estructura con techo de dos aguas y en terreno plano..... | 35 |
| Figura 2.21. Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular tipo 1..... | 36 |
| Figura 2.22. Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular tipo 2..... | 36 |
| Figura 2.23. Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular tipo 3..... | 36 |
| Figura 2.24. Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular tipo 4..... | 37 |
| Figura 2.25. Área de captura equivalente para una estructura con objetos vecinos tipo 1..... | 38 |
| Figura 2.26. Área de captura equivalente para una estructura con objetos vecinos tipo 2..... | 38 |
| Figura 2.27. Aplicación del método de la esfera rodante para definir la altura y posición de las terminales aéreas de intercepción del rayo..... | 42 |
| Figura 2.28. Arreglo físico representativo de la conexión entre terminales aéreas..... | 43 |
| Figura 2.29. Arreglo típico de ubicación de terminales aéreas verticales y horizontales para torres..... | 45 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1. Aplicación del método de la esfera rodante para definir la altura y posición de las terminales aéreas de intercepción del rayo..... | 58 |
| Figura 3.2. Altura máxima efectiva de una terminal aérea a partir del plano a proteger..... | 60 |
| Figura 3.3. Espacio de protección de una terminal aérea vertical y horizontal obtenido mediante el método de la esfera rodante..... | 60 |
| Figura 3.4. Aerogeneradores con receptores integrados en las palas..... | 61 |
| Figura 3.5. Método de la esfera rodante para generador eólico..... | 62 |
| Figura 3.6. Protección contra rayos de anemómetros situados en un aerogenerador..... | 63 |
| Figura 3.7. Angulo de protección y radio equivalente de la esfera rodante..... | 63 |
| Figura 3.8. Angulo de protección “alfa” en función de la altura h y el nivel de protección..... | 64 |
| Figura 3.9. Zona protegida cónica..... | 64 |
| Figura 3.10. Ejemplos de sistemas de protección con ángulos de protección alfa..... | 65 |
| Figura 3.11. Espacio protegido mediante un cable tendido..... | 65 |
| Figura 3.12. Sistema de protección contra rayos, volumen protegido por una punta captadora vertical..... | 66 |
| Figura 3.13. Conceptos utilizados en el ángulo de protección..... | 67 |
| Figura 3.14. Silos de almacenaje como ejemplo de aplicación..... | 68 |
| Figura 4.1. Entorno de desarrollo MATLAB..... | 70 |
| Figura 4.2. Interfaz gráfica de usuario MATLAB..... | 70 |
| Figura 4.3. Ejemplo de uso para torres de comunicación..... | 72 |
| Figura 4.4. Ejemplo de uso para edificios industriales..... | 73 |
| Figura 4.5. Ejemplo de uso para generadores eólicos..... | 73 |
| Figura 5.1. Interfaz gráfica de usuario para los métodos de diseño de los perfiles de protección de pararrayos..... | 87 |
| Figura 5.2. Perfil de protección del edificio con torre en lado A y B por el método del ángulo de protección..... | 88 |

| | <i>Página</i> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Figura 5.3. Perfiles de protección por los métodos antes de las modificaciones..... | 89 |
| Figura 5.4. Perfiles de protección del edificio en lado A y B por el método del ángulo de protección..... | 90 |
| Figura 5.5. Perfiles de protección del edificio en lados A y B por el método de la esfera rodante..... | 90 |
| Figura 5.6. Perfiles de protección del generador eólico en las posiciones superior, horizontal e inferior..... | 91 |

Lista de Tablas

| | <i>Página</i> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Tabla 1.1 Especificaciones técnicas de puntas captadoras marca INGESCO..... | 8 |
| Tabla 2.1 Parámetros característicos de cuatro tipos de rayos tipificados (bajo, típico, alto y extremo)..... | 25 |
| Tabla 2.2 Campo magnético estático generado por el rayo (A/m)..... | 27 |
| Tabla 2.3 Frecuencia media anual permitida de rayos directos sobre estructuras comunes..... | 33 |
| Tabla 2.4 Nivel de protección..... | 39 |
| Tabla 2.5 Materiales y dimensiones mínimas de las terminales aéreas..... | 55 |
| Tabla 2.6 Espesor mínimo de las hojas y tubos metálicos para terminales aéreas..... | 55 |
| Tabla 3.1 Altura de las terminales aéreas verticales de acuerdo con el nivel de protección para el método de la esfera rodante..... | 59 |
| Tabla 3.2 Probabilidad de incidencia del rayo de las corrientes de rayo..... | 59 |
| Tabla 3.3 Eficiencia del sistema de acuerdo con el nivel de protección..... | 59 |

Software para el Cálculo de Perfiles de Protección de Pararrayos en Parques Eólicos y Redes Industriales

Ing. Alan David Mendoza García

Resumen

En edificios industriales y centrales de generación de energía sustentable, la protección contra descargas atmosféricas se realiza principalmente instalando terminales de pararrayos. Estas protecciones se diseñan calculando por medio de los métodos gráficos de la esfera rodante y el ángulo de protección, sin embargo, algunos ingenieros utilizan planos a escala y sobre ellos dibujan las esferas y los ángulos de protección, otros se basan en la utilización de software de dibujo AutoCAD en dos dimensiones, dificultándose bastante debido al tiempo de realización, y ambas técnicas se basan en figuras geométricas y no en fórmulas matemáticas. El principal interés para la utilización del software de cálculo de perfiles de protección para descargas atmosféricas en la ingeniería, radica en que permite desarrollar trabajos en un tiempo reducido, lo cual es una solución práctica en la actualidad. Por medio de la simulación por computadora, se puede estudiar el impacto de añadir o quitar datos al sistema de estudio, sin tener que organizar los datos en diferentes herramientas de trabajo. Los perfiles de protección se realizan utilizando el software MATLAB, y permiten ver el desempeño del modelo gráfico y analizarlo por medio de los métodos de cálculo mencionados.

Abstract

In industrial buildings and sustainable power generation plants, protection against atmospheric discharges is mainly done by installing lightning rod terminals. These protections are designed by calculating by means of the graphic methods of the rolling sphere and the angle of protection, however, some engineers use scale drawings and, on them, they draw the spheres and angles of protection, others are based on the use of software AutoCAD drawing in two dimensions, becoming quite difficult due to the time of realization, and both techniques are based on geometric figures and not on mathematical formulas. The main interest for the use of the software for calculating protection profiles for atmospheric discharges in engineering, is that it allows the development of work in a short time, which is a practical solution today. Through computer simulation, the user can study the impact of adding or removing data to the study system, without having to organize the data into different work tools. Protection profiles are made using MATLAB software, and allow to see the performance of the graphic model and analyze it using the calculation methods mentioned.

Introducción

En este capítulo se describen los aspectos introductorios del desarrollo del software para la protección contra las descargas atmosféricas, como lo son los alcances y limitaciones que tiene el proyecto y el objetivo de desarrollo.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En edificios industriales y centrales de generación de energía sustentable, la protección contra descargas atmosféricas se realiza principalmente instalando puntas de pararrayos. Estas se diseñan utilizando los métodos de la esfera rodante y ángulo de protección, sin embargo, algunos ingenieros utilizan planos a escala y sobre ellos dibujan las esferas y los conos de protección, otros se basan en la utilización de software de dibujo AutoCAD en dos dimensiones, dificultándose bastante; y ambas técnicas se basan en figuras geométricas y no en fórmulas matemáticas.

En la actualidad, no existe software específico que brinde apoyo en el diseño con cálculo matemático de los perfiles de protección, por lo que el avance de las herramientas comerciales para el diseño de dichos sistemas es mínimo. Por lo general, el desarrollo de un software basado en fórmulas matemáticas apoyará enormemente la tarea de diseño y graficación de los perfiles de protección pudiéndose obtener más información para el diseño.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo del software está motivado por el interés de lograr un mejor desempeño en el proceso de elaborar los perfiles de protección de los sistemas de pararrayos para las instalaciones a proteger dentro de la zona industrial, debido al largo tiempo de desarrollo que necesitan los ingenieros de diseño, el software logrará reducir los tiempos de trabajo a unos pocos minutos de acuerdo al tamaño del proyecto en el cual se labore.

A partir de ahí interesa poder determinar el uso potencial del software como herramienta de asistencia al ingeniero de diseño en las fases iniciales del proceso, debido a que no existe un software especializado en el cálculo de los perfiles de protección en un sistema de pararrayos,

que muestre el modelo y la distribución del sistema de protección contra descargas atmosféricas.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un software para el diseño de perfiles de protección de pararrayos en redes industriales y parques eólicos.

1.4. OBJETIVO ESPECIFICO

- 1) Desarrollar el método de la esfera rodante.
- 2) Desarrollar el método del ángulo de protección.
- 3) Elaborar los perfiles de protección del edificio o estructura a proteger.
- 4) Generación de los perfiles de protección.

1.5. HIPÓTESIS

El desarrollo del software para la elaboración de los perfiles de protección de los sistemas de pararrayos creará una vía rápida de diseño vista desde varios puntos en el resultado final que el usuario necesita en la elaboración de sus estudios y evaluaciones al sistema de protección contra descargas atmosféricas del edificio, donde por medio de la evaluación de varios métodos de protección, de acuerdo al tipo de actividad que se maneje, el software elaborará

el diseño de los perfiles que el usuario revisará y validará como óptimos para su diseño, y así dar una solución efectiva.

1.6. ALCANCES

- El software desarrolla los perfiles de protección por medio de los métodos de la esfera rodante y el ángulo de protección.
- Se evalúa la cantidad de puntas de pararrayos en el edificio para el diseño de los perfiles de protección.
- Este software puede utilizarse para simular la protección que tienen las puntas de pararrayos tipo Franklin, de acuerdo a los diferentes niveles de seguridad que se necesitan en el edificio a proteger.

1.7. LIMITACIONES

- Solamente se analizan los sistemas de pararrayos por medio del software en MATLAB.
- Existen otros tipos de software para el análisis de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas.
- El software realiza el cálculo hasta la cantidad de 20 puntas captadoras en el edificio y solamente puntas tipo Franklin o puntas captadoras sencillas.
- Únicamente se pueden simular edificios con una estructura rectangular.

1.8. MARCO TEÓRICO

1.8.1. Sistema Externo de Protección contra Tormentas Eléctricas (SEPTE) [1]

Es el conjunto de elementos destinados a proteger un edificio o una estructura de los rayos que consiste en una o más puntas metálicas y unidas con el sistema de puesta a tierra por medio de conductores metálicos de cobre o aluminio (véase Figura 1.1), las puntas se colocan verticalmente en lo alto de los edificios para atraer los rayos como protección a los edificios aledaños de menor altura y los cuales no cuentan con protección, y facilitarle a las corrientes del rayo un paso directo a la tierra sin que dañen el edificio, este sistema se conforma de varios componentes:

- a) Puntas captadoras,
- b) Acopladores para cable de cobre,
- c) Herrajes de cobre para conductores,
- d) Conductores de bajada de cobre o aluminio,
- e) Contador de descargas,
- f) Sistema de puesta a tierra,

Describiendo lo importante, un sistema de protección contra tormentas eléctricas, debe [2]:

- Capturar el rayo en el punto diseñado para tal propósito llamado terminal aérea.
- Conducir la energía de la descarga a tierra, mediante un sistema de cables conductores que transfiera la energía de la descarga mediante trayectorias de baja impedancia, y;
- Disipar la energía en un sistema de puesta a tierra.

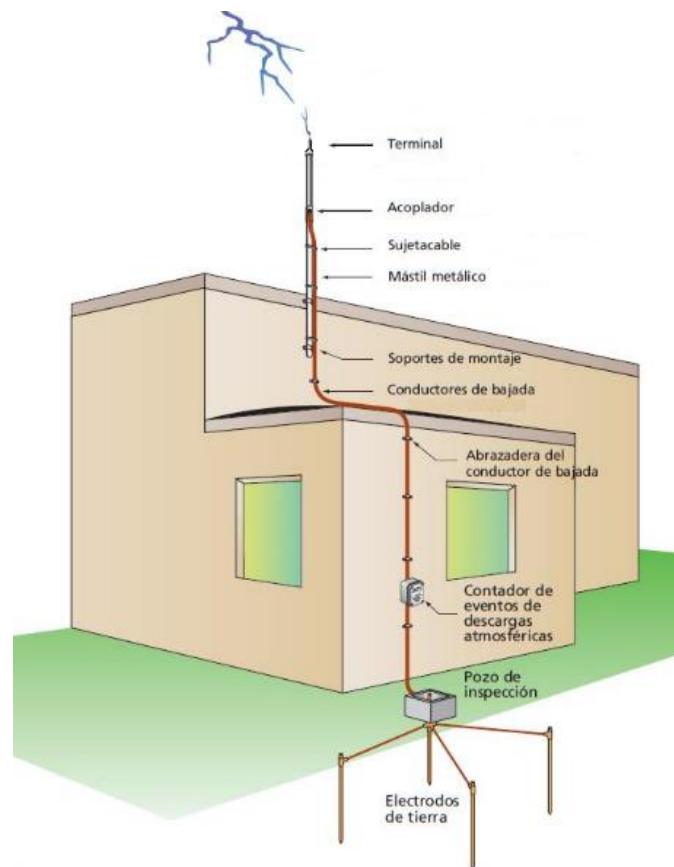


Figura 1.1. Sistema de protección de pararrayos externo.

1.8.2. Puntas Captadoras [3]

También conocidas como puntas Franklin, son usadas para formar el sistema más sencillo y más antiguo de pararrayos, consisten en terminales aéreas de cobre, bronce o aluminio anodizado terminadas en punta, en donde estas deben estar por lo menos a 25 cm sobre la estructura o edificio [4], y la especificación más pequeña de fabricación corresponde a 30 cm, véase Figura 1.2.

Al ser más continuas e intensas, las descargas con efecto corona en la punta de estos pararrayos, estas generan un líder ascendente o rayo ascendente de mayor longitud en menor tiempo, que termina por captar más rápido y de manera más eficiente al líder descendente o rayo descendente, lo que se traduce en un avance en la longitud de captación a una distancia mayor en un tiempo.

Su misión es provocar la excitación atmosférica por encima de cualquier otro punto de la estructura a proteger, para aumentar la probabilidad de que la descarga incida en su zona de influencia, y derivar a tierra la corriente del rayo [5].

1.8.2.1 Características [3]

- Protección externa del sistema de protección contra descargas atmosféricas
- Forma parte del sistema de protección pasiva, puntas y mallas conductoras
- Simplicidad
- Bajo coste
- Fácil instalación
- Unidas mediante conductores forman las mallas conductoras o "jaulas de Faraday"

En la Tabla 1.1. se muestran algunas especificaciones comerciales de las puntas captadoras.



Figura 1.2. Puntas captadoras tipo Franklin de diferentes materiales.

Tabla 1.1. Especificaciones técnicas de puntas captadoras marca *INGESCO*.

| Descripción | Referencia | Material | L (mm) | D1(mm) |
|----------------------------------|------------|----------|--------|--------|
| Punta captadora simple CU300-16 | 110081 | Cu | 300 | 16 |
| Punta captadora simple CU500-16 | 110083 | Cu | 500 | 16 |
| Punta captadora simple CU1000-16 | 110035 | Cu | 1000 | 16 |
| Punta captadora simple CU2000-16 | 110034 | Cu | 2000 | 16 |
| Punta captadora simple CU300-20 | 110089 | Cu | 300 | 20 |
| Punta captadora simple CU500-20 | 110091 | Cu | 500 | 20 |
| Punta captadora simple CU1000-20 | 110093 | Cu | 1000 | 20 |
| Punta captadora simple CU2000-20 | 110095 | Cu | 2000 | 20 |

1.8.3. Nivel Isoceraúnico [1]

El nivel isoceraúnico se define como el número promedio de días de tormenta al año en un lugar geográfico. Este valor suele estar basado en la observación, y suele ser acompañado del parámetro densidad de caída de rayos en un área determinada, de tal manera que entre los parámetros existe una cierta relación.

Se muestran las isolíneas para evaluar la densidad de rayos a tierra (DRT) en cada estado de la república mexicana, excepto la península de Baja California. Las isolíneas representan el promedio anual de dicho periodo. Las unidades de la DRT son rayos/km²/año, véase Figura 1.3.

El valor de cada isolínea es de 0.25 rayos/km²/año y debe tomarse el nivel superior de la isolínea que corresponda a la ubicación de la instalación a proteger. El valor de DRT que debe tomarse para la península de Baja California es de 2 rayos/km²/año.

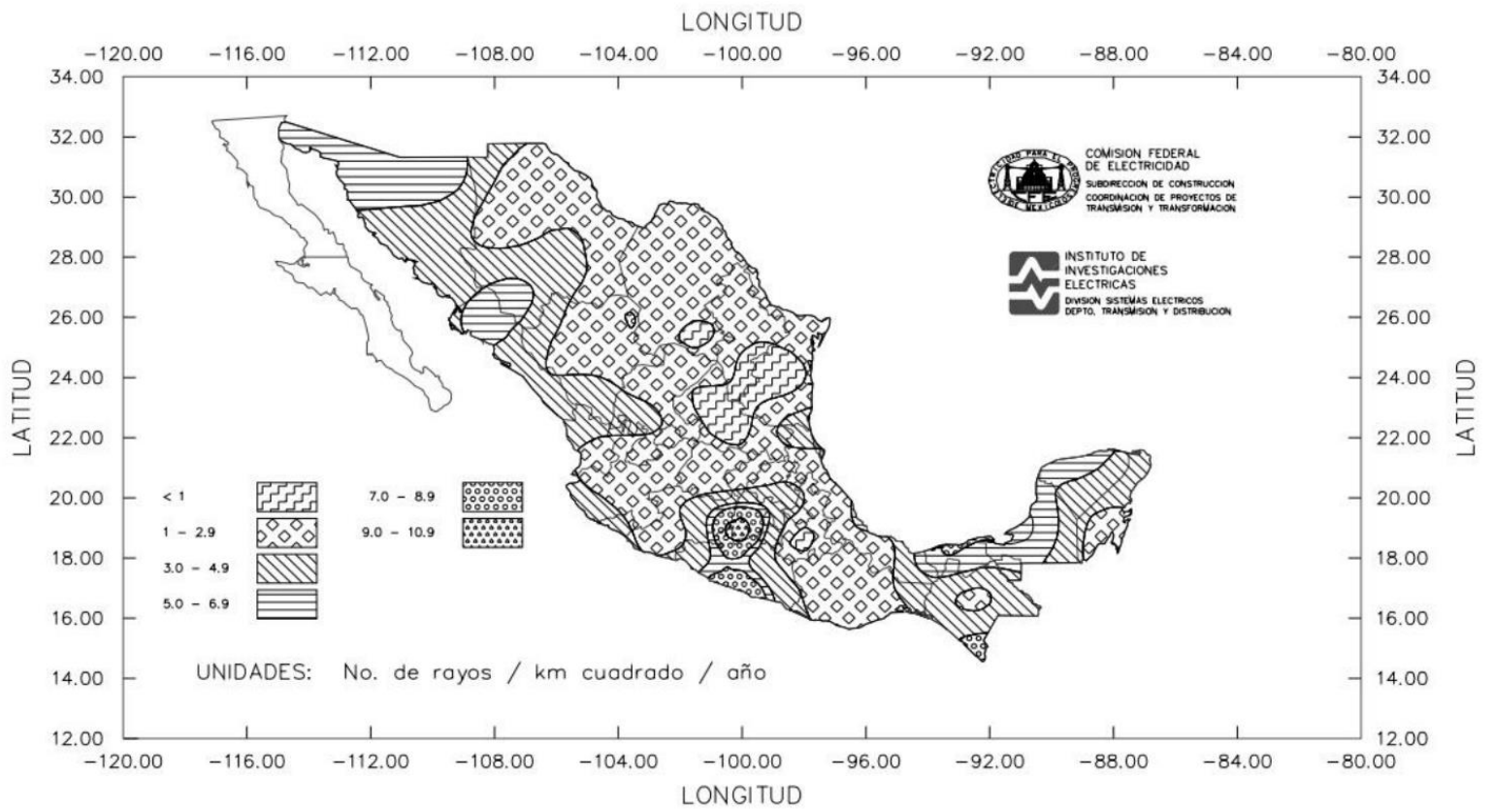


Figura 1.3. Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra.

Antecedentes

En este capítulo se introducen los aspectos teóricos del origen de las descargas atmosféricas, los conceptos y la clasificación de las diferentes tormentas eléctricas, lo siguiente que se analiza es la normatividad aplicable a las áreas de trabajo estudiadas.

2.1. ANTECEDENTES

Una descarga atmosférica es uno de los fenómenos naturales más frecuentes, cuyos efectos son a la vez espectaculares y destructores. Se estima que en nuestro planeta existen simultáneamente unas 2.000 tormentas y que cerca de 100 rayos descargan sobre la tierra cada segundo. En total, esto representa unas 4.000 tormentas diarias y unos 9 millones de descargas atmosféricas cada día [6].

Inicialmente para que se puedan producir este tipo de fenómenos meteorológicos, se necesita transportar en el ambiente masas de aire caliente con humedad suficientemente elevada a grandes alturas, el transporte de estas masas se puede realizar de dos maneras, por medio de tormenta de calor y tormentas de aire frío.

Una nube muy especial es la causante de la generación de descargas atmosféricas en el ambiente, dentro de ellas es donde se produce todo el efecto de las descargas, donde en la parte superior está constituida de cristales cargados positivamente y en la parte inferior está formada de pequeñas gotas de agua cargadas negativamente.

Normalmente cuando hay clima bueno o despejado, el campo eléctrico en el suelo tiene un valor de 100 volts/metro y en la cercanía de la tormenta, el campo eléctrico obtiene valores de 15 a 20 kilovolts/metro, y cuando la diferencia de potencial entre la nube y el suelo es de algunas decenas de megavolts, se originan las descargas eléctricas cuando hay una separación de cargas donde el límite es alcanzado y superado, la cual provoca descargas eléctricas entre las nubes (relámpagos) o entre nubes y el suelo (rayos), donde de la base de la nube la cual está cargada negativamente, se inicia una descarga y su recorrido hacia el suelo se hace por saltos de algunos cuantos metros hasta poder llegar al final generalmente en terrenos planos y en edificios.

Algunos de los efectos que pueden originarse del impacto las descargas atmosféricas son los efectos de inducción los cuales son los más difíciles de protegerse y provocan daño a los equipos eléctricos, los efectos de tensiones de paso y toque los cuales son la circulación de corrientes que pueden ocasionar desde lesiones físicas hasta la muerte por fibrilación ventricular, y los menos dañinos que son los efectos luminosos donde la caída de un rayo causa en el ojo del testigo un efecto, donde la visión queda totalmente por algunos segundos deslumbrada.

Actualmente, el rayo aparece repetidamente durante cada tormenta en cualquier periodo del año, durante la descarga del rayo se generan inducciones y acoplamientos en las líneas de transmisión eléctrica y de telecomunicaciones, mientras que en los edificios se generan otros fenómenos eléctricos indirectos que repercuten destruyendo nuestra infraestructura y a los edificios cercanos en un radio proporcional a la descarga.

El pararrayos es un artificio compuesto de una o más varillas de hierro terminadas en punta y unidas entre sí y con la tierra húmeda, o con el agua, por medio de conductores metálicos, el cual se coloca sobre los edificios o los buques para preservarlos de los efectos de la electricidad de las nubes [7].

La primera vez que se utilizó un pararrayos para la protección de una estructura fue en 1752 en Francia y luego, en los Estados Unidos. Se puede decir entonces que el pararrayos fue la primera aplicación práctica de los conocimientos que había en esa época sobre la electricidad, teniendo en cuenta que la batería no fue inventada por Volta hasta 1799 [8], a partir de ese inicio, la industria del pararrayos ha evolucionado por todo el mundo, fabricando modelos similares, aunque todos con el mismo principio físico de funcionamiento el cual es el de ionizar el aire con cualquier tipo como lo son los pararrayos de punta simple, multipunta o punta electrónica, para generar la llamada y captura del rayo a la zona donde queremos que impacte intencionalmente y poder protegerla por medio de su descarga en estos dispositivos.

Por lo tanto, se considera que el diseño y la aplicación de un sistema de protección integral, se compone por un sistema externo de protección contra descargas atmosféricas, el cual está formado por elementos que interceptan, conducen y disipan la corriente del rayo; y un sistema interno de protección contra descargas atmosféricas basado en uniones equipotenciales, blindaje electromagnético, puesta a tierra y protección contra transitorios [1].

Debido a los fenómenos meteorológicos que se originan en el planeta, a través del tiempo la humanidad ha sabido aprovechar estos efectos en un nivel de intensidad que no cause daños a su infraestructura, básicamente el viento es una fuente de energía limpia, sostenible que nunca se agota, y la transformación de su energía no produce emisiones.

Los generadores eólicos son la evolución natural de los molinos de viento, y en la última década se han realizado importantes progresos tanto en el aspecto técnico como económico, se han mejorado significativamente aspectos tales como la gestión y mantenimiento de parques eólicos, la integración de la energía eléctrica en la red, la versatilidad y adaptación del diseño de los generadores eólicos [9], por lo que es necesario lograr un sistema de protección que pueda proteger totalmente a estos equipos contra las descargas atmosféricas que podrían causar daños realmente grandes en la infraestructura.

Según se expandía la necesidad de controlar los mercados industriales a nivel de poder económico por los fabricantes, se dio lugar a la creación de las normas de pararrayos, que se fueron adaptando según la necesidad de cada país pero sin dejar de mantener los principios técnicos de base. En el caso de México, se creó la norma mexicana NMX-J-549-ANCE-2005” para diseñar y regular el mercado de la protección del rayo, y reducir el riesgo de daño para las personas, seres vivos, estructuras y su contenido [1].

Es importante que los ingenieros de diseño manejen los conceptos básicos necesarios para poder reunir la información relevante que cumpla con lo establecido por las normas y que aplicado en campo y en su diseño final, garanticen la efectividad del sistema de protección y proteja la integridad física de las personas, equipo e instalaciones.

2.2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS [6]

Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos naturales más espectaculares y comunes. En los dos siglos transcurridos desde que Benjamín Franklin demostró en 1752 que el rayo era una descarga eléctrica gigantesca, relámpagos, rayos y tormentas han sido objeto de numerosas investigaciones científicas. Sin embargo, pese a la avalancha de nuevos equipos, los orígenes de las descargas atmosféricas y del mecanismo mediante el cual se electrifican las nubes continúan mostrándose esquivos.

La dificultad reside en la propia física de la descarga y de las tormentas, que abarca una escala de 15 órdenes de magnitud. Desde Franklin, se ha aceptado que el relámpago es el paso de carga eléctrica, positiva o negativa, de una región de la nube a otra y el rayo, el tránsito equivalente de la nube a tierra. La caída de rayos y, por tanto, las sobretensiones transitorias de origen atmosférico representan un serio problema que se debe tener en cuenta.

2.2.1. Características de las Descargas [6]

Las descargas atmosféricas son impredecibles. Diferentes estudios y pruebas de campo permiten conocer algunos datos escalofriantes. Por ejemplo, sabemos que la temperatura máxima de un rayo puede alcanzar valores superiores a 30,000 °C con una duración de una millonésima de segundo. Esta temperatura supera más de cuatro veces la de la superficie del sol.

La longitud de la descarga vertical es normalmente de 5 a 7 km (véase Figura 2.1), mientras que en una descarga horizontal oscila entre 8 y 16 km. Los valores eléctricos que componen el rayo son enormes y pueden descargar intensidades de 200 kA con una energía total inmensa. La energía media disipada por unidad de longitud del canal de descarga formado por un simple rayo es del orden de 10^5 J/m, lo que equivale a unos 100 kg de dinamita. La energía media total por descarga es de 3×10^8 J y su duración total se considera que es de aproximadamente 30 ms. Así, la potencia media por rayo es de unos 10^{13} W. Cada rayo, en promedio, consta de 4 descargas separadas de 40 ms.



Figura 2.1. *Descarga vertical del rayo.*

2.2.2. La Formación de Tormentas [6]

Aunque también se han observado relámpagos y rayos durante tormentas de nieve, de polvo, explosiones nucleares y erupciones volcánicas, los relámpagos y los rayos más visibles y audibles (truenos) se asocian con las nubes cumulonimbus (Figura. 2.2), vulgarmente llamadas nubes de tormenta. Se reconocen por la forma de yunque y tienen un color más oscuro en su base, estas tormentas se clasifican en: tormentas de masa de aire (de calor) y tormentas frontales.

Las tormentas de masa de aire se forman independientemente y duran entre una y dos horas, produciendo descargas atmosféricas moderadas, vientos, lluvia y, ocasionalmente, granizo.

Las tormentas frontales son amplias, violentas y duran varias horas. Están asociadas con los frentes atmosféricos fríos, producen fuertes descargas atmosféricas, fuertes vientos y, ocasionalmente, granizo. Éstas son las más destructivas.



Figura 2.2. *Nube Cumulonimbus*

El desarrollo de una tormenta es el siguiente:

1. Desarrollo eléctrico de una nube tormentosa

En una tormenta de verano, el desencadenamiento del proceso se debe a la elevación de aire caliente del suelo que se carga de humedad y produce una nube (Figura 2.3).

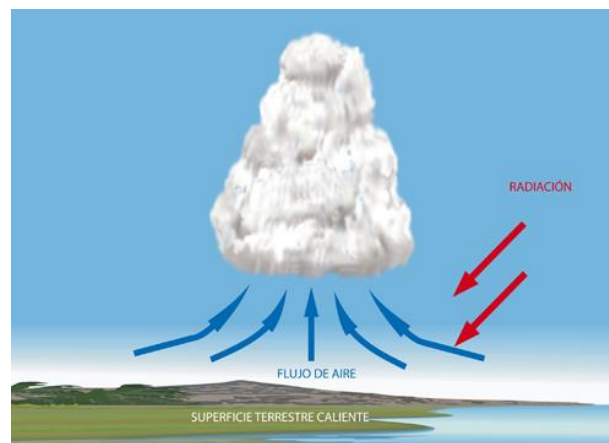


Figura 2.3. *Formación de una nube Cumulonimbus.*

2. Fenómeno de electrificación

La violencia de las corrientes de aire ascendentes y descendentes, características de estas nubes, separan las gotas de agua. Debido a las bajas temperaturas que se dan en esas altitudes, estas gotas se transforman en cristal de hielo, que entran en colisión entre ellas, y crean cargas eléctricas positivas y negativas (Figura 2.4).

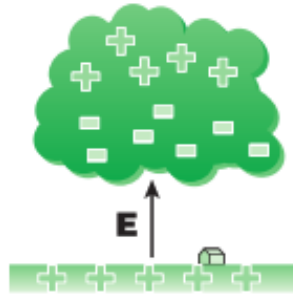


Figura 2.4. Inicio del mecanismo de la electrificación.

3. Fenómeno de la fase activa

Por un lado, las cargas de signo contrario se separan. Las cargas positivas formadas por cristales de hielo se sitúan en la parte superior de la nube, mientras que las negativas lo hacen en la inferior. Sin embargo, una pequeña cantidad de cargas positivas permanece en la base de la nube. Las primeras chispas entre nubes comienzan a aparecer cuando se entra en la fase de desarrollo (Figura 2.5).



Figura 2.5. Inicio de la fase activa.

4. Maduración de la fase activa

Esta nube eléctricamente equivale a un enorme condensador respecto al suelo. En el tiempo que transcurre desde que aparecen las primeras chispas dentro de la nube, comienzan a producirse relámpagos entre la nube y el suelo denominados pulsos de rayo. A continuación, aparecen las primeras lluvias (Figura 2.6).



Figura 2.6. *Maduración de la fase activa.*

5. Fin de la fase activa

La actividad de la nube disminuye mientras que los rayos hacia el suelo aumentan normalmente acompañados de fuertes precipitaciones, granizo y fuertes ráfagas de viento. En esta fase, se vacían centenares de miles de toneladas de agua que contenía la nube (Figura 2.7).



Figura 2.7. *Fin de la fase activa.*

2.2.3 El Fenómeno De Los Rayos [6]

Usualmente, los rayos empiezan en la base de la nube en un punto cuyo campo eléctrico es del orden de los 30,000 V/m. Cada componente del rayo sólo dura unas décimas de milisegundo y es lo que se denomina descarga.

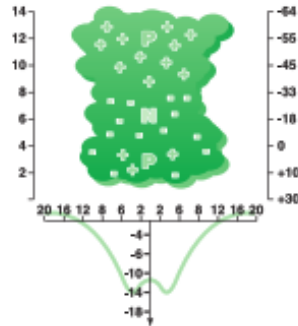


Figura 2.8. Campo eléctrico en el suelo.

Los tipos de descargas atmosféricas más importantes son: relámpagos entre nubes, relámpagos internos en la nube, relámpagos nube-aire y los rayos (nube-tierra o tierra-nube). No obstante, la mayor transferencia de carga se debe a las descargas efectos corona: con la aparición de una tormenta el campo eléctrico del suelo, que puede pasar de unos 120 V/m a unos 15 kV/m (Figura 2.8), puede acentuarse por las irregularidades del terreno, como colinas, árboles o edificios, creando un efecto de punta que lo amplifica de manera local unas 300 veces, véase Figura 2.9.

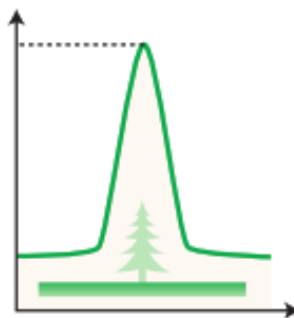


Figura 2.9. Campo eléctrico amplificado por una irregularidad en el terreno.

2.2.4 Principio de una Descarga [6]

Una porción de la energía de una descarga atmosférica se disipa en forma acústica (trueno) y otra mucho mayor (75%) se disipa en forma de calor, alcanzando una temperatura en el canal de descarga de 15,000 a 30,000 °C y, como consecuencia, la presión de los gases puede llegar a unas 100 atmósferas.

Para explicar el principio de una descarga, se ha tomado como ejemplo un rayo negativo descendente. El fenómeno de descarga puede explicarse según 4 fases (Figura 2.10):

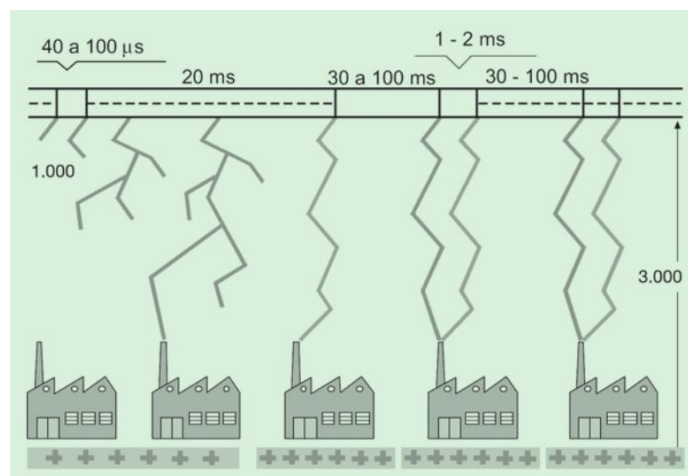


Figura 2.10. *Etapas de una descarga.*

1. El rayo comienza por un trazo que se desarrolla a partir de una nube y progresa bandeando sucesivamente de 30 a 50 m del suelo. El trazo está compuesto de partículas eléctricas arrancadas de la nube por el campo eléctrico creado entre éste y el suelo. Éstas forman un canal luminoso que se dirige hacia el suelo.
2. Se crea un canal ionizado que se va ramificando, y llega a 300 m del suelo. El efluvio eléctrico (o canal de chispas) sale desde el suelo y alguna chispa entra en contacto con el elemento.
3. Aparece en este momento un arco eléctrico muy luminoso que provoca el trueno (el trueno es el sonido de la explosión a lo largo de todo el canal de descarga y su larga

duración en comparación con el rayo se debe a las numerosas reflexiones del sonido) y que permite el intercambio de carga del condensador equivalente a efectos eléctricos nube-suelo.

El rayo principal parte desde el suelo hasta la nube con una velocidad de propagación cercana a 1/3 de la de la luz. Este arco de retorno se caracteriza por ser un impulso de duración total cercana a los 100 μ s y un frente creciente de 1 a 15 μ s.

4. Después aparece una sucesión de arcos llamados arcos subsiguientes. Entre estos arcos, subsiste un trazo continuo que hace circular una corriente del orden de 200 A, forzando así la descarga de una parte importante de las cargas del condensador.

Sin embargo, estos arcos poseen una variación de intensidad muy fuerte (di/dt) que provocan fenómenos muy peligrosos de inducción, mientras que el primer arco provoca problemas principalmente térmicos.

La potencia desencadenada crece aproximadamente con la quinta potencia del tamaño de la nube: duplicar las dimensiones de la nube implicaría multiplicar la potencia por 2^5 . Las grandes tormentas pueden llegar a producir rayos a razón de más de 100 descargas por minuto.

2.2.5. Clasificación de los Rayos [6]

Los rayos se clasifican según el sentido de su desplazamiento y la polaridad de la nube que se descarga.

- Según la polaridad de la nube:
 - a. **Rayo negativo:** cuando la nube está cargada negativamente y la tierra, positivamente. Los rayos negativos son muy frecuentes en lugares en los que el terreno es llano y el clima templado.
Aproximadamente, el 90% de los rayos son negativos.

- b. Rayo positivo:** cuando la nube está cargada positivamente y la tierra, negativamente. Estos rayos son muy extraños y peligrosos.
- Según el sentido de desplazamiento:
 - a. Rayo descendente:** cuando el rayo se dirige de la nube al suelo. Este tipo de rayo es muy frecuente en climas cálidos y donde el terreno es muy llano.
 - b. Rayo ascendente:** cuando el rayo se dirige desde el suelo hasta la nube. Este tipo de rayo, mucho más destructivo que el anterior, se crea, especialmente, en lugares montañosos o donde existen prominencias importantes.

Existen, por lo tanto, cuatro combinaciones posibles de rayos:

- Rayo negativo descendente (Figura 2.11)

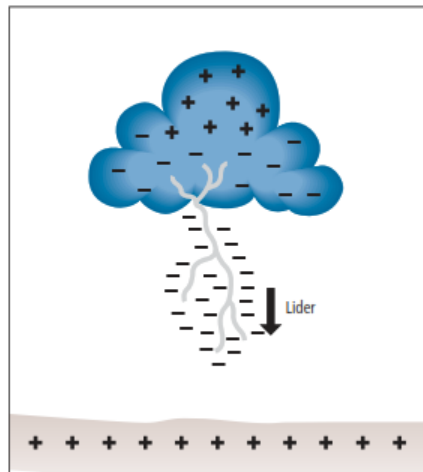


Figura 2.11. *Mecanismo de descarga de un rayo descendente negativo (rayo nube-tierra).*

- Rayo negativo ascendente (Figura 2.12)

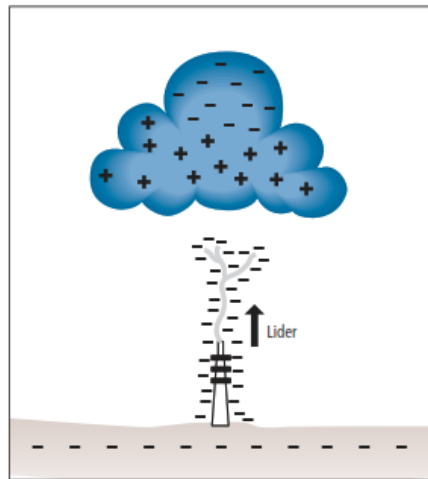


Figura 2.12. *Proceso de descarga de un rayo ascendente negativo (rayo tierra-nube).*

- Rayo positivo descendente (Figura 2.13)

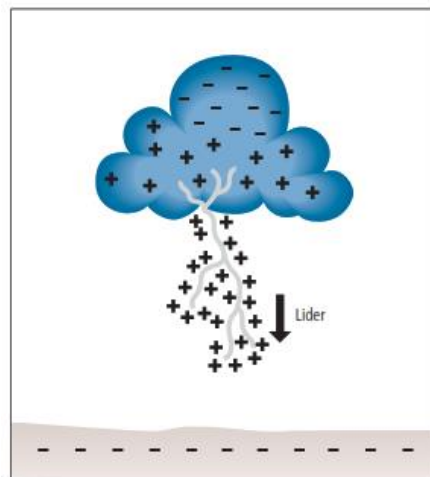


Figura 2.13. *Mecanismo de descarga de un rayo descendente positivo (rayo nube-tierra).*

- Rayo positivo ascendente (Figura 2.14)

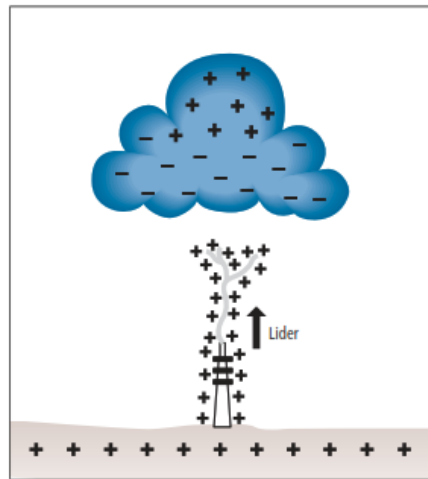


Figura 2.14. *Proceso de descarga de un rayo ascendente positivo (rayo tierra-nube).*

De estos cuatro tipos, los más comunes y menos peligrosos serían los negativos descendentes (suponen el 95% de los rayos). Los menos comunes (menos del 1% de los rayos), pero más peligrosos, son los positivos ascendentes.

2.2.6. Parámetros Característicos de los Rayos [6]

Los parámetros más importantes a la hora de estudiar el efecto del rayo son los siguientes:

- **Îpico:** intensidad de pico para calcular el incremento de potencial de tierra.
- **(di/dt) max:** frente de subida para calcular las tensiones inducidas y las caídas de tensión a través de las inductancias, así como el espectro de frecuencias de la perturbación.
- **i2dt:** parámetro de energía proporcional útil para calcular los efectos dinámicos (fuerzas resultantes).

- **I^2dt** : carga eléctrica útil para calcular la volatilización de materia en el punto de impacto de la caída del rayo.

Para tener una guía de diseño, se establecen cuatro tipos de rayo correspondientes a las columnas 90, 50 y 10%, y máximo observado (bajo, típico, alto y extremo) (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. *Parámetros característicos de cuatro tipos de rayos tipificados.*

| Parámetro | 90% (bajo) | 50% (típico) | 10% (alto) | Máximo observado (extremo) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------------------|
| Corriente de pico | 2 a 8 kA | 10 a 25 kA | 40 a 60 kA | 230 kA |
| Velocidad de ascenso de la corriente (di/dt) | 2 kA/ μ s | 8 kA/ μ s | 25 kA/ μ s | 50 kA/ μ s |
| Duración total del rayo | 0.01 a 0.1 s | 0.1 a 0.3 s | 0.5 a 0.7 s | 1.5 s |
| Duración de un simple impulso o descarga | 0.1 a 0.6 ms | 0.5 a 3 ms | 20 a 100 ms | 400 ms |
| Intervalo de tiempo entre impulsos | 5 a 10 ms | 30 a 40 ms | 80 a 130 ms | 500 ms |
| Intervalo de tiempo entre el principio y la mitad del valor de pico en el lado de la caída | 10 a 25 μ s | 28 a 42 μ s | 52 a 100 μ s | Más de 120 μ s |
| Tiempo hasta el valor de pico | 0.3 a 2 μ s | 1 a 4 μ s | 5 a 7 μ s | 10 μ s |
| Número de impulsos o descargas en un rayo individual | 1 a 2 | 2 a 4 | 5 a 11 | 34 |

Tanto la proporción como la intensidad de los rayos aumentan con la latitud geográfica. Los valores más altos se registran en la proximidad de los sistemas montañosos, los cuales favorecen la formación de tormentas de masa de aire al inducir ascensos forzados.

2.2.7. Principales Efectos de los Rayos [6]

La corriente de rayo es una corriente eléctrica de alta frecuencia, del orden de 1 MHz. Además de los efectos de inducción y de sobretensiones importantes, provoca los mismos efectos que toda corriente de alta frecuencia cuando circula por un conductor.

- **Efectos térmicos:** es la fusión en los puntos de impacto del rayo y efecto Joule debido a la circulación de corriente, pudiendo provocar incendios.
- **Efectos electrodinámicos:** las corrientes de rayo circulan por los conductores paralelos creando unas fuerzas de atracción o repulsión entre los cables y provocando roturas o deformaciones mecánicas (cables aplastados).
- **Efectos de deflagración:** el canal de rayo provoca una dilatación del aire y una compresión hasta unos 10 m de distancia. Un efecto de onda de choque rompe los vidrios y tabiques, y puede proyectar a personas o animales a algunos metros de distancia. Esta onda se transforma al mismo tiempo en onda sonora: trueno.
- **Sobretensiones conducidas:** causadas por un impacto sobre las líneas aéreas de alimentación eléctrica, telefónica o de datos.
- **Sobretensiones inducidas:** causadas por el efecto de la radiación electromagnética del canal de rayo.
- **Elevación de potencial de la tierra:** causada debido a la corriente de rayo en el suelo.

2.2.8. Tipos de Sobretensiones Transitorias Atmosféricas [6]

Las líneas aéreas, los cables suspendidos y los enterrados, pueden resultar dañados directamente por los rayos o recibir una influencia eléctrica de mayor o menor grado de las descargas atmosféricas próximas. Se distinguen tres tipos de sobretensiones atmosféricas en función de la caída del rayo:

1. Sobretensiones transitorias conducidas

La caída de un rayo directo sobre una línea de distribución de energía o de comunicaciones (línea telefónica) crea una onda de corriente que se propaga por ambas partes del punto de impacto. Esta sobretensión, que puede propagarse varios kilómetros,

acabará llegando a los equipos del usuario y derivándose a tierra por medio de estos equipos, a los que producirá averías o su destrucción (Figura 2.15).

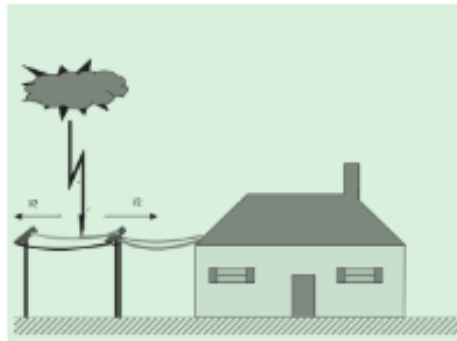


Figura 2.15. *Sobretensiones transitorias conducidas.*

2. Sobretensiones transitorias inducidas.

La caída de un rayo sobre un poste, árbol o irregularidad en el terreno será equivalente a una antena de gran longitud que emite un campo electromagnético muy elevado (Tabla 2.2). La radiación emitida induce corrientes transitorias en las líneas eléctricas o telefónicas, transmitiéndolas al interior de la instalación y provocando averías o la destrucción de los equipos conectados.

Tabla 2.2. *Campo magnético estático generado por el rayo (A/m), en función de la intensidad del rayo, medido a distintas distancias del punto de impacto.*

| Pico de intensidad del rayo | Campo magnético estático generado por el rayo (A/m) | | |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| | A 10 m del rayo | A 100 m del rayo | A 10 km del rayo |
| 10 | 1.62×10^2 | 16 | 1.92×10^{-2} |
| 20 | 3.22×10^2 | 32 | 3.82×10^{-2} |
| 30 | 4.82×10^2 | 48 | 5.82×10^{-2} |
| 170 | 1.122×10^3 | 1.12×10^2 | 13.2×10^{-2} |
| 100 | 1.62×10^3 | 1.62×10^2 | 19.2×10^{-2} |
| 140 | 2.22×10^3 | 2.22×10^2 | 27.2×10^{-2} |
| 200 | 3.2×10^3 | 3.2×10^2 | 38×10^{-2} |

3. Sobretensiones transitorias debidas al aumento de potencial de tierra.

La caída de un rayo sobre el terreno o en un pararrayos provoca una fuerte elevación del potencial de tierra en una zona de algunos kilómetros (si el rayo cae en un pararrayos, el

potencial de tierra aumentará cuando éste dirija la corriente a tierra). Este aumento de potencial puede inducir sobretensiones elevadas en los cables subterráneos y provocar la elevación de la tensión de las conexiones a tierra.

Dado que la conductividad del suelo tiene valores finitos, la corriente de descarga se distribuye por debajo de la superficie de la tierra en todas las direcciones, con zonas de alta conductividad que toman una mayor parte de la corriente y la transportan a largas distancias, hasta que se establece el equilibrio de potencial final en el suelo situado por debajo de la nube.

El efecto de protección de tierra depende, en gran parte, de la conductividad del suelo, pues cuanto mayor conductividad, menor sobretensión en el suelo (Figura 2.16).



Figura 2.16. *Sobretensiones debidas al aumento del potencial de tierra.*

2.2.9. Modos de propagación [6]

Las sobretensiones de origen atmosférico pueden propagarse de 2 modos diferentes: el común o asimétrico y el diferencial o simétrico.

1. Sobretensión transitoria en modo común o asimétrico

Perturbaciones entre un conductor activo y el de tierra (fase/tierra o neutro/tierra).

Este tipo de sobretensiones es peligroso para los aparatos en los que la masa está conectada a la tierra, debido a los riesgos de ruptura de la rigidez dieléctrica de los materiales.

2. Sobretensión transitoria en modo diferencial o simétrico

Perturbaciones entre conductores activos (fase-neutro).

Este tipo de sobretensiones son particularmente peligrosas para los equipos electrónicos y los materiales sensibles de tipo informático.

2.2.10. Consecuencias de las sobretensiones transitorias atmosféricas [6]

Las consecuencias principales de las sobretensiones atmosféricas vienen dadas por el acoplamiento de corrientes punta en los cables de señales.

- **Acoplamiento del campo al cable. Tensiones inducidas**

El campo electromagnético generado durante la caída de un rayo se acopla a todos los cables suficientemente cercanos generando sobretensiones de modo común o diferencial, que se propagan rápidamente.

- **Acoplamiento de cable a cable**

La forma en la que las corrientes de punta pueden acoplarse puede ser de la forma, óhmica, inductiva y capacitivamente, en los cables de señales de instalaciones muy extensas.

- **Tensiones de aislamiento o perforación en circuitos de instalaciones eléctricas de baja tensión**

Estas sobretensiones (ya sean elevadas o bajas) afectan a los distintos elementos de las instalaciones de baja tensión y pueden producir perforaciones en los aislamientos y, por tanto, fugas a tierra.

- **Subida del potencial de la toma de tierra**

La caída de un rayo en el suelo o en un pararrayos puede generar una corriente de rayo que se propagará por el suelo según la naturaleza del suelo y de la toma a tierra.

Dado que la conductividad del suelo tiene valores finitos, la corriente de descarga se distribuye por debajo de la superficie de tierra en todas las direcciones, con zonas de alta

conductividad (con conductores metálicos) que toman parte de la corriente y la transportan a largas distancias hasta que se establece el equilibrio de potencial final en el suelo situado por debajo de la nube.

2.3. NORMATIVIDAD

A continuación se describen los artículos necesarios a tener en cuenta en el diseño de los sistemas de protección de pararrayos, en la Norma Mexicana ANCE “Sistemas de Protección contra Tormentas Eléctricas – Especificaciones, Materiales y Métodos de Medición NMX-J-549-ANCE” [1].

2.3.1. Artículo 4.2 – Valoración de Riesgo [1]

La valoración de riesgo es una medida empírica, la cual estima en forma razonable, la probabilidad de incidencia de un rayo sobre una estructura tomando en cuenta la complejidad del fenómeno del rayo. El diseño de un sistema de protección SEPTE debe incluir la valoración de riesgo de la estructura contra la incidencia de un rayo directo, y esta valoración debe realizarse antes de definir las características y ubicación de los elementos constitutivos del sistema externo SEPTE como se indica en la Figura 2.17. Los resultados de la valoración de riesgo determinan la necesidad de instalar el sistema externo de protección SEPTE. Para instalaciones con riesgo de fuego o explosión debe aplicarse las especificaciones indicadas.

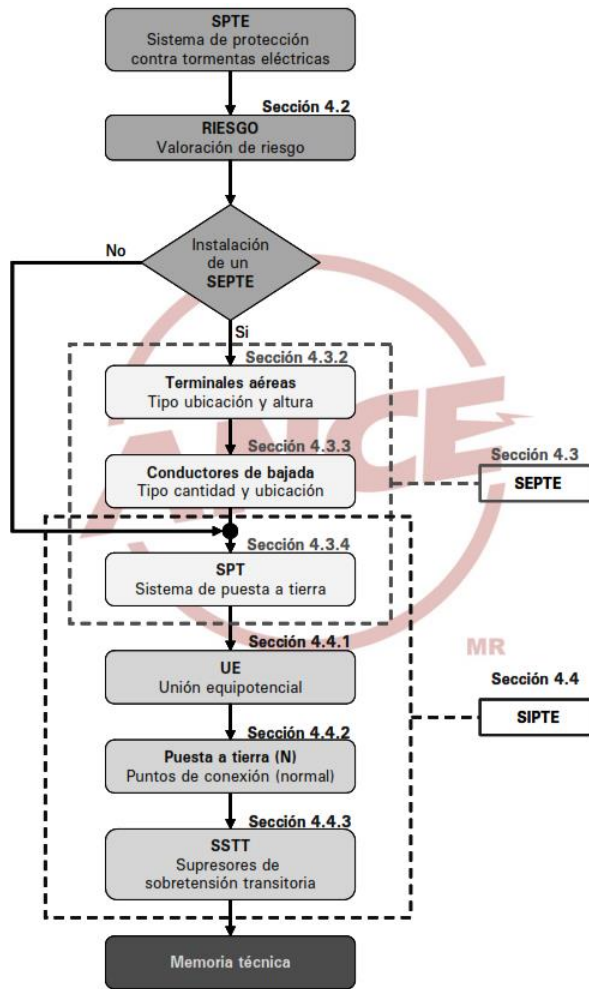


Figura 2.17. Procedimiento para la aplicación de la norma mexicana.

2.3.2. Artículo 4.2.1- Frecuencia de Rayos Directos a una Estructura [1]

La frecuencia de rayos directos a una estructura (N_o), puede calcularse mediante la ecuación 2.1:

$$N_o = N_g * A_e * 10^{-6} \quad (2.1)$$

Donde:

N_o Es la frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura;

N_g Es la densidad promedio anual de rayos a tierra por km^2 , (densidad de rayos a tierra, DRT), véase Figura 2.18.

A_e Es el área equivalente de captura de la estructura, en m^2 .

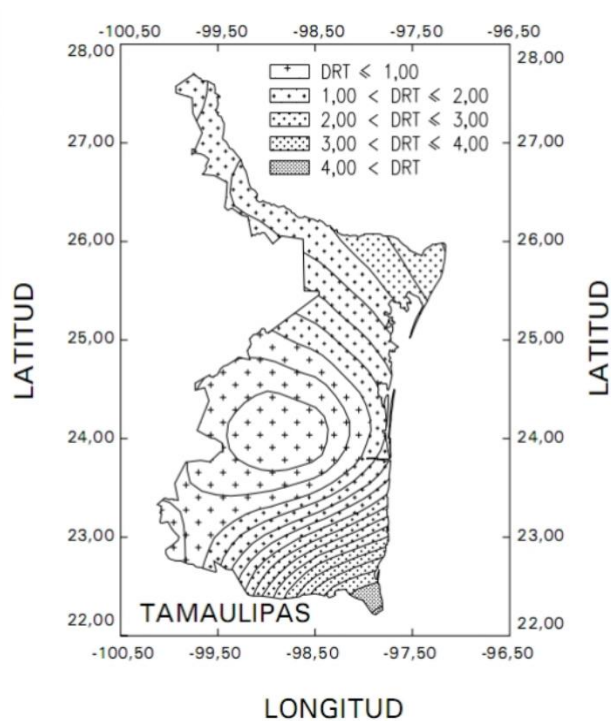


Figura 2.18. *Mapa promedio anual de densidad de rayos en el estado de Tamaulipas.*

2.3.3. Artículo 4.2.2 - Frecuencia Anual Permitida de Rayos Directos a una Estructura [1]

La frecuencia anual permitida de rayos directos a una estructura, N_d , es el riesgo permitido de incidencia de un rayo directo a una estructura de acuerdo al tipo, uso y contenido, definidos en la Tabla 2.3.

Nota: Una frecuencia anual permitida de 1 rayo cada 10 años tiene un riesgo mayor para las estructuras que una frecuencia de 1 rayo cada 20, 50 ó 100 años. A mayor intervalo de años, es menor el riesgo de rayo directo sobre la instalación, edificio o estructura.

Tabla 2.3. Frecuencia media anual permitida de rayos directos sobre estructuras comunes.

| Estructuras comunes | Efectos de las tormentas eléctricas | Frecuencia (N_d) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 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. | 0,04 |
| 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 animales. | 0,02 |
| 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. | 0,04 |
| 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 ligero o metropolitano. | 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. | 0,02 |
| Hospital Asilo 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. | 0,02 |
| Industria tales como: Máquinas 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. | 0,01 |
| Museos y sitios arqueológicos | Pérdida de vestigios culturales irremplazables | 0,02 |
| Edificios de telecomunicaciones Véase nota | Interrupciones inaceptables, pérdidas por daños a la electrónica, altos costos de reparación y pérdidas por falta de continuidad de servicio. | 0,02 |
| NOTAS | | |
| 1 Para cualquier estructura común debe evaluarse el nivel de riesgo en función de su localización, densidad, altura y área equivalente de captura, para decidir la protección. | | |
| 2 Para estructuras en zonas con densidad de rayos a tierra mayor a 2, y si el techo de la construcción es de material inflamable (madera o paja), debe instalarse un SEPTE. | | |

2.3.4. Artículo 4.2.3 - Área Equivalente de Captura [1]

Las áreas equivalentes de captura se clasifican y se calculan de la forma siguiente:

- a) Para una estructura aislada ubicada en terreno plano, con techo plano y de dos aguas, se calculan con las ecuaciones 2.2 y 2.3:

$$A_e = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \quad (2.2)$$

$$A_e = ab + 6hb + 9\pi h^2 \quad (2.3)$$

Donde:

- A_e** Es el área equivalente de captura, en m².
- a** Es la longitud de uno de los lados de la estructura, en m.
- b** Es la longitud del otro lado de la estructura en m.
- h** Es la altura de la estructura en m.

Nota: La altura h total de la estructura o edificio a proteger debe considerar la altura de todos los equipos sobre techo.

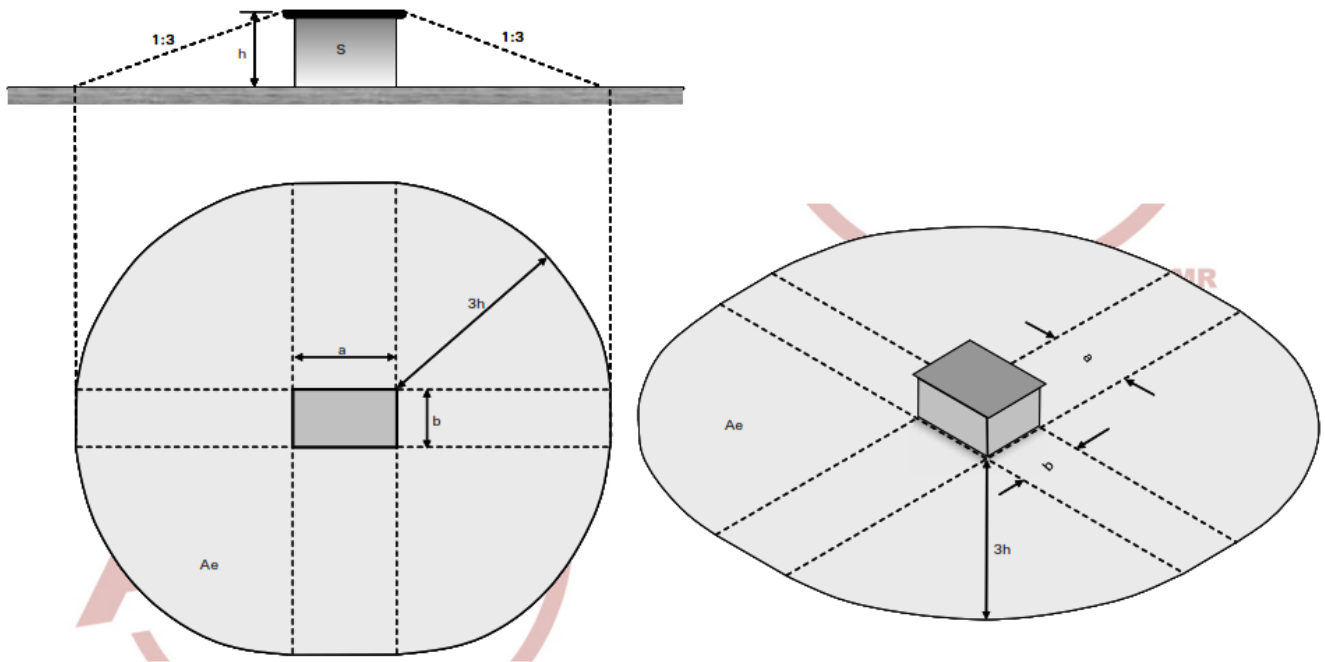


Figura 2.19. Área de captura equivalente para una estructura con techo plano y terreno plano.

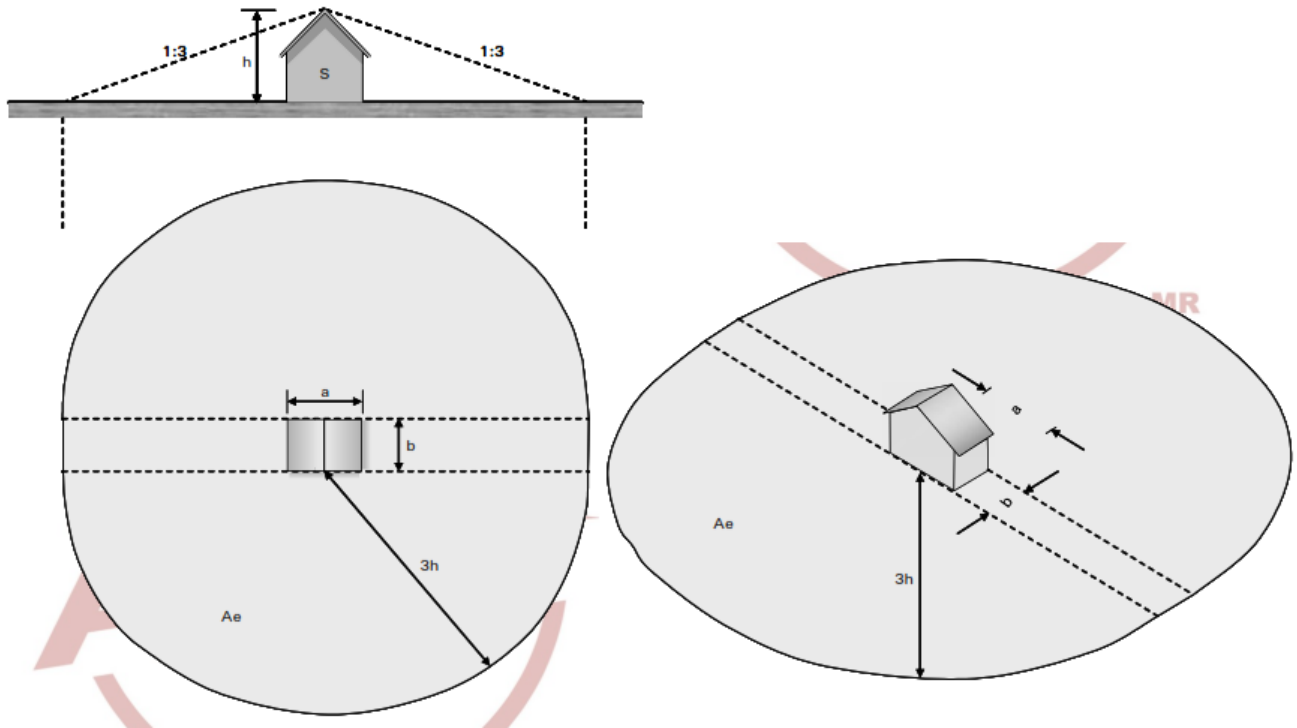


Figura 2.20. Área de captura equivalente para una estructura con techo de dos aguas y en terreno plano.

- b) Para una estructura aislada ubicada en terreno irregular, se calcula el área con la ecuación 2.4:

$$A_e = ab + 6h_e(a + b) + 9\pi h_e^2 \quad (2.4)$$

Donde:

- A_e Es el área equivalente de captura, en m^2 ;
- a Es la longitud de uno de los lados de la estructura, en m;
- b Es la longitud del otro lado de la estructura en m;
- h_e Es la altura equivalente de la estructura en el terreno irregular, en m;

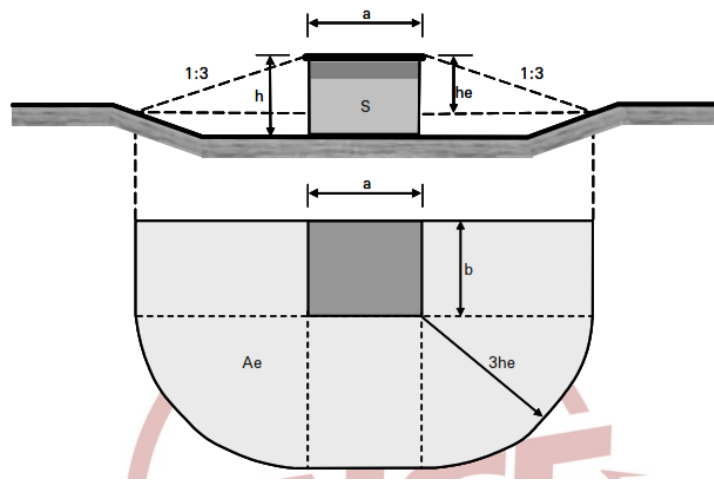


Figura 2.21. Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular tipo 1.

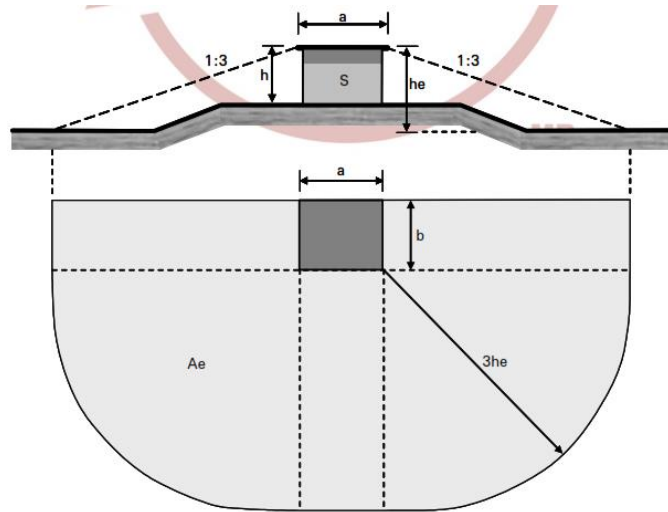


Figura 2.22. Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular tipo 2.

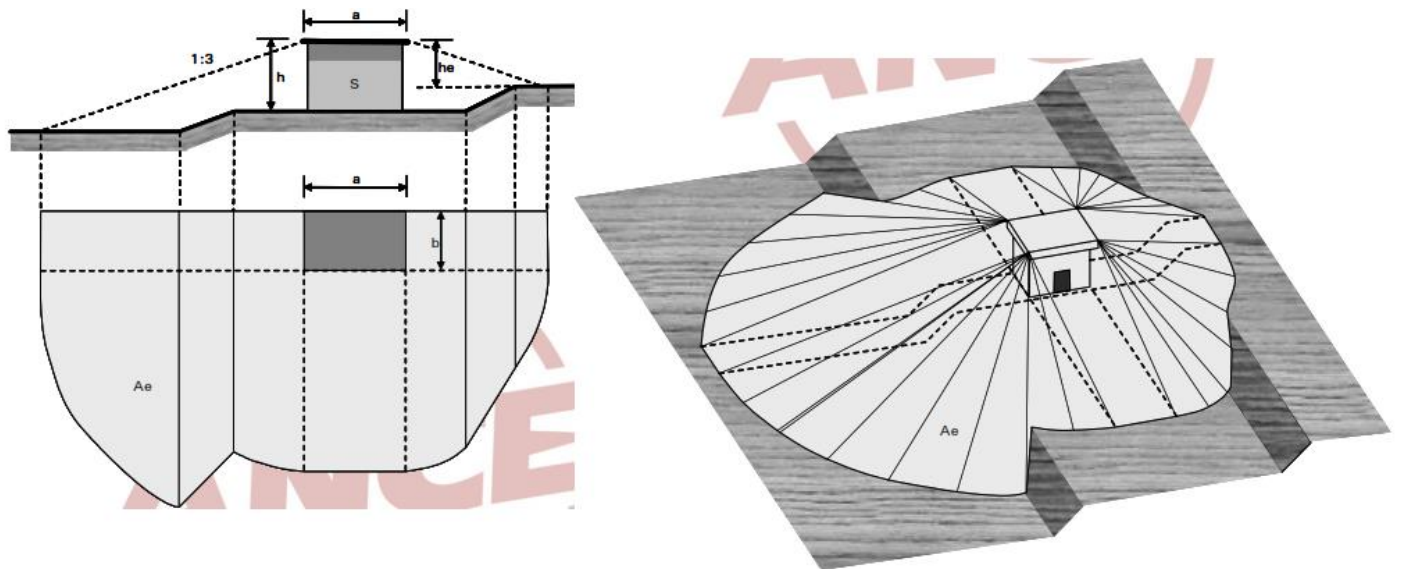


Figura 2.23. Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular tipo 3.

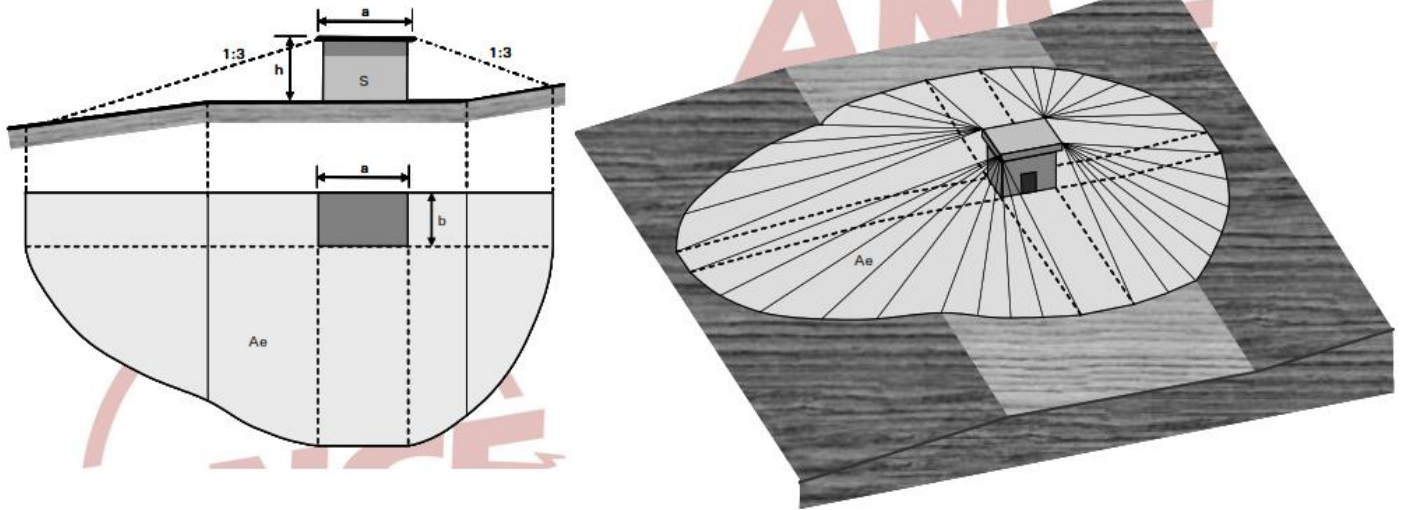


Figura 2.24. Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular tipo 4.

- c) Para una estructura con otras adyacentes, se calculan primero las distancias correspondientes con la ecuación 2.5 y posteriormente el área equivalente de captura:

$$X_s = \frac{d+3(h_s-h)}{2} \quad (2.5)$$

Donde:

- X_s Es la distancia equivalente, en m;
- h_s Es la altura del objeto vecino, en m;
- h Es la altura de la estructura bajo consideración, en m;
- d Es la distancia horizontal entre la estructura y el objeto vecino, en m.

Los objetos vecinos influyen de manera significativa sobre el área equivalente cuando las distancias entre ellos y la estructura son menores que $3(h + h_s)$. En este caso, si las áreas equivalentes de la estructura y de los objetos vecinos se traslapan, el área equivalente A_e se calcula mediante al área resultante en la intersección de las líneas perpendiculares a la línea de trazado entre el objeto a protegerse y el objeto vecino a una distancia equivalente, véase Figura 2.25 y Figura 2.26 para cada uno de los objetos vecinos.

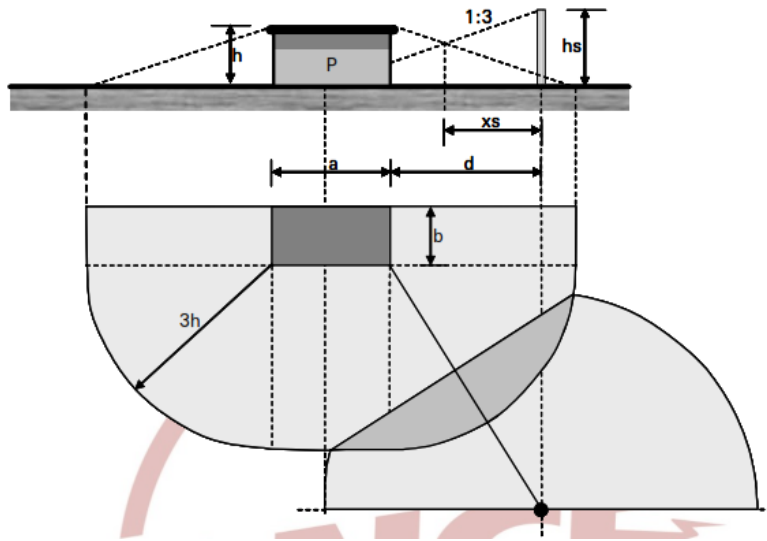


Figura 2.25. Área de captura equivalente para una estructura con objetos vecinos.

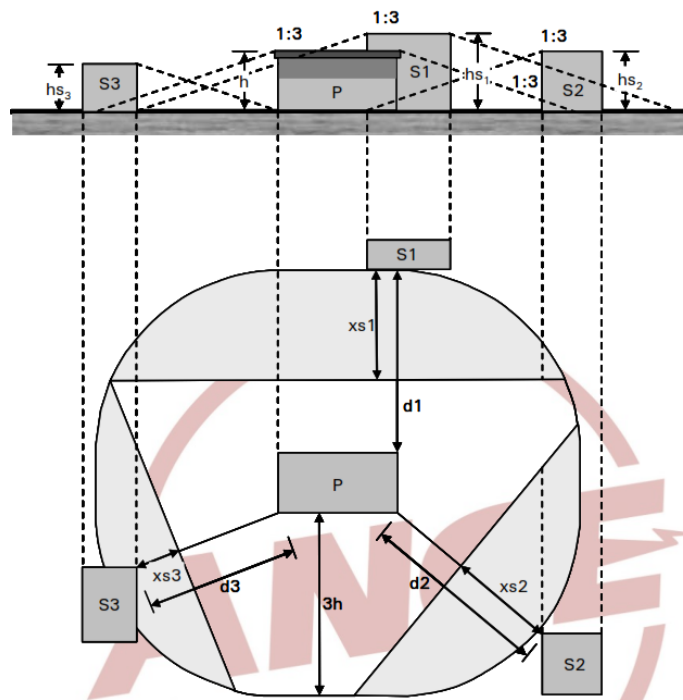


Figura 2.26. Área de captura equivalente para una estructura con objetos vecinos.

2.3.5. Artículo 4.2.4 - Evaluación de la Necesidad de Protección [1]

Una vez estimado el valor N_o debe compararse con el valor de la frecuencia media anual permitida N_d (tabla 1) para evaluar la necesidad de protección, considerando lo siguiente:

- a) Si N_o (estimado) es $\leq N_d$ (tabla 2.3, valor permitido), el sistema es opcional.

Esta condición significa que el sistema de protección puede o no instalarse. Sin embargo, debe considerarse que, aun cuando el riesgo estimado sea menor que el riesgo permitido, existe la posibilidad de que un rayo incida sobre la estructura que no tiene un sistema de protección.

- b) Si N_o (estimado) es $> N_d$ (Tabla 2.3, valor permitido) debe instalarse un sistema de protección.

La selección del nivel de protección a utilizarse en el diseño para la ubicación y la altura de las terminales aéreas depende del tipo y uso de la estructura conforme a lo indicado en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Nivel de protección.

| Estructuras comunes | Efectos de las tormentas eléctricas | Nivel de protección recomendado |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 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 ó 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 ó 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 ligero o metropolitano. | 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. | I ó II |
| Industria, tales como: maquinas herramientas, ensambladoras, textil, papelería, 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 ó II |
| Museos y sitios arqueológicos | Pérdida de vestigios culturales irremplazables | II |
| Edificios de telecomunicaciones | Interrupciones inaceptables, pérdidas por daños a la electrónica, altos costos de reparación y pérdidas económicas por falta de continuidad en el servicio. | I ó II |

NOTA- El nivel de protección I es el de mayor protección y el nivel de protección IV es el de menor protección.

2.3.6. Artículo 4.3 - Diseño del Sistema Externo de Protección SEPTE [1]

Los elementos que conforman a un SEPTE son los siguientes:

- Terminales aéreas
- Conductores de bajada
- Sistema de puesta a tierra

El número y ubicación de las terminales aéreas de un SEPTE dependen del nivel de protección seleccionado y de la aplicación del método de la esfera rodante indicado.

El número y ubicación de los conductores de bajada dependen del tipo de sistema de protección seleccionado, puede ser aislado o no aislado.

El número de los electrodos de puesta a tierra (ya sea individual o en arreglo) es el que determina el cumplimiento del valor de resistencia a tierra indicado.

2.3.7. Artículo 4.3.2 - Terminales Aéreas [1]

Las terminales aéreas pueden ser:

- a) Elementos metálicos verticales,
- b) Cables aéreos tendidos horizontalmente,
- c) Una combinación de ambos

2.3.8. Artículo 4.3.2.1 - Terminales Aéreas en SEPTE Aislado [1]

Un SEPTE aislado debe utilizarse cuando la circulación de la corriente de rayo cause daño a la estructura y exista el riesgo de fuego o explosión ya sea térmico o arco eléctrico. Para el primer caso la separación entre los elementos del SEPTE y los elementos de la estructura a proteger recubierta con material inflamable o combustible deben ser como mínimo de 0.1 m; para el segundo caso, es necesario cumplir con los requisitos para la distancia de seguridad.

2.3.9. Artículo 4.3.2.2 - Terminales Aéreas en SEPTE no Aislado [1]

Un SEPTE no aislado debe cumplir con los requisitos de unión equipotencial indicados.

2.3.10. Artículos 4.3.2.3 - Número y Ubicación De Terminales [1]

Existen elementos de la estructura o edificio que por ser metálicos y estar encima de los objetos a proteger pueden considerarse en el diseño como terminales aéreas naturales para interceptar la corriente del rayo, a pesar de no haber sido diseñados para tal fin. Estos elementos naturales pueden ser, hojas metálicas, ornamentaciones, barandillas, tubos metálicos, etc., generalmente ubicados en techos y fachadas, y deben cumplir las condiciones siguientes:

- a) Eléctricamente continuos en todas sus partes,
- b) No tener revestimientos de material aislante,
- c) Estar sólidamente conectados al sistema de puesta a tierra,
- d) Cumplir con las especificaciones indicadas.

La probabilidad del número de impactos sobre las terminales aéreas es mayor con su altura, aumentando también la probabilidad de interponerse en la trayectoria de rayos de mayor intensidad. Por lo tanto, es recomendable que la altura de las terminales esté limitada a 3 m por encima del objeto a proteger, verificando en todo momento la cobertura de protección del diseño.

El número y ubicación de las terminales aéreas deben calcularse de acuerdo con su posición y nivel de protección, como se indica. En general, para cualquier edificio o estructura, existen dos niveles de referencia en donde debe aplicarse la esfera rodante: (a) el nivel del techo y (b) el nivel del piso alrededor del edificio o estructura, como se indica en forma genérica en la Figura 2.27, el cálculo del número y ubicación de las terminales aéreas deben cumplir los puntos siguientes, de acuerdo con la altura del edificio o estructura:

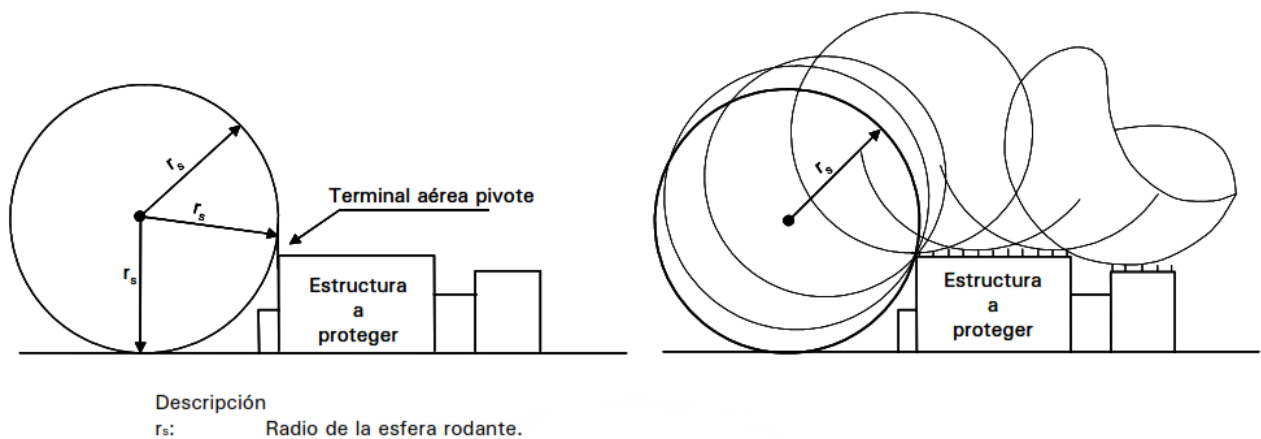
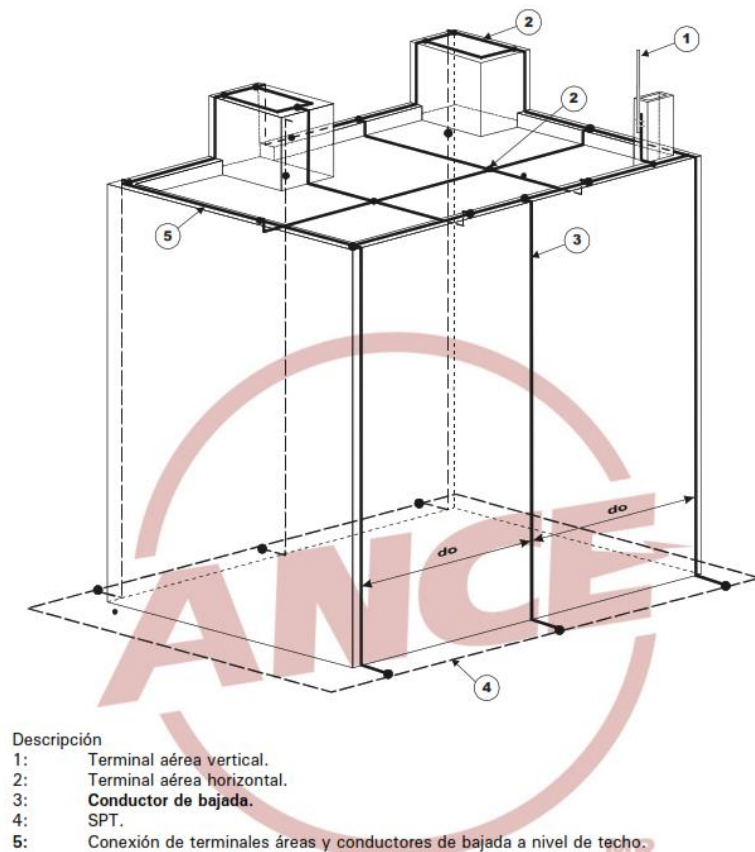


Figura 2.27. Aplicación del método de la esfera rodante para definir la altura y posición de las terminales aéreas de intercepción del rayo.

1. Cuando la altura del edificio o estructura sea menor que 20 m, el número y ubicación de las terminales aéreas en el techo del edificio obtenidas al rodar la esfera rodante correspondientes al nivel de protección, es suficiente para asegurar la protección deseada.

2. Cuando la altura del edificio o estructura sea mayor que 20 m pero menor o igual que 60 m, deben instalarse, adicional a las terminales aéreas en el nivel del techo (obtenidas al rodar la esfera rodante correspondiente al nivel de protección), conductores horizontales alrededor del edificio formando lazos cerrados a cada 20 m de altura, como se indica en la Figura 2.28.



NOTA - Se indica una sola terminal aérea vertical por motivos de claridad en el dibujo.

Figura 2.28. Arreglo físico representativo de la conexión entre terminales aéreas, conductores de bajada y un arreglo cerrado del sistema de puesta a tierra en un edificio con diferentes alturas en el techo y para un sistema no aislado de protección.

3. Cuando la altura del edificio o estructura sea mayor que 60 m, las terminales aéreas en el nivel del techo deben calcularse con un nivel I de protección. Adicionalmente, deben instalarse conductores horizontales (anillos equipotenciales) alrededor del edificio formando lazos cerrados por lo menos a cada 45 m de altura, en forma similar a lo indicado en la Figura 2.28.

4. Cuando el edificio o estructura sea de acero estructural eléctricamente continuo, no es necesario instalar los conductores horizontales (anillos equipotenciales) mencionados en los incisos anteriores; en este caso, es suficiente asegurar la conexión entre los cimientos de la estructura y el sistema de puesta a tierra.

Nota: Para el caso de fachadas a base de elementos metálicos, estos pueden utilizarse como terminales aéreas naturales, siempre y cuando cumplan con lo establecido. Por lo que no es necesario utilizar conductores horizontales (anillos equipotenciales) cerrados alrededor del edificio.

5. Para torres de telecomunicaciones con alturas hasta 60 m, debe instalarse como mínimo una terminal aérea en la parte más alta de la misma, con una altura mínima de 2 m sobre los objetos o equipos (generalmente antenas) más altos adheridos a la torre y una separación como mínimo de 0,8 m de dichos objetos o equipos. Cuando dichos objetos o equipos se encuentren fuera del cuerpo de la torre (principalmente en partes intermedias de la torre) y esta tenga una altura mayor que 60 m, deben utilizarse terminales aéreas horizontales adicionales, como se muestra en la figura 2.29. En el caso de que la densidad de descargas de rayos a tierra sea mayor que 2 rayos/km²/año, debe revisarse los elementos de protección con base en el método de la esfera rodante. La distancia mínima de separación entre la terminal aérea horizontal y los objetos o equipos a proteger debe ser de 0,8 m. Véase Figura 2.29.

6. El criterio de ubicación de terminales aéreas horizontales indicadas en el inciso (5) debe aplicarse para la protección de equipo instalado sobre la parte exterior de paredes y muros de edificios (por ejemplo, videocámaras) cuando dicho equipo quede fuera del volumen de protección al rodar la esfera rodante desde el suelo hasta el edificio o estructura.

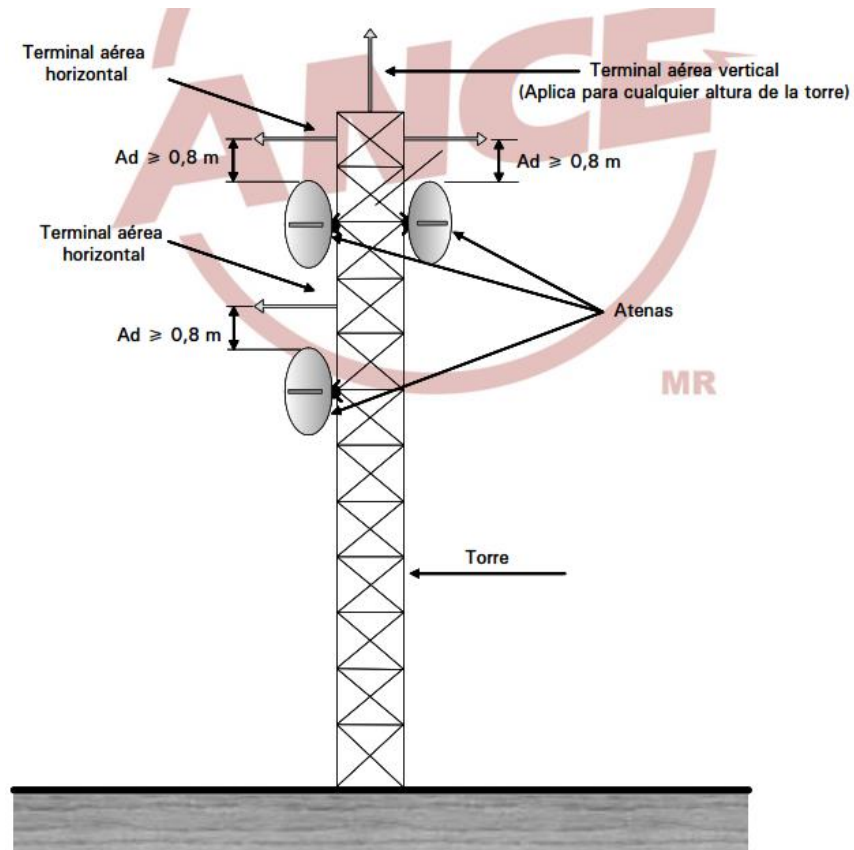


Figura 2.29. Arreglo típico de ubicación de terminales aéreas verticales y horizontales para torres.

2.3.11. Artículo 4.3.3.3.1 - Terminales Aéreas y Conductores de Bajada para un Sistema Externo de Protección SEPTE Aislado [1]

Las terminales aéreas y conductores de bajada deben de mantener la distancia de seguridad s a las partes metálicas de la instalación y deben cumplirse los siguientes puntos, según sea el caso:

- a) Si las terminales aéreas son independientes y separadas de la estructura, debe utilizarse cuando menos un conductor de bajada por cada terminal aérea.
- b) Si las terminales aéreas son independientes y montadas en forma aislada de la estructura, debe utilizarse cuando menos un conductor de bajada por cada terminal aérea.

- c) Si las terminales aéreas forman una red de conductores horizontales y están montadas en mástiles separados de la estructura, debe instalarse por lo menos un conductor de bajada por cada mástil de soporte.
- d) Si las terminales aéreas forman una red de conductores horizontales y están montadas de forma aislada sobre la estructura, debe instalarse por lo menos un conductor de bajada por cada mástil de soporte.
- e) A nivel de suelo, los conductores de bajada deben interconectarse al sistema de puesta a tierra. Para el caso de un solo conductor de bajada, el sistema de puesta a tierra de estar formado por al menos un arreglo de 3 electrodos y conforme a lo indicado.

2.3.12. Artículo 4.3.3.3.2 - Terminales Aéreas y Conductores de Bajada para un Sistema Externo de Protección SEPTE no Aislado [1]

Las terminales aéreas y los conductores de bajada deben estar conectados a nivel de techo. A nivel de suelo, los conductores de bajada deben interconectarse al sistema de puesta a tierra. Cuando las condiciones físicas del edificio o estructura no permitan esta conexión a nivel de suelo debe utilizarse el acero de refuerzo o estructural de la cimentación para lograr esta conexión. Además deben de cumplirse los siguientes puntos, según sea el caso:

- a) Si el SEPTE está formado por una sola terminal aérea, deben utilizarse dos o más conductores de bajada.
- b) Si el SEPTE está formado por terminales aéreas horizontales, deben utilizarse dos o más conductores de bajada.

- c) Los conductores de bajada deben estar distribuidos de acuerdo a lo indicado. Los conductores de bajada deben estar ubicados cerca de cada una de las esquinas de la estructura, aplicando los criterios indicados.
- d) Si la pared de la estructura está hecha de material inflamable, los conductores de bajada deben ubicarse a una distancia mayor a 0.1 m del elemento a proteger.
- e) Los conductores de bajada deben de conectarse con los conductores horizontales alrededor de la estructura o edificio.

La distancia de separación d_o entre los conductores de bajada contigua debe cumplir con los requisitos indicados.

2.3.13. Artículo 4.4.1.- Unión Equipotencial [1]

La unión equipotencial es un procedimiento de control y seguridad, mediante el cual se logra la igualación de los potenciales de todos o parte de los elementos metálicos de una instalación. Esta igualación de los potenciales se efectúa mediante la conexión física a un punto común.

La función de la unión equipotencial es reducir las diferencias de potencial generadas por rayo cuando este incide en los elementos de intercepción de un SEPTE, sobre o en las cercanías de la instalación o estructura. La diferencia de potencial puede producir la circulación de corrientes indeseables y la generación de arcos eléctricos con el riesgo de fuego y explosión en áreas peligrosas o bien algún daño físico tanto a los seres vivos como al equipo.

Una vez lograda la unión equipotencial a un punto común, debe realizarse una conexión entre dicho punto y la red del sistema de puesta a tierra de la instalación.

2.3.14. Artículo 4.4.1.6 – Unión Equipotencial y Blindaje Electromagnético [1]

Cuando un rayo incide sobre la estructura o edificio, sobre los elementos de intercepción del SEPTE o en las cercanías del edificio (hasta unos 10 km), se generan corrientes indeseables a lo largo de las partes metálicas, ya sean conducidas o inducidas. La circulación de estas corrientes no deseadas produce diferencias de potencial entre diversos puntos de la instalación y campos magnéticos que pueden afectar los equipos electrónicos sensibles ubicados en la instalación, y generar corrientes circulantes y potenciales en los circuitos de baja tensión. Estas corrientes no deseadas y sus efectos adversos no pueden evitarse, pero si reducirse mediante las siguientes medidas:

- a) Aumentar la distancia de separación entre los elementos metálicos susceptibles de llevar corriente de rayo y equipo a protegerse.
- b) Disminuir el campo eléctrico alrededor y al exterior del conductor que lleva la corriente del rayo.
- c) Definir trayectorias de alambrado de tal manera que se reduzcan los acoplamientos magnéticos, así como considerar el blindaje de los mismos.
- d) Aplicar medidas de unión equipotencial.

El inciso a) está relacionado con la posición de los conductores que llevan corriente de rayo (conductores de bajada o acero estructural de la instalación), así como de la ubicación de los equipos a proteger en la instalación, para lograr que el campo magnético que pueda acoplarse a los equipos sea menor.

El inciso b) está relacionado con todas aquellas medidas aplicadas para reducir la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos que puedan acoplarse con el equipo el equipo a proteger, ya sea por distancia o por medios de confinamiento.

El inciso c) está relacionado con la definición de las trayectorias del cableado para reducir el área de acoplamiento y medidas de blindaje, reduciendo las tensiones inducidas generadoras de corrientes indeseables.

Finalmente, en el inciso d), se indica que la unión equipotencial proporciona una medida de reducción de diferencias de potencial dañinas, reduciendo la posibilidad de generar corrientes circulantes indeseables.

Deben aplicarse las medidas de reducción de potenciales dañinos y corrientes circulantes indicadas anteriormente, independientemente de que se tenga instalado o no un SEPTE en la instalación a proteger.

La canalización metálica debe unirse entre secciones para el cableado principal de la estructura y para suministrar una trayectoria de baja impedancia para la corriente de rayo que pueda circular por ella. La canalización metálica proporciona un buen blindaje para el cableado contra los efectos de acoplamiento magnético. Ninguna parte del cableado (eléctrico o de señalización) debe estar fuera de la canalización metálica, y los supresores de sobretensión transitoria (SSTT) deben instalarse en el punto de entrada de la canalización metálica, generalmente definido por el tablero secundario de alimentación eléctrica.

2.3.15. Artículo 5.1 - Sistema de Protección Contra Descargas Atmosféricas de Estructuras con Peligro de Fuego y/o Explosión – Generalidades [1]

Este tipo de instalaciones son aquellas en las que se manejan, distribuyen, fabrican o almacenan productos inflamables, ya sean sólidos, líquidos, gases, vapores o polvos. El diseño e instalación de un SPTE debe llevarse a cabo principalmente para ofrecer uno o varios puntos preferentes de impacto para el rayo en la protección de estructuras o elementos donde exista el peligro de fuego y explosión ante la incidencia de rayo directo, reducir la posibilidad de presentarse arcos eléctricos, por rayo directo o por efecto de inducción, que generen ignición en áreas peligrosas y reducir la posibilidad de derretimiento de material debido al paso de la corriente de rayo, excepto al punto de impacto.

Es importante mencionar que, al igual que para instalaciones ordinarias o comunes, la aplicación de los criterios de protección indicados en esta sección no siempre evita la posibilidad de la generación de arcos eléctricos y efectos dañinos. Sin embargo, su aplicación reduce considerablemente los efectos de daño.

Debido a los riesgos de fuego y explosión al que se exponen este tipo de instalaciones por la incidencia de rayo, la protección debe realizarse mediante la instalación de un SEPTE aislado, a menos que se indique lo contrario.

Para la protección de este tipo de instalaciones, la unión equipotencial representa un factor importante que debe satisfacerse completamente, ya que una sola conexión mal realizada u omitida puede producir arcos eléctricos, produciendo a su vez zonas de alta temperatura que pueden generar condiciones para la ignición. El único arco que no puede evitarse es el canal principal del rayo.

En esta sección, cuando se indique la instalación de un SEPTE aislado, este debe ser diseñado con un Nivel I de protección, y sus elementos de intercepción y de conducción de la corriente del rayo deben estar a una distancia mínima de 2 m de cualquier elemento de la estructura a proteger o mayor si la distancia de seguridad así lo determina, conforme a lo indicado. Este criterio aplica tanto para una SEPTE formado por elementos metálicos verticales, cables aéreos tendidos horizontalmente o por una combinación de ambos. Si se utilizan hojas metálicas como elemento aéreo de protección del SEPTE aislado, debe comprobarse que el espesor de la lámina cumpla con lo indicado y que exista continuidad eléctrica en sus partes.

2.3.16. Artículo 5.2 - Instalaciones que Contienen Material Sólido con Peligro de Fuego y/o Explosión [1]

Para estas instalaciones, la protección debe llevarse a cabo mediante la implementación de un SEPTE aislado, de acuerdo a los criterios indicados. Cuando la cantidad de material sólido explosivo en la instalación sea pequeña (como el utilizado en un laboratorio), o el material explosivo este almacenado en un contenedor cerrado, completamente metálico con un espesor mínimo de 5 mm, eléctricamente continuo y conectado al sistema de protección a tierra, el nivel de riesgo puede ser aceptable, por lo que puede omitirse la instalación de un SEPTE aislado, satisfaciendo en todo momento las medidas de protección del SEPTE.

2.3.17. Artículo 5.3 - Contenedores para Material Líquido o Gaseoso con Peligro de Fuego y/o Explosión [1]

Estos tipos de contenedores pueden ser de almacenamiento de material inflamable o de procesos con sustancias inflamables o peligrosas. En general, puede omitirse la instalación de un SEPTE aislado (ser auto protegido) si se cumplen todas las siguientes condiciones:

- a) El cuerpo metálico debe tener un espesor mínimo de 5 mm en cualquier sección.
- b) El techo del cuerpo metálico debe estar libre de compuertas abiertas.
- c) Exista continuidad entre las partes del cuerpo metálico y se garantice la unión entre sus partes por medios atornillados o de soldadura.
- d) En caso de tener válvulas de alivio, estas deben operar correctamente y deben tener un dispositivo de protección contra penetración de flama al interior del contenedor.
- e) No deben tener emanaciones excesivas de vapores inflamables que puedan generar ignición ante un evento de rayo cercano o directo.
- f) No deben existir elementos susceptibles en el cuerpo del contenedor que puedan ser dañados por la circulación de la corriente de rayo o alcanzados por impacto de rayo, ya que esta condición pone en riesgo la integridad física del contenedor o confinamiento de la sustancia almacenada o en proceso.
- g) El cuerpo metálico del contenedor debe unirse al sistema de puesta a tierra.

En caso de que alguna de las condiciones anteriores o se cumpla, debe instalarse un SEPTE aislado para la protección contra rayo. Cuando el cuerpo del contenedor no sea metálico debe utilizarse un SEPTE aislado. Cuando se instale un SEPTE aislado como medio de protección, los mástiles utilizados en el SEPTE deben conectarse al sistema de puesta a tierra del contenedor.

2.3.18. Artículo 5.4 - Instalaciones Diversas con Peligro de Fuego y Explosión [1]

En instalaciones con procesos industriales, existe una diversidad de estructuras que deben protegerse de acuerdo con el tipo de estructura, contenido, proceso manejado y peligrosidad, como contenedores(de almacenamiento o de procesos), instalaciones de procesos, tubería asociada, edificios administrativos, áreas de trabajo, almacenes, etc.

2.3.19. Artículo 5.4.1 - Áreas de Procesos [1]

Las áreas de procesos se caracterizan por tener estructuras metálicas muy altas (por ejemplo, reactores, enfriadores, endulzadoras). Generalmente, este tipo de estructuras están construidas con elementos metálicos con un espesor mayor a 5 mm, lo que les permite aplicar el criterio de autoprotección. Sin embargo, pueden existir elementos metálicos sobre o alrededor de estas estructuras que no cumplan con el requisito de espesor, por lo que deben instalarse terminales aéreas de intercepción que utilicen el mismo cuerpo de la estructura como conductor de bajada para evitar la incidencia directa de rayo sobre los elementos metálicos más sensibles. Es importante comprobar los procesos desarrollados dentro de este tipo de estructuras no representen un riesgo de producir ignición al paso de la corriente del rayo a lo largo del cuerpo de la estructura que comprometa la integridad física de la estructura, el proceso y su entorno. En caso de que represente un peligro debe instalarse un SEPTE aislado.

Todas las estructuras metálicas ubicadas en las áreas ubicadas en las áreas de procesos deben conectarse al sistema de puesta a tierra por lo menos en un punto de conexión por elemento, conforme lo indicado en la NOM-001-SEDE.

Todos los edificios que se encuentren dentro de un perímetro del área de procesos (almacenes, centros de capacitación, cuartos de control) y una distancia de 50 m, deben de protegerse mediante un SEPTE con nivel I de protección, e instalar un SIPTE.

2.3.20. Artículo 5.4.3 – Elementos de Gran Altura [1]

Todos aquellos elementos metálicos de gran altura ajenos a las instalaciones con riesgo de fuego y explosión, tales como mástiles de bandera, torres de comunicaciones y de radio, no deben estar dentro de un radio de m de las estructuras de alto riesgo de fuego y explosión. Esto también aplica para la plantación de árboles de gran altura.

2.3.21. Artículo 5.4.4 - Edificios Administrativos [1]

Los edificios administrativos deben de protegerse con los criterios indicados para instalaciones ordinarias o comunes, aplicando el concepto de protección integral, es decir, la instalación de un SEPTE (previo de análisis de evaluación de riesgo) y un SIPTE, especialmente para todos aquellos edificios con equipo electrónico sensible.

2.3.22. Artículo 5.4.5 - Estaciones de Llenado [1]

En estaciones de llenado para contenedores móviles, camiones, embarcaciones, etc., las tuberías deben conectarse a tierra de acuerdo a lo indicado. Asimismo, el acero estructural de la estación de llenado o el acero del concreto armado deben también conectarse al sistema de puesta a tierra de acuerdo a lo indicado, el cual debe estar instalado alrededor de la estación, formando una trayectoria cerrada e interconectado con todos los sistemas de puesta a tierra instalados en el predio de la instalación completa.

La estructura que alberga la estación de llenado debe protegerse con un SEPTTE, aislado o no aislado siguiendo los procedimientos indicados, dependiendo del tipo de material de la estructura y de la ubicación física de las bombas. La protección debe ser de nivel I.

2.3.23. Artículo 6.2.1 - Terminales Aéreas [1]

Tabla 2.5. Materiales y dimensiones mínimas de las terminales aéreas.

| Material | Sección transversal mm ² |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Cobre | 35 |
| Aluminio | 70 |
| Acero inoxidable | 50 |
| NOTA. Para el acero inoxidable tipo aleación 304. | |

Tabla 2.6. Espesor mínimo de las hojas y tubos metálicos para terminales aéreas.

| Material | Espesor mm |
|----------|---------------|
| Acero | 4 |
| Cobre | 5 |
| Aluminio | 7 |

2.3.24. Artículo 7.2.3 - Factores de Comprobación [1]

El intervalo entre inspecciones generalmente debe determinarse por los factores siguientes:

- a) Clasificación de la estructura, especialmente para aquellas instalaciones donde los daños pueden ser fatales o desastrosos.
- b) Nivel de protección del que dispone la instalación.
- c) Condiciones ambientales, por ejemplo, corrosivas.

d) Materiales utilizados en el SEPTE.

e) Condiciones del suelo.

La comprobación periódica debe realizarse al término de la temporada de estiaje con el fin de evaluar los elementos del SEPTE con las condiciones más críticas, especialmente el sistema de puesta a tierra. La comprobación, adicional a la programada debe realizarse siempre que se lleve a cabo una actividad de modificación, reparación, alteración, adición o retiro de elementos del SEPTE experimentan daños severos durante dichas actividades.

La comprobación programada debe realizarse cada doce meses, o antes si las condiciones ambientales con corrosivas, el suelo es altamente corrosivo, se realizan actividades que puedan afectar la integridad física de los elementos del sistema de puesta a tierra o cuando los daños en las instalaciones puedan ser fatales o desastrosos.

Métodos de protección

En este capítulo se describen los métodos de protección que se utilizan para calcular la cantidad de puntas captadoras que se necesitan en un edificio de acuerdo a los perfiles de protección, mencionándose también la aplicación de los métodos para los parques eólicos.

3.1. MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE [1]

El método de la esfera rodante consiste en rodar una esfera encima de la instalación a proteger o cualquier otro objeto en contacto con la tierra, capaz de actuar como un punto de intercepción de la corriente de rayo. La esfera imaginaria debe rodarse (desde el nivel de tierra) hacia la estructura a proteger e instalar una terminal aérea en el primer punto de contacto con la estructura, véase Figura 3.1.

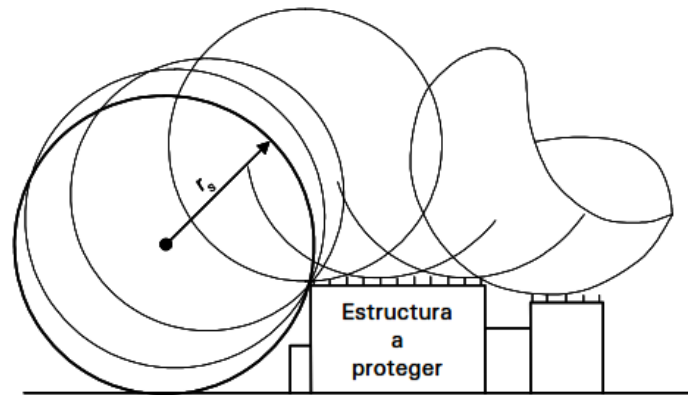


Figura 3.1. Aplicación del método de la esfera rodante para definir la altura y posición de las terminales aéreas de intercepción de rayo.

Esta primera terminal aérea se conoce como pivote, cuya altura debe ser suficiente para que la esfera no toque la estructura cuando esta se apoye sobre la punta de la terminal aérea pivote. Una vez especificado el primer punto de sacrificio para la corriente de rayo, debe rodarse la esfera por encima de la terminal aérea pivote y hacia el techo de la estructura e instalarse una terminal aérea de intercepción en todos aquellos puntos donde la esfera imaginaria toque la estructura o edificio a proteger, véase Figura 3.1. Este proceso debe mantenerse hasta cubrir la totalidad del edificio o estructura hasta cubrir la totalidad del edificio o estructura a proteger. El espacio comprendido bajo el rodamiento de la esfera representa el volumen protegido.

Por su característica volumétrica, el método de la esfera rodante puede aplicarse sobre cualquier estructura. El radio de la esfera rodante r_s se indica en la Tabla 3.1 Este radio se selecciona de acuerdo con el nivel de protección recomendado en la Tabla 2.4.

Tabla 3.1. *Altura de las terminales aéreas verticales de acuerdo con el nivel de protección para el método de la esfera rodante.*

| 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) / m |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------|
| | r_s (m) | i (kA) | |
| 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.

La Tabla 3.2 muestra la probabilidad de incidencia de rayos medidos en un cierto tiempo (ocurrencia). Estos valores de incidencia para la corriente de rayo permiten estimar la eficiencia de sistema de protección, indicado en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2. *Probabilidad de incidencia del rayo de las corrientes de rayo.*

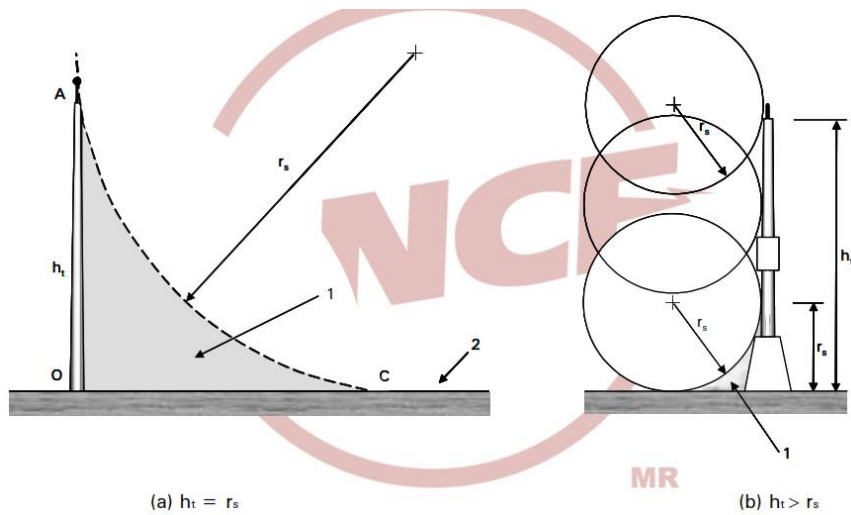
| | | |
|------|--------------------------|--------|
| 1% | de los rayos exceden los | 200 kA |
| 10 % | de los rayos exceden los | 80 kA |
| 50% | de los rayos exceden los | 28 kA |
| 90% | de los rayos exceden los | 8 kA |
| 98% | de los rayos exceden los | 3 kA |

Tabla 3.3. *Eficiencia del sistema de acuerdo con el nivel de protección.*

| Nivel de protección | Eficiencia del SEPTE |
|---------------------|----------------------|
| I | 98% |
| II | 95% |
| III | 90% |
| IV | 80% |

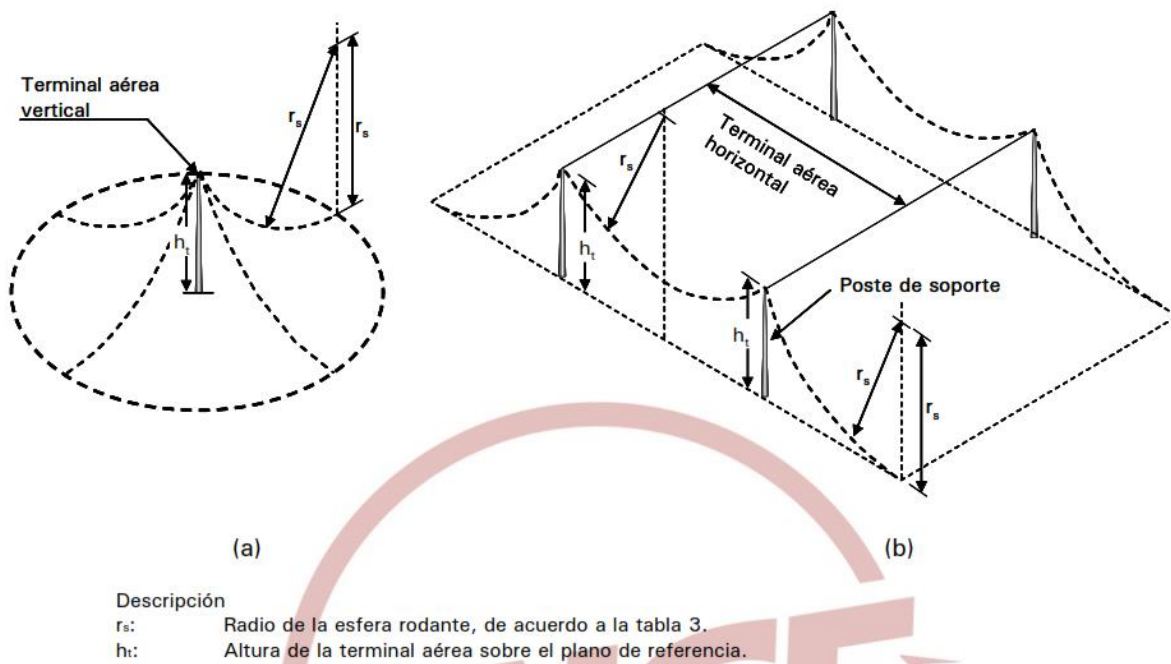
En la evaluación de la protección con el método de la esfera rodante, la altura máxima efectiva de la terminal aérea a partir del plano a proteger es igual al radio utilizado para la

esfera rodante como se ilustra en la Figura 3.2. El espacio de protección de la terminal aérea puede apreciarse en la Figura 3.3.



Descripción
 1: Espacio a proteger.
 2: Plano de referencia.
 r_s : Radio de la esfera rodante, de acuerdo a la tabla 3.
 OC: Longitud del área a protegerse.
 A: Punto más alto de la terminal aérea vertical u horizontal.
 h_t : Altura de la terminal aérea sobre el plano de referencia.
 La longitud $h_t - r_s$ en la opción (b) no proporciona protección adicional.

Figura 3.2. Altura máxima efectiva de una terminal aérea a partir del plano a proteger.



Descripción
 r_s : Radio de la esfera rodante, de acuerdo a la tabla 3.
 h_t : Altura de la terminal aérea sobre el plano de referencia.

Figura 3.3. Espacio de protección (volumen bajo las líneas discontinuas) de una terminal aérea (a) vertical y (b) horizontal obtenido mediante el método de la esfera rodante.

3.1.1. Método de la Esfera Rodante para Generadores Eólicos [10]

La protección externa contra rayos consta de instalación captadora, instalación derivadora y sistema de puesta a tierra, y protege contra daños mecánicos y contra incendios. Las descargas de rayo en aerogeneradores tienen lugar, sobre todo, en las palas del rotor. Por eso, en dichos puntos se integran elementos cuya finalidad es actuar como receptores de la descarga del rayo (Figura 3.4).



Figura 3.4. *Aerogeneradores con receptores integrados en las palas.*

Para conseguir que la corriente del rayo fluya a tierra de manera controlada, los receptores integrados en las palas del rotor, se conectan con la góndola mediante un conductor de interconexión. A su vez, cepillos de fibra de carbono o vías de chispas aéreas puentean los rodamientos de bolas en la cabeza de la góndola a fin de evitar que se produzca soldadura en las piezas giratorias de la estructura.

El método de la esfera rodante se utiliza para determinar los puntos potenciales de impacto de una descarga en el generador eólico (a excepción de las aspas del rotor). Para los generadores eólicos, es recomendado usar un sistema de protección con descargas de nivel I. Por lo tanto, una esfera rodante con un radio $r = 20$ m debe ser rodada alrededor del generador eólico para determinar los puntos de impacto, véase Figura 3.5 [11].

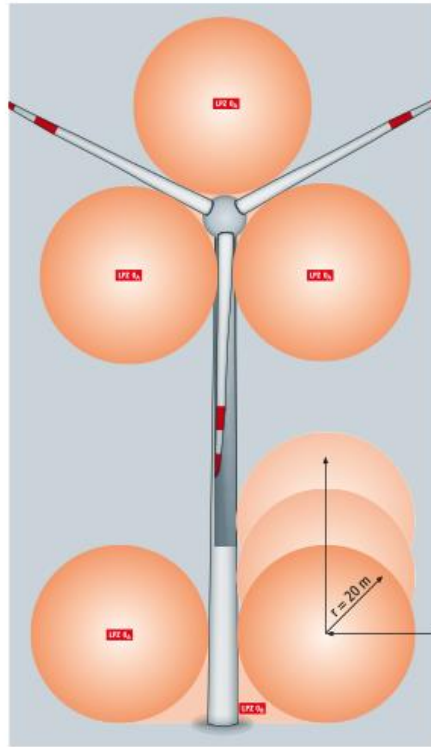


Figura 3.5. Método de la esfera rodante para generador eólico.

Para proteger frente a la descarga de rayo los equipamientos instalados en el exterior de las góndolas de los aerogeneradores, como por ejemplo los anemómetros, se utilizan puntas captadoras o “jaulas captadoras” (Figura 3.6).

Como instalación derivadora se emplea la propia torre del aerogenerador en el caso de que sea metálica. En el supuesto de torres construidas de hormigón armado, se utilizan conductores embebidos en el mismo. El sistema de puesta a tierra del aerogenerador está constituido por una toma de tierra de cimientos en la base de la torre y la conexión en forma de malla con la toma de tierra de cimientos del edificio de operaciones. De este modo se consigue una “superficie equipotencial” que, en caso de descargas de rayo, impide que se originen diferencias de potencial [10].



Figura 3.6. Protección contra rayos de anemómetros situados en un aerogenerador.

3.2. MÉTODO DEL ÁNGULO DE PROTECCIÓN [10]

El método del ángulo de protección se deriva del modelo del rayo eléctrico-geométrico. El ángulo de protección viene determinado por el radio de la esfera rodante. El ángulo de protección comparable con el radio rodante se deduce cuando una línea inclinada corta a la esfera rodante de tal manera que las superficies resultantes son igual de grandes, véase Figura 3.7.

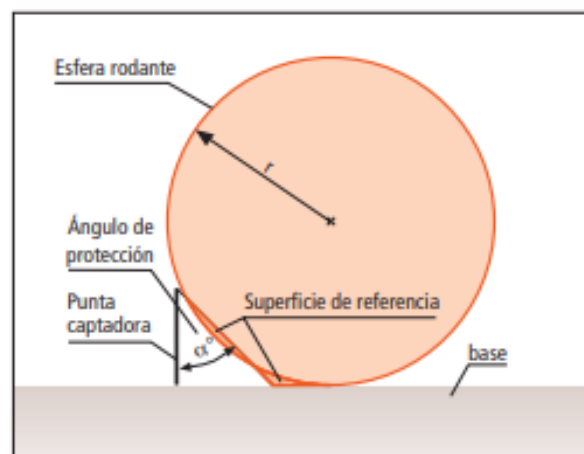


Figura 3.7. Ángulo de protección y radio equivalente de la esfera rodante.

Este método debe aplicarse a los edificios con dimensiones simétricas o para estructuras montadas sobre cubierta. El ángulo de protección depende del nivel de la protección y de la altura de los dispositivos captadores sobre la superficie de referencia. Véase Figura 3.8.

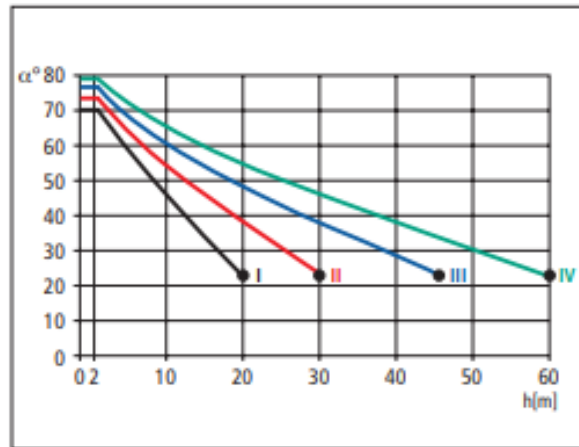


Figura 3.8. *Angulo de protección “alfa” en función de la altura h y el nivel de protección.*

Los conductores captadores, las puntas captadoras, los mástiles y los cables deben estar dispuestos de tal manera que todas las partes o piezas de la edificación que se pretende proteger se encuentren dentro del volumen de protección de la instalación captadora. La zona protegida puede tener forma de cono o bien forma de tienda al tender un cable (Figura 3.9 a Figura 3.11.).

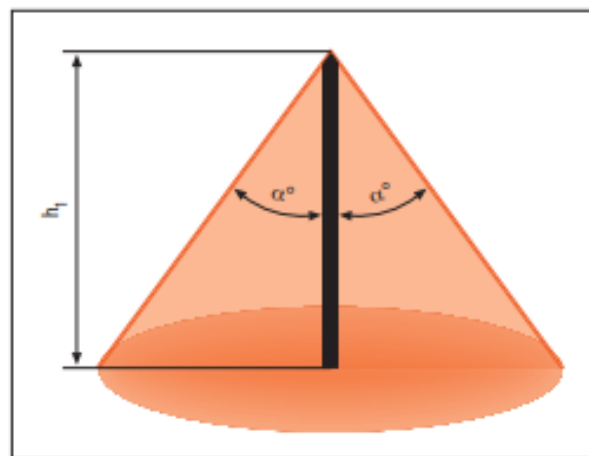


Figura 3.9. *Zona protegida cónica.*

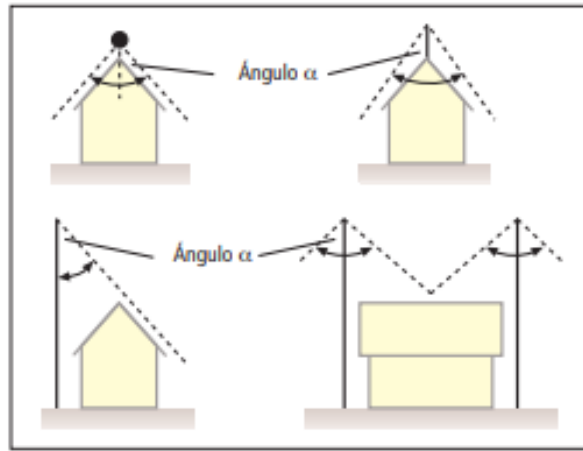


Figura 3.10. Ejemplos de sistemas de protección con ángulo de protección alfa.

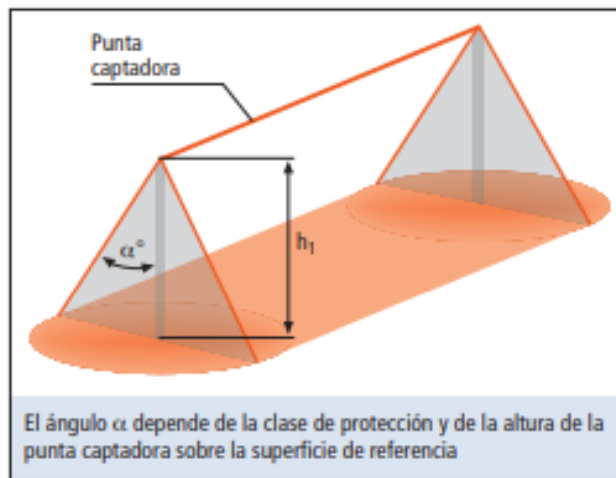


Figura 3.11. Espacio protegido mediante un cable tendido.

Si se instalan puntas captadoras sobre la superficie del tejado para protección de estructuras situadas sobre el mismo, al ángulo de protección alfa puede ser distinto. En la Figura 3.12 la superficie de referencia para el ángulo de protección alfa1 es la superficie del tejado. El ángulo de protección alfa2 tiene como superficie de referencia el suelo y de este modo el ángulo alfa2 según Figura 3.12 y es más pequeño que alfa1.

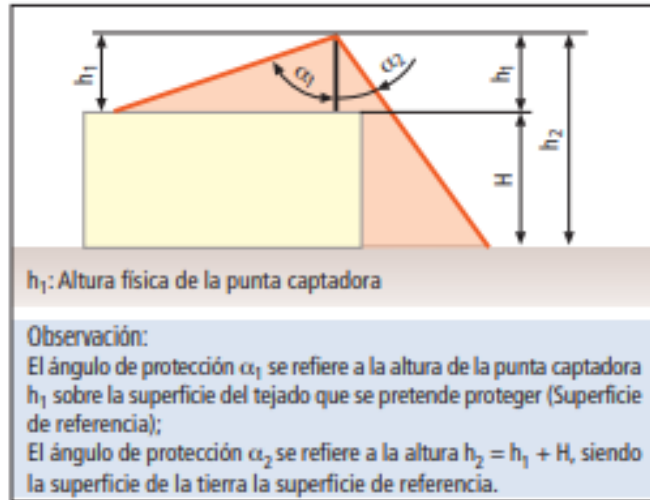


Figura 3.12. Sistema de protección contra rayos, volumen protegido por una punta captadora vertical.

Para determinar el ángulo de protección se utilizan diferentes conceptos, como el ángulo optimista, el ángulo de áreas equivalentes y el ángulo conservador, véase Figura 3.13. El ángulo optimista ha demostrado presentar grandes fallas de blindaje. El concepto aplicado es el del ángulo de áreas equivalentes, el cual indica que el área cuantitativa de protección proporcionada por el ángulo α es igual al área de protección de la esfera rodante. El ángulo de protección se forma por los segmentos AO y AE, véase Figura 3.13, el ángulo de protección α y la distancia de protección horizontal R para el concepto del ángulo de áreas equivalentes, indicado por el ángulo α_2 en la Figura 3.13, se determinan por las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3 siguientes [1] :

$$R = (h + r_s) \frac{R_1}{h} - \frac{r_s^2}{h} \text{Arccos} \left(1 - \frac{h}{r_s} \right) \quad (3.1)$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{R}{h} \quad (3.2)$$

$$R_1 = (2r_s h - h^2)^{0.5} \quad (3.3)$$

Donde:

h es la altura de la terminal aérea, en metros.

r_s es el radio de la esfera rodante, en metros.

α es el ángulo de protección, de acuerdo al concepto de áreas equivalentes.

R es la distancia de protección de acuerdo al ángulo α .

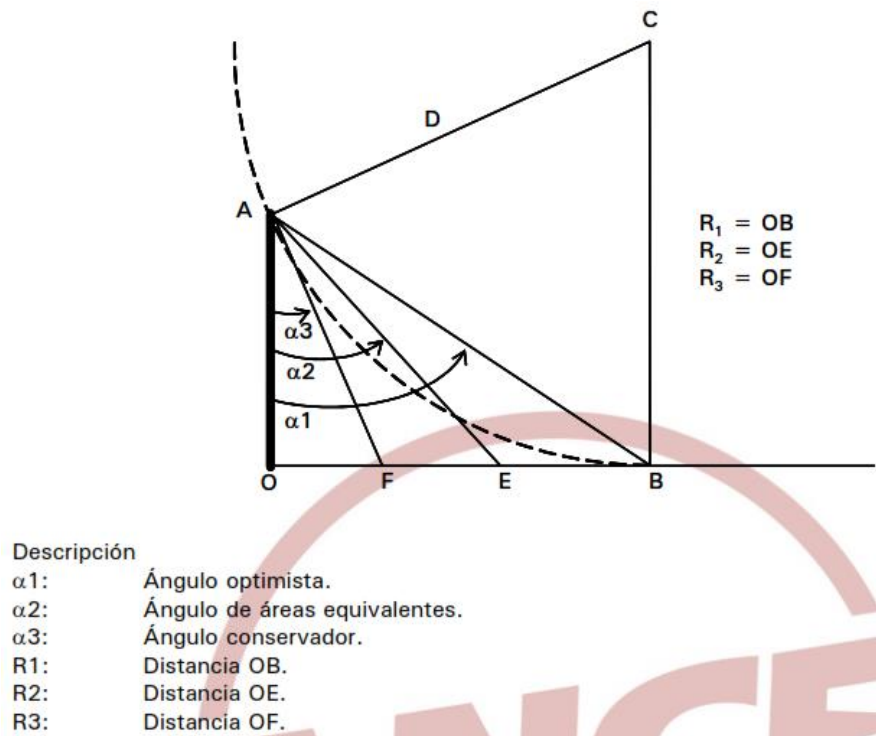


Figura 3.13. *Conceptos utilizados en el ángulo de protección.*

3.3. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS AL SECTOR INDUSTRIAL

Actualmente se buscan métodos prácticos para el desarrollo de los métodos empíricos que se encuentran en la literatura, y necesitan ser aplicados en la industria.

Los métodos usados en este software de diseño son aplicados en una gran cantidad de sectores industriales que necesitan una protección externa contra las descargas atmosféricas de acuerdo a su nivel de valoración de riesgo, algunos de los sectores industriales donde se aplicarse son la industria metalúrgica, petroquímica, textil, automovilística y donde todo proceso pueda tener daños irreversibles causados por el impacto de las descargas atmosféricas.

Algunos de los tipos de estructuras que necesitan protegerse en las zonas industriales son:

- Almacenes de productos de materia inflamable
- Silos de almacenaje de materia prima
- Edificios administrativos
- Cuartos de control de operaciones
- Sitios de computación
- Estaciones de llenado de ferrotolvas
- Cuartos de tableros eléctricos de control y potencia
- Antenas de comunicación en edificios industriales

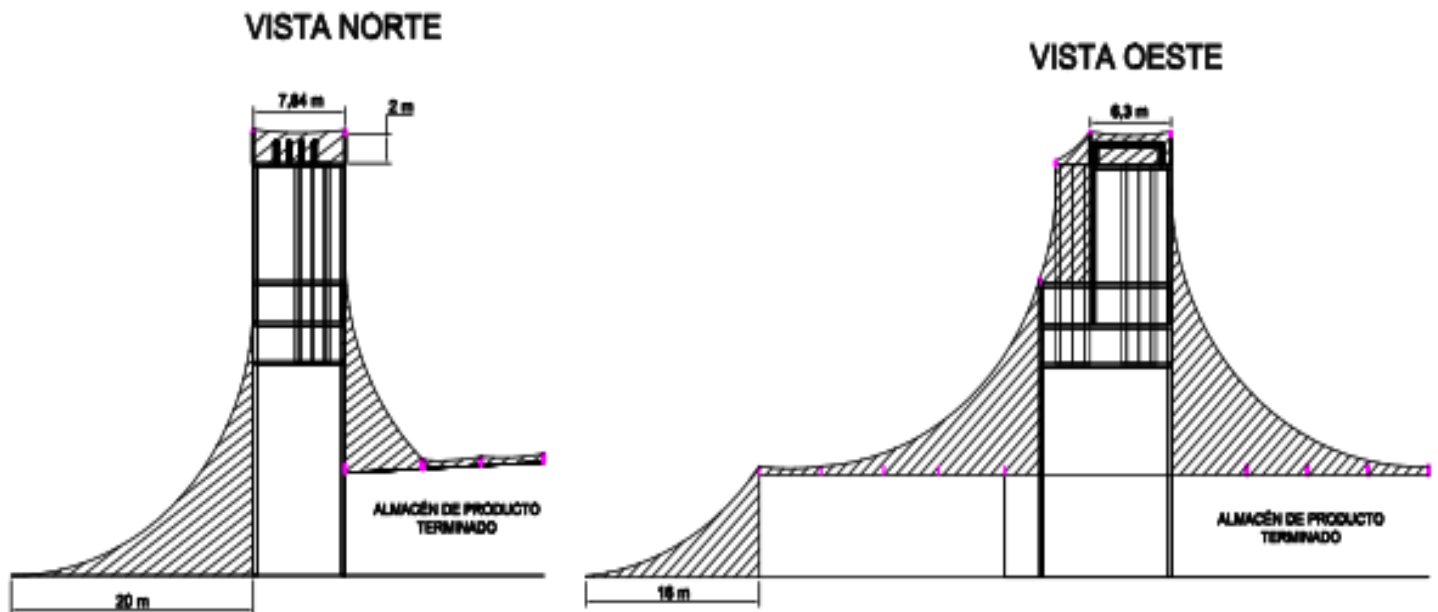


Figura 3.14. Silos de almacenaje como ejemplo de aplicación.

Desarrollo del software

En este capítulo se muestra el desarrollo de la metodología de funcionamiento del código de programación y la interfaz gráfica del software de cálculo, además de mostrarse su diagrama de flujo.

4.1. METODOLOGÍA

La presente metodología muestra el paso a paso del programa de diseño de pararrayos para edificios industriales y parques eólicos, en esta sección se describe el código fuente de programación computacional paso a paso de acuerdo a los métodos de diseño, los cuales se usaron en el software matemático MATLAB como se muestra en la Figura 4.1.

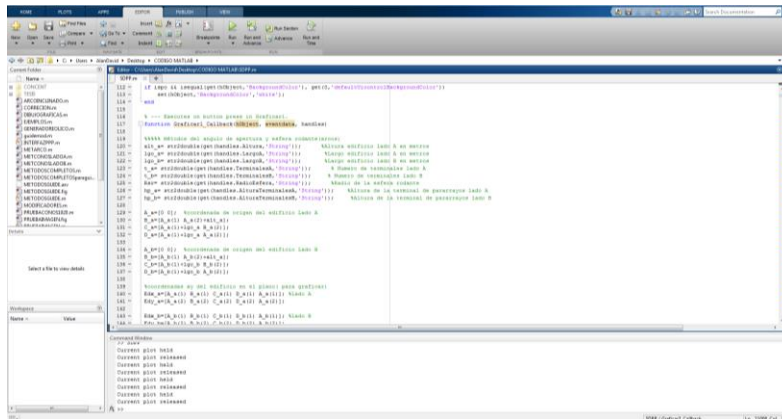


Figura 4.1. Entorno de desarrollo MATLAB.

El código de programación se concentra finalmente en una interfaz de usuario GUI en MATLAB con la que se trabajó como se ve en el ejemplo de la Figura 4.2.

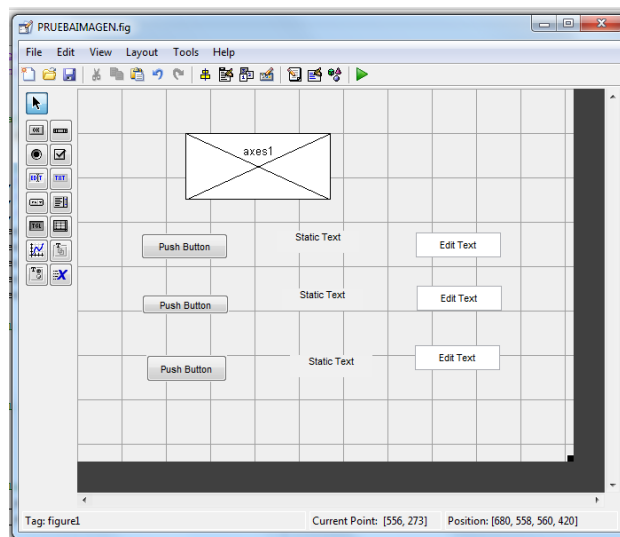


Figura 4.2. Interfaz gráfica de usuario.

En el software de programación, el código se divide en tres tipos de tareas de cálculo al momento de realizar la simulación gráfica, y en la interfaz de usuario se muestran los tres diferentes tipos de simulaciones gráficas, las cuales son:

1. Edificios con torre de comunicación
2. Edificios industriales
3. Parques eólicos

El software programa ecuaciones conocidas de cálculo contenidas en los documentos normativos, además utiliza ecuaciones fundamentales de la trigonometría entre curvas y rectas y realiza cálculos en dos dimensiones de ángulos y distancias entre puntos. La metodología que usa el software, consiste en los siguientes puntos:

4.1.1. Edificios Industriales con Torre de Comunicación

1. Se introduce el tamaño de la esfera rodante en metros de acuerdo a su nivel de protección.
2. El siguiente parámetro es introducir la altura de la terminal de pararrayos, de acuerdo a los datos que se manejen comercialmente.
3. Después se introducen los datos de la torre, como lo es su altura y la posición de la torre en el eje horizontal en los lados A y B del edificio.
4. Por último los datos del edificio se introducen, los cuales son la altura y el largo de los lados A y B, véase Figura 4.3.

| Edificios Con Torre De Comunicación | |
|-----------------------------------------|-----|
| Altura De La Terminal: | 1.2 |
| Altura De La Torre: | 20 |
| Posición De La Torre Lado A: | 8 |
| Posición De La Torre Lado B: | 10 |
| Altura Edificio: | 5 |
| Largo Edificio Lado A: | 15 |
| Largo Edificio Lado B: | 20 |
| <input type="button" value="Graficar"/> | |

Figura 4.3. Sección del software para los edificios con torre de comunicación.

4.1.2. Edificios Industriales

1. Se introduce el tamaño de la esfera rodante en metros de acuerdo a su nivel de protección.
2. El siguiente paso es introducir la altura de las terminales de pararrayos para los lados A y B del edificio, de acuerdo a los datos que se manejen comercialmente.
3. Teniendo el tamaño de las terminales de pararrayos, se prosigue a introducir la cantidad de terminales para los lados A y B del edificio.
4. Por último los datos del edificio se introducen, los cuales son la altura y el largo de los lados A y B, véase Figura 4.4.

Figura 4.4. Sección del software para los edificios industriales.

4.1.3. Parques Eólicos

1. Antes de obtener las dimensiones del generador eólico, se comienza seleccionando el tamaño de la esfera rodante de acuerdo al nivel de protección que necesita el generador eólico, en su caso puede ser nivel I o nivel II.
2. Después se introducen las medidas básicas del generador eólico en dos dimensiones en metros, como son la altura del mástil, el diámetro del mástil y el altura de las palas del rotor.
3. A continuación, el software arroja tres tipos de simulaciones gráficas para las posiciones de las aspas del generador, véase Figura 4.5.

Figura 4.5. Sección del software para los parques eólicos.

4.2. DESARROLLO EN MATLAB ®

A continuación se muestra el código de programación de los métodos de simulación en la interfaz gráfica GUI de MATLAB®.

```
function varargout = SDPP(varargin)
% SDPP MATLAB code for SDPP.fig
%   SDPP, by itself, creates a new SDPP or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = SDPP returns the handle to a new SDPP or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   SDPP('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in SDPP.M with the given input arguments.
%
%   SDPP('Property','Value',...) creates a new SDPP or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value
%   pairs are
%   applied to the GUI before SDPP_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property
%   application
%   stop. All inputs are passed to SDPP_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows
%   only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help SDPP

% Last Modified by GUIDE v2.5 21-Feb-2020 12:24:34

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @SDPP_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @SDPP_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
```



```

% --- Executes just before SDPP is made visible.
function SDPP_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to SDPP (see VARARGIN)

axes(handles.axes6)
background=imread('TECNM.jpg');
axis off
imshow(background);

% Choose default command line output for SDPP
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes SDPP wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = SDPP_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function RadioEsfera_Callback(hObject, eventdata, handles)

function RadioEsfera_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function AlturaTerminalesA_Callback(hObject, eventdata, handles)

function AlturaTerminalesA_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function TerminalesA_Callback(hObject, eventdata, handles)

function TerminalesA_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function AlturaTorre_Callback(hObject, eventdata, handles)

function AlturaTorre_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Altura_Callback(hObject, eventdata, handles)

function Altura_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in Graficar1.
function Graficar1_Callback(hObject, eventdata, handles)

%%%% Métodos del angulo de apertura y esfera rodante(arcos)
alt_a= str2double(get(handles.Altura,'String')); %Altura edificio
lado A en metros
lgo_a= str2double(get(handles.LargoA,'String')); %Largo edificio
lado A en metros
lgo_b= str2double(get(handles.LargoB,'String')); %Largo edificio
lado B en metros
t_a= str2double(get(handles.TerminalesA,'String')); % Numero de
terminales lado A
t_b= str2double(get(handles.TerminalesB,'String')); % Numero de
terminales lado B
Rsr= str2double(get(handles.RadioEsfera,'String')); %Radio de la
esfera rodante
hp_a= str2double(get(handles.AlturaTerminalesA,'String')); %Altura
de la terminal de pararrayos lado A
hp_b= str2double(get(handles.AlturaTerminalesB,'String'));
%Altura de la terminal de pararrayos lado B

A_a=[0 0]; %coordenada de origen del edificio Lado A
B_a=[A_a(1) A_a(2)+alt_a];
C_a=[A_a(1)+lgo_a B_a(2)];
D_a=[A_a(1)+lgo_a A_a(2)];

A_b=[0 0]; %coordenada de origen del edificio Lado B
B_b=[A_b(1) A_b(2)+alt_a];
C_b=[A_b(1)+lgo_b B_b(2)];
D_b=[A_b(1)+lgo_b A_b(2)];

```

```

%coordenadas xy del edificio en el plano( para graficar)
Edx_a=[A_a(1) B_a(1) C_a(1) D_a(1) A_a(1)]; %Lado A
Edy_a=[A_a(2) B_a(2) C_a(2) D_a(2) A_a(2)];
Edx_b=[A_b(1) B_b(1) C_b(1) D_b(1) A_b(1)]; %Lado B
Edy_b=[A_b(2) B_b(2) C_b(2) D_b(2) A_b(2)];

% Superficie del edificio (no se modifica) Lado A
A0_a=[A_a(1)-15 0]; %coordenadas del suelo
B0_a=[D_a(1)+15 0]; %coordenadas del suelo
% puntos en el plano
Sx_a=[A0_a(1) B0_a(1)];
Sy_a=[A0_a(2) B0_a(2)];

% Superficie del edificio (no se modifica) Lado B
A0_b=[A_b(1)-15 0]; %coordenadas del suelo
B0_b=[D_b(1)+15 0]; %coordenadas del suelo
% puntos en el plano
Sx_b=[A0_b(1) B0_b(1)];
Sy_b=[A0_b(2) B0_b(2)];

n_a=t_a-1; %separación entre puntas
dist_a=(B_a(1)+C_a(1))/n_a; %distancia de separación para X
n_b=t_b-1; %separación entre puntas
dist_b=(B_b(1)+C_b(1))/n_b; %distancia de separación para X

di=Rsr*2; %sirve para ajustar el axis
hpvt_a=alt_a+hp_a; % Altura para las terminales pivote en las orillas
hpvt_b=alt_a+hp_b; % Altura para las terminales pivote en las orillas

%ciclo para puntas de ambos métodos
%base de puntas
xb_a=[B_a(1):dist_a:C_a(1)]; %X base Lado A
yb_a=[B_a(2)]; % Y base
xb_b=[B_b(1):dist_b:C_b(1)]; %X base Lado B
yb_b=[B_b(2)]; % Y base
%pico de puntas
xp_a=[B_a(1):dist_a:C_a(1)]; % X punta Lado A
yp_a=[B_a(2)+hp_a]; % Y punta
xp_b=[B_b(1):dist_b:C_b(1)]; % X punta Lado B
yp_b=[B_b(2)+hp_b]; % Y punta

% Variables del método de los ángulos %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%coordenadas para los ángulos de pivote IyD
Api_ac=[0 0]; %lado A
Dpd_ac=[Api_ac(1)+lgo_a Api_ac(2)];
Api_bc=[0 0]; %lado B
Dpd_bc=[Api_bc(1)+lgo_b Api_bc(2)];

```

```

%Distancias de apertura de ángulo en terminales pivote

R1pvt_ac=(2*Rsr*hpvt_a-hpvt_a^2)^0.5; % Distancia OB Lado A
Rpvvt_ac=(hpvt_a+Rsr)*(R1pvt_ac/hpvt_a)-(Rsr^2/hpvt_a)*acos(1-
hpvt_a/Rsr); % Es la distancia de protección de acuerdo al ángulo
alpha
alphaRadpvt_ac=atan(Rpvvt_ac/hpvt_a);
alphapvt_ac=rad2deg(alphaRadpvt_ac);
R1pvt_bc=(2*Rsr*hpvt_b-hpvt_b^2)^0.5; % Distancia OB Lado B
Rpvvt_bc=(hpvt_b+Rsr)*(R1pvt_bc/hpvt_b)-(Rsr^2/hpvt_b)*acos(1-
hpvt_b/Rsr); % Es la distancia de protección de acuerdo al ángulo
alpha
alphaRadpvt_bc=atan(Rpvvt_bc/hpvt_b);
alphapvt_bc=rad2deg(alphaRadpvt_bc);

%Distancias de apertura de ángulo en terminales en la parte interna
del edificio
%Lado A
R1_ac=(2*Rsr*hp_a-hp_a^2)^0.5;
R_ac=(hp_a+Rsr)*(R1_ac/hp_a)-(Rsr^2/hp_a)*acos(1-hp_a/Rsr); % Es la
distancia de protección de acuerdo al ángulo alpha
alphaRad_ac=atan(R_ac/hp_a); % ángulo de apertura de cono en radianes
alpha_ac=rad2deg(alphaRad_ac); % ángulo de apertura de cono en grados

%Lado B
R1_bc=(2*Rsr*hp_b-hp_b^2)^0.5;
R_bc=(hp_b+Rsr)*(R1_bc/hp_b)-(Rsr^2/hp_b)*acos(1-hp_b/Rsr); % Es la
distancia de protección de acuerdo al ángulo alpha
alphaRad_bc=atan(R_bc/hp_b); % ángulo de apertura de cono en radianes
alpha_bc=rad2deg(alphaRad_bc); % ángulo de apertura de cono en grados

%Ajuste para ángulos de protección

if dist_a/2 > R_ac;

    cpe_ac=0;
    bee_ac=0;

else dist_a/2 < R_ac;

Cr_ac=acot(hp_a/R_ac);
Ce_ac=rad2deg(Cr_ac);
cpe_ac=R_ac-(dist_a/2); % ajuste en el eje X
bee_ac=cpe_ac*cot(Cr_ac); % ajuste en el eje Y
Br_ac=atan(bee_ac/cpe_ac);
Be_ac=rad2deg(Br_ac);

end

```

```

%Coordenadas de la esfera
m_aa=lgo_a/n_a;
cm_aa=(lgo_a/n_a)/2;
d_aa=sqrt(Rsr^2-cm_aa^2);
e_aa=hpvt_a+d_aa;
c_aa=Rsr-hpvt_a;
B2_aa=atan(cm_aa/d_aa); %ángulo B entre terminales
hint_aa=hp_a-(Rsr-d_aa);

%Ajuste lados pivote
b_aa=sqrt(Rsr^2-c_aa^2); %cateto a
c1_aa=sqrt(hpvt_a^2+b_aa^2); %cateto c

%Lado izquierdo y derecho

if hpvt_a > Rsr ; % Para hacer que el arco no crezca de más

    C1_aa=pi/2 ; % Angulo C1 en radianes

    arc2_aa=(-pi/2:0.00001:(-pi/2+C1_aa)); %arco izquierdo
    xei_aa= Rsr*cos(arc2_aa)-Rsr;
    yei_aa= Rsr*sin(arc2_aa)+Rsr;

    arc_aa = ((-pi/2-C1_aa):0.0001:-pi/2); %arco derecho
    xed_aa = Rsr*cos(arc_aa)+lgo_a+Rsr;
    yed_aa = Rsr*sin(arc_aa)+Rsr;

else hpvt_a < Rsr;

C1_aa=acos((Rsr^2+Rsr^2-c1_aa^2)/(2*Rsr*Rsr)); % Angulo C1 en
radianes

arc2_aa=(-pi/2:0.00001:(-pi/2+C1_aa)); % arco izquierdo
xei_aa= Rsr*cos(arc2_aa)-b_aa;
yei_aa= Rsr*sin(arc2_aa)+Rsr;

arc_aa = ((-pi/2-C1_aa):0.0001:-pi/2); % arco derecho
xed_aa = Rsr*cos(arc_aa)+lgo_a+b_aa;
yed_aa = Rsr*sin(arc_aa)+Rsr;

end

%Arco entre terminales
arc3_aa= ((-pi/2-B2_aa):0.0001:(-pi/2+B2_aa));

```

```

%Propiedades de las acotaciones para ángulos de protección

%Acotaciones horizontales
ach11_ac=[0+0.4 -5+0.4];
ach12_ac=[0 -5];
ach13_ac=[0+0.4 -5-0.4];
ach14_ac=[lgo_a-0.4 -5+0.4];
ach15_ac=[lgo_a -5];
ach16_ac=[lgo_a-0.4 -5-0.4];
ACHx1_ac=[ach11_ac(1) ach12_ac(1) ach13_ac(1) ach12_ac(1) ach15_ac(1)
ach14_ac(1) ach15_ac(1) ach16_ac(1)];
ACHy1_ac=[ach11_ac(2) ach12_ac(2) ach13_ac(2) ach12_ac(2) ach15_ac(2)
ach14_ac(2) ach15_ac(2) ach16_ac(2)];

ach21_ac=[lgo_a+0.4 -2.5+0.4];
ach22_ac=[lgo_a -2.5];
ach23_ac=[lgo_a+0.4 -2.5-0.4];
ach24_ac=[lgo_a+Rpvt_ac-0.4 -2.5+0.4];
ach25_ac=[lgo_a+Rpvt_ac -2.5];
ach26_ac=[lgo_a+Rpvt_ac-0.4 -2.5-0.4];
ACHx2_ac=[ach21_ac(1) ach22_ac(1) ach23_ac(1) ach22_ac(1) ach25_ac(1)
ach24_ac(1) ach25_ac(1) ach26_ac(1)];
ACHy2_ac=[ach21_ac(2) ach22_ac(2) ach23_ac(2) ach22_ac(2) ach25_ac(2)
ach24_ac(2) ach25_ac(2) ach26_ac(2)];

ach31_ac=[0+0.4 hpvt_a+2+0.4];
ach32_ac=[0 hpvt_a+2];
ach33_ac=[0+0.4 hpvt_a+2-0.4];
ach34_ac=[R_ac-0.4 hpvt_a+2+0.4];
ach35_ac=[R_ac hpvt_a+2];
ach36_ac=[R_ac-0.4 hpvt_a+2-0.4];
ACHx3_ac=[ach31_ac(1) ach32_ac(1) ach33_ac(1) ach32_ac(1) ach35_ac(1)
ach34_ac(1) ach35_ac(1) ach36_ac(1)];
ACHy3_ac=[ach31_ac(2) ach32_ac(2) ach33_ac(2) ach32_ac(2) ach35_ac(2)
ach34_ac(2) ach35_ac(2) ach36_ac(2)];

%Acotaciones verticales
acv11_ac=[-Rpvt_ac-1-0.4 0+0.4];
acv12_ac=[-Rpvt_ac-1 0];
acv13_ac=[-Rpvt_ac-1+0.4 0+0.4];
acv14_ac=[-Rpvt_ac-1-0.4 alt_a-0.4];
acv15_ac=[-Rpvt_ac-1 alt_a];
acv16_ac=[-Rpvt_ac-1+0.4 alt_a-0.4];
ACVx1_ac=[acv11_ac(1) acv12_ac(1) acv13_ac(1) acv12_ac(1) acv15_ac(1)
acv14_ac(1) acv15_ac(1) acv16_ac(1)];
ACVy1_ac=[acv11_ac(2) acv12_ac(2) acv13_ac(2) acv12_ac(2) acv15_ac(2)
acv14_ac(2) acv15_ac(2) acv16_ac(2)];

acv21_ac=[-2.5-0.2 alt_a+0.2];
acv22_ac=[-2.5 alt_a];
acv23_ac=[-2.5+0.2 alt_a+0.2];
acv24_ac=[-2.5-0.2 alt_a+hp_a-0.2];

```

```

acv25_ac=[-2.5 alt_a+hp_a];
acv24_ac(1) acv25_ac(1) acv26_ac(1)];
acv26_ac=[-2.5+0.2 alt_a+hp_a-0.2];
ACVx2_ac=[acv21_ac(1) acv22_ac(1) acv23_ac(1) acv22_ac(1) acv25_ac(1)
acv24_ac(1) acv25_ac(1) acv26_ac(1)];
ACVy2_ac=[acv21_ac(2) acv22_ac(2) acv23_ac(2) acv22_ac(2) acv25_ac(2)
acv24_ac(2) acv25_ac(2) acv26_ac(2)];

%Texto de acotaciones
strh1_ac = [num2str(lgo_a), ' m']; %acotación horizontal 1
strh2_ac = [num2str(Rpvt_ac), ' m'];%acotación horizontal 2
strh3_ac = [num2str(R_ac), ' m'];%acotación horizontal 3
strv1_ac = [num2str(alt_a), ' m'];%acotación vertical 1
strv2_ac = [num2str(hp_a), ' m'];%acotación vertical 2
strg1_ac = [num2str(alpha_ac), ' ° int'];%apertura en grados 1
strg2_ac = [num2str(alphapvt_ac), ' ° ext'];%apertura en grados 2

%Propiedades de las acotaciones para la esfera rodante
%Acotaciones horizontales
ach11_aa=[0+0.4 -5+0.4];
ach12_aa=[0 -5];
ach13_aa=[0+0.4 -5-0.4];
ach14_aa=[lgo_a-0.4 -5+0.4];
ach15_aa=[lgo_a -5];
ach16_aa=[lgo_a-0.4 -5-0.4];
ACHx1_aa=[ach11_aa(1) ach12_aa(1) ach13_aa(1) ach12_aa(1) ach15_aa(1)
ach14_aa(1) ach15_aa(1) ach16_aa(1)];
ACHy1_aa=[ach11_aa(2) ach12_aa(2) ach13_aa(2) ach12_aa(2) ach15_aa(2)
ach14_aa(2) ach15_aa(2) ach16_aa(2)];

ach21_aa=[lgo_a+0.4 -2.5+0.4];
ach22_aa=[lgo_a -2.5];
ach23_aa=[lgo_a+0.4 -2.5-0.4];
ach24_aa=[lgo_a+b_aa-0.4 -2.5+0.4];
ach25_aa=[lgo_a+b_aa -2.5];
ach26_aa=[lgo_a+b_aa-0.4 -2.5-0.4];
ACHx2_aa=[ach21_aa(1) ach22_aa(1) ach23_aa(1) ach22_aa(1) ach25_aa(1)
ach24_aa(1) ach25_aa(1) ach26_aa(1)];
ACHy2_aa=[ach21_aa(2) ach22_aa(2) ach23_aa(2) ach22_aa(2) ach25_aa(2)
ach24_aa(2) ach25_aa(2) ach26_aa(2)];

ach31_aa=[0.4 alt_a+hp_a+1+0.4];
ach32_aa=[0 alt_a+hp_a+1];
ach33_aa=[0.4 alt_a+hp_a+1-0.4];
ach34_aa=[dist_a-0.4 alt_a+hp_a+1+0.4];
ach35_aa=[dist_a alt_a+hp_a+1];
ach36_aa=[dist_a-0.4 alt_a+hp_a+1-0.4];
ACHx3_aa=[ach31_aa(1) ach32_aa(1) ach33_aa(1) ach32_aa(1) ach35_aa(1)
ach34_aa(1) ach35_aa(1) ach36_aa(1)];
ACHy3_aa=[ach31_aa(2) ach32_aa(2) ach33_aa(2) ach32_aa(2) ach35_aa(2)
ach34_aa(2) ach35_aa(2) ach36_aa(2)];

```

```

%Acotaciones verticales
acv11_aa=[-b_aa-1-0.4 0+0.4];
acv12_aa=[-b_aa-1 0];
acv13_aa=[-b_aa-1+0.4 0+0.4];
acv14_aa=[-b_aa-1-0.4 alt_a-0.4];
acv15_aa=[-b_aa-1 alt_a];
acv16_aa=[-b_aa-1+0.4 alt_a-0.4];
ACVx1_aa=[acv11_aa(1) acv12_aa(1) acv13_aa(1) acv12_aa(1) acv15_aa(1)
acv14_aa(1) acv15_aa(1) acv16_aa(1)];
ACVy1_aa=[acv11_aa(2) acv12_aa(2) acv13_aa(2) acv12_aa(2) acv15_aa(2)
acv14_aa(2) acv15_aa(2) acv16_aa(2)];

acv21_aa=[-b_aa*0.2-0.2 alt_a+0.2];
acv22_aa=[-b_aa*0.2 alt_a];
acv23_aa=[-b_aa*0.2+0.2 alt_a+0.2];
acv24_aa=[-b_aa*0.2-0.2 alt_a+hp_a-0.2];
acv25_aa=[-b_aa*0.2 alt_a+hp_a];
acv26_aa=[-b_aa*0.2+0.2 alt_a+hp_a-0.2];
ACVx2_aa=[acv21_aa(1) acv22_aa(1) acv23_aa(1) acv22_aa(1) acv25_aa(1)
acv24_aa(1) acv25_aa(1) acv26_aa(1)];
ACVy2_aa=[acv21_aa(2) acv22_aa(2) acv23_aa(2) acv22_aa(2) acv25_aa(2)
acv24_aa(2) acv25_aa(2) acv26_aa(2)];

acv31_aa=[lgo_a+5-0.2 alt_a+0.2];
acv32_aa=[lgo_a+5 alt_a];
acv33_aa=[lgo_a+5+0.2 alt_a+0.2];
acv34_aa=[lgo_a+5-0.2 alt_a+hint_aa-0.2];
acv35_aa=[lgo_a+5 alt_a+hint_aa];
acv36_aa=[lgo_a+5+0.2 alt_a+hint_aa-0.2];
ACVx3_aa=[acv31_aa(1) acv32_aa(1) acv33_aa(1) acv32_aa(1) acv35_aa(1)
acv34_aa(1) acv35_aa(1) acv36_aa(1)];
ACVy3_aa=[acv31_aa(2) acv32_aa(2) acv33_aa(2) acv32_aa(2) acv35_aa(2)
acv34_aa(2) acv35_aa(2) acv36_aa(2)];

%Texto de acotaciones
strh1_aa = [num2str(lgo_a), ' m']; %acotación horizontal 1
strh2_aa = [num2str(b_aa), ' m']; %acotación horizontal 2
strh3_aa = [num2str(dist_a), ' m']; %acotación horizontal 3
strv1_aa = [num2str(alt_a), ' m']; %acotación vertical 1
strv2_aa = [num2str(hp_a), ' m']; %acotación vertical 2
strv3_aa = [num2str(hint_aa), ' m']; %acotación vertical 3

if n_a==0;

errordlg('Use el método para 1 terminal','Mensaje 1');

elseif n_a==1; %2 puntas

%%%%%%%%% Para 2 puntas en el edificio %%%%%%%%%%%%%%%
%coordenadas normales
cb_ac=[xb_a(1) yb_a]; %0 cb=coordenada base
cp_ac=[xp_a(1) yp_a]; %cp=coordenada punta
cb1_ac=[xb_a(2) yb_a];%1
cp1_ac=[xp_a(2) yp_a];

```



```

%Coordenadas en plano (para graficar)
%puntas
% Donde pb=x pp=y
pb_ac=[cb_ac(1) cp_ac(1)] ; %punto 0
pp_ac=[cb_ac(2) cp_ac(2)];
pb1_ac=[cb1_ac(1) cp1_ac(1)]; %punto 1
pp1_ac=[cb1_ac(2) cp1_ac(2)];

%angulos de proteccion
aa1_ac=[Api_ac(1)-Rpvt_ac Api_ac(2)]; %punto a de ángulo (ángulo de
punta pivote izquierdo)
aa2_ac=[cb_ac(1) cp_ac(2)]; %punto b de ángulo
aa3_ac=[B_a(1)+R_ac-cpe_ac B_a(2)+bee_ac]; %punto c de ángulo
recortado
aa2a_ac=[cb_ac(1) cp_ac(2)];
aa3a_ac=[B_a(1)+R_ac B_a(2)];
ab1_ac=[C_a(1)-R_ac+cpe_ac C_a(2)+bee_ac]; %punto a de angulo
ab2_ac=[cb1_ac(1) cp1_ac(2)]; %punto b de angulo
ab3_ac=[Dpd_ac(1)+Rpvt_ac Dpd_ac(2)];%punto c de ángulo (ángulo de
punta pivote derecho)

%puntos de angulos de proteccion (puntos que se graficaran)
Ax_ac=[aa1_ac(1) aa2_ac(1) aa3_ac(1)];
Ay_ac=[aa1_ac(2) aa2_ac(2) aa3_ac(2)];

Axa_ac=[aa2a_ac(1) aa3a_ac(1)];
Aya_ac=[aa2a_ac(2) aa3a_ac(2)];

Ax1_ac=[ab1_ac(1) ab2_ac(1) ab3_ac(1)];
Ay1_ac=[ab1_ac(2) ab2_ac(2) ab3_ac(2)];

%Plano xy para graficar
figure(1);
plot(Sx_a,Sy_a,'g',Edx_a,Edy_a,'b',xb_a,yb_a,'xb',xp_a,yp_a,'^b'),hold;
plot(pb_ac,pp_ac,'k',pb1_ac,pp1_ac,'k');
plot(Ax_ac,Ay_ac,'r',Ax1_ac,Ay1_ac,'r',Axa_ac,Aya_ac,'-g');
plot(ACHx1_ac,ACHy1_ac,'b-',ACHx2_ac,ACHy2_ac,'b-
',ACHx3_ac,ACHy3_ac,'b-',ACVx1_ac,ACVy1_ac,'b-
',ACVx2_ac,ACVy2_ac,'b-');
text(lgo_a/2,-6,strh1_ac,'color',[1 0 0]);
text(lgo_a+(Rpvt_ac/3),-4,strh2_ac,'color',[1 0 0]);
text(R_ac/2,hpvt_a+4,strh3_ac,'color',[1 0 0]);
text(-Rpvt_ac,alt_a*0.8,strv1_ac,'color',[1 0 0]);
text(-Rpvt_ac/3,alt_a+hp_a/2,strv2_ac,'color',[1 0 0]);
text(lgo_a-R_ac/3,alt_a+hp_a/3,strg1_ac,'color',[1 0 1]);
text(lgo_a*1.05,alt_a*0.75,strg2_ac,'color',[1 0 1]);
fill(Edx_a,Edy_a,[0.8 0.8 0.8]);% edificio color gris
hold;
axis([A_a(1)-Rpvt_ac-3 D_a(1)+Rpvt_ac+3 -10 hpvt_a+6]);
grid on;
grid minor;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Método de la esfera rodante %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%% Para 2 puntas en el edificio %%%%
%coordenadas normales
cb1_aa=[xb_a(1) yb_a]; %1 cb=coordenada base
cp1_aa=[xp_a(1) yp_a] ; % cp=coordenada punta
cb2_aa=[xb_a(2) yb_a] ; %2
cp2_aa=[xp_a(2) yp_a];

%Coordenadas en plano (para graficar)
%puntas

% Donde pb=x pp=y
pb1_aa=[cb1_aa(1) cp1_aa(1)]; %punto 0
pp1_aa=[cb1_aa(2) cp1_aa(2)];
pb2_aa=[cb2_aa(1) cp2_aa(1)]; %punto 1
pp2_aa=[cb2_aa(2) cp2_aa(2)];

%Entre terminales
xe2_aa= Rsr*cos(arc3_aa)+(lgo_a/t_a);
ye2_aa= Rsr*sin(arc3_aa)+e_aa;

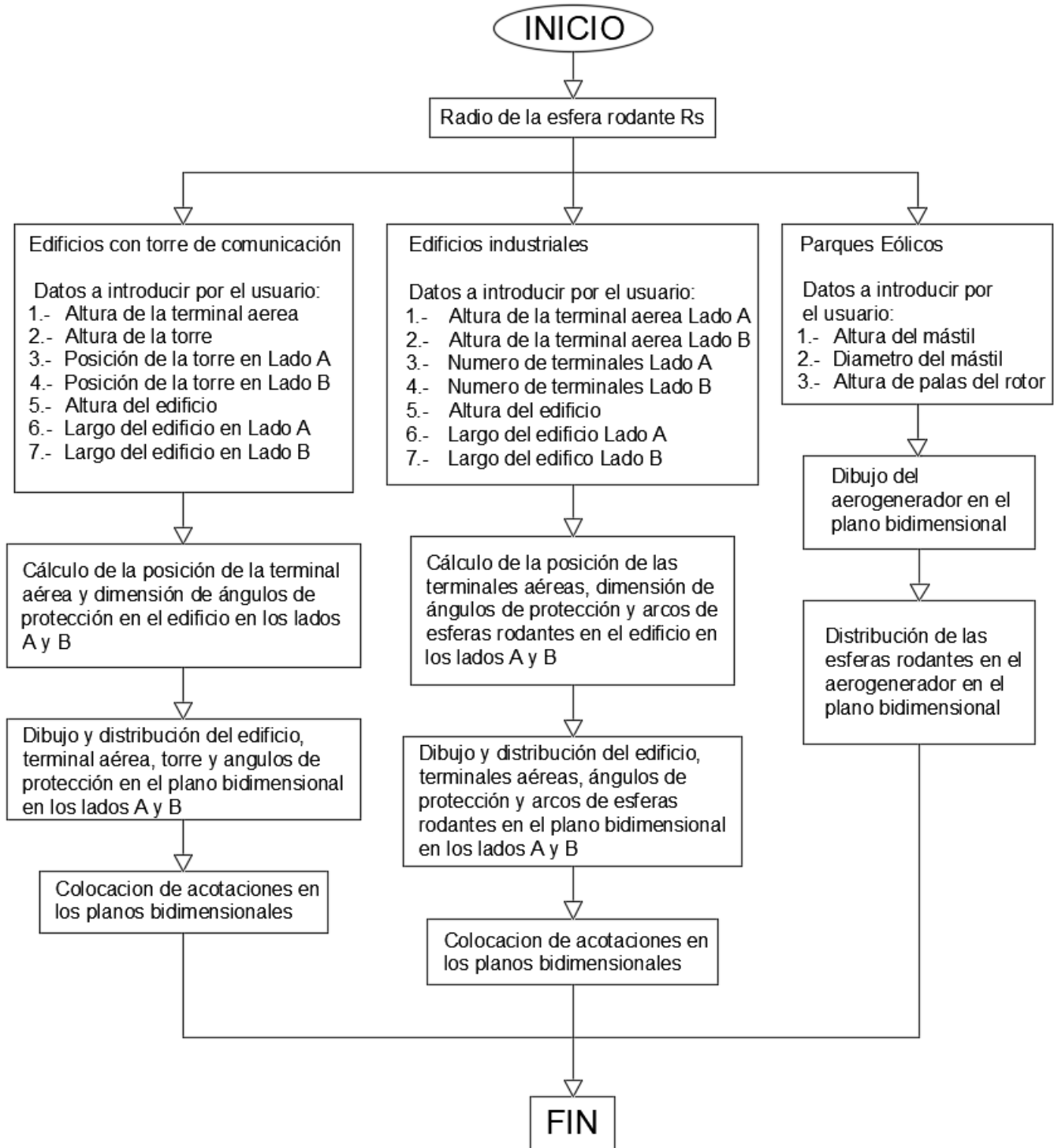
%Plano xy para graficar

figure(2);
plot(Sx_a,Sy_a,'g',Edx_a,Edy_a,'b',xb_a,yb_a,'xb',xp_a,yp_a,'^b'),hold
ld;
plot(pb1_aa,pp1_aa,'k',pb2_aa,pp2_aa,'k');
plot(xei_aa,yei_aa,'r',xe2_aa,ye2_aa,'r',xed_aa,yed_aa,'r');
plot(ACHx1_aa,ACHy1_aa,'b-',ACHx2_aa,ACHy2_aa,'b-
',ACHx3_aa,ACHy3_aa,'b-',ACVx1_aa,ACVy1_aa,'b-
',ACVx2_aa,ACVy2_aa,'b-',ACVx3_aa,ACVy3_aa,'b-')
text(lgo_a/2,-6,strh1_aa,'color',[1 0 0])
text(lgo_a+(Rsr/3),-4,strh2_aa,'color',[1 0 0])
text(dist_a/2,alt_a+hp_a+2,strh3_aa,'color',[1 0 0])
text(-b_aa,alt_a*0.8,strv1_aa,'color',[1 0 0])
text(-b_aa*0.3,alt_a+hp_a/2,strv2_aa,'color',[1 0 0])
text(lgo_a*1.3,alt_a+hint_aa/2,strv3_aa,'color',[1 0 0])
fill(Edx_a,Edy_a,[0.8 0.8 0.8]); %edificio color gris
hold;
axis([A_a(1)-Rsr-3 D_a(1)+Rsr+3 -10 hpvt_a+6]);
grid on;
grid minor;

```

4.3. ALGORITMO DE FUNCIONAMIENTO

El procedimiento de diseño del software se muestra en el siguiente diagrama de flujo.



Resultados

En este capítulo se muestran completamente los gráficos desarrollados por el software de cálculo para los edificios en sus diferentes lados, más adelante se muestran los gráficos de los cálculos para las diferentes posiciones de los generadores eólicos, por medio de la introducción de datos en la interfaz gráfica de usuario también desarrollada.

5.1. RESULTADOS

A continuación se pueden observar los resultados gráficos de las cálculos que se realizaron en el software matemático MATLAB, y arrojaron las figuras de los métodos de cálculo programados que se mencionan anteriormente para los distintos tipos de instalaciones estructurales. El desarrollo de la interfaz gráfica fue el paso final en el desarrollo del software. Como se observa en la Figura 5.1 se muestran los parametros a introducir en la interfaz de acuerdo al tipo de instalación con el cual se requiera hacer el cálculo, donde los dos recuadros superiores son para los edificios industriales, el primer recuadro es para los edificios con una punta captadora y una torre de comunicación, el segundo recuadro corresponde a los edificios apartir de 2 puntas captadoras y un maximo de 20 puntas y el tercer recuadro ubicado inferiormente, se usa para el método de la esfera rodante en los generadores eolicos.

The screenshot shows the SDPP software interface. At the top, it displays the title "Software para el cálculo de perfiles de protección de pararrayos en parques eólicos y redes industriales" and the author "Autor: Ing. Alan David Mendoza García". Below this, it identifies the institution as "Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Departamento de Estudios de Posgrado e Investigación" and includes the logo of the "TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO".

The interface is divided into three main sections for inputting parameters:

- Edificios Con Torre De Comunicación:** This section includes input fields for "Altura De La Terminal:", "Altura De La Torre:", "Posición De La Torre Lado A:", "Posición De La Torre Lado B:", "Altura Edificio:", "Largo Edificio Lado A:", and "Largo Edificio Lado B:". A "Graficar" button is located at the bottom of this section.
- Edificios Industriales:** This section includes input fields for "Altura de las terminales lado A:", "Altura de las terminales lado B:", "Número de terminales lado A:", "Número de terminales lado B:", "Altura Edificio:", "Largo Edificio Lado A:", and "Largo Edificio Lado B:". A "Graficar" button is located at the bottom of this section.
- Parques Eólicos:** This section includes input fields for "Altura Del Mástil:", "Diametro Del Mástil:", and "Altura De Palas Del Rotor:". A "Graficar" button is located to the right of the "Diametro Del Mástil" field.

At the bottom right, there is a "Nota:" box stating "Todas las unidades de longitud que se introducen deben ser metros." Below the note are two buttons: "Borrar Variables" and "Borrar Memoria".

At the top of the interface, there is a label "Radio de la esfera rodante:" followed by an empty input field.

Figura 5.1. Interfaz gráfica de usuario para los métodos de diseño de los perfiles de protección de pararrayos.

En todas las figuras correspondientes a continuación para los edificios industriales (Figuras 5.2 a 5.6), se muestran las acotaciones de las dimensiones básicas del edificio para los lados A y B, las cuales son: la altura de las puntas captadoras, la distancia de cobertura de la zona de protección de acuerdo al tamaño de la punta captadora, los grados de apertura del ángulo, la altura y el largo del edificio.

5.1.1. Simulación Gráfica para Edificios con Torre de Comunicación

Como se puede observar en las figuras 5.2 y 5.3, se muestra el método del ángulo de protección para una punta captadora en torres de comunicación en sus lados A y B, donde por medio de la introducción de la localización se puede mover la torre a través del eje x encima del edificio y así ajustarse su posición real en este.

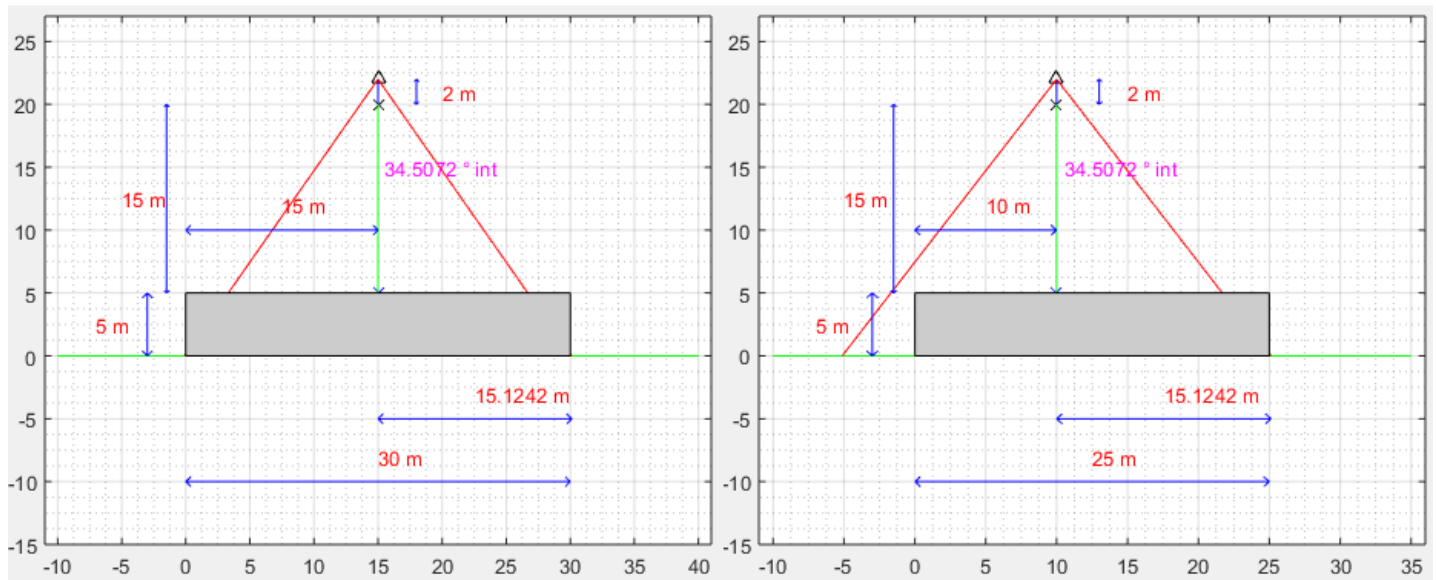


Figura 5.2. *Perfiles de protección del edificio con torre en lados A y B por el método del ángulo de protección.*

Se trabajó en el código para hacer más práctico a la vista el dibujo de los métodos de la esfera rodante y el ángulo de protección como se observa en la Figura 5.3 que muestra el software Matlab, los círculos del método de la esfera rodante se recortaron hasta hacerlos solamente arcos, que muestran un área de cobertura más precisa en el dibujo del edificio, y las líneas del método de ángulo de protección también se recortaron y solo se observa la sección donde se intersectan las líneas cuando se acercan estre sí las puntas captadoras.

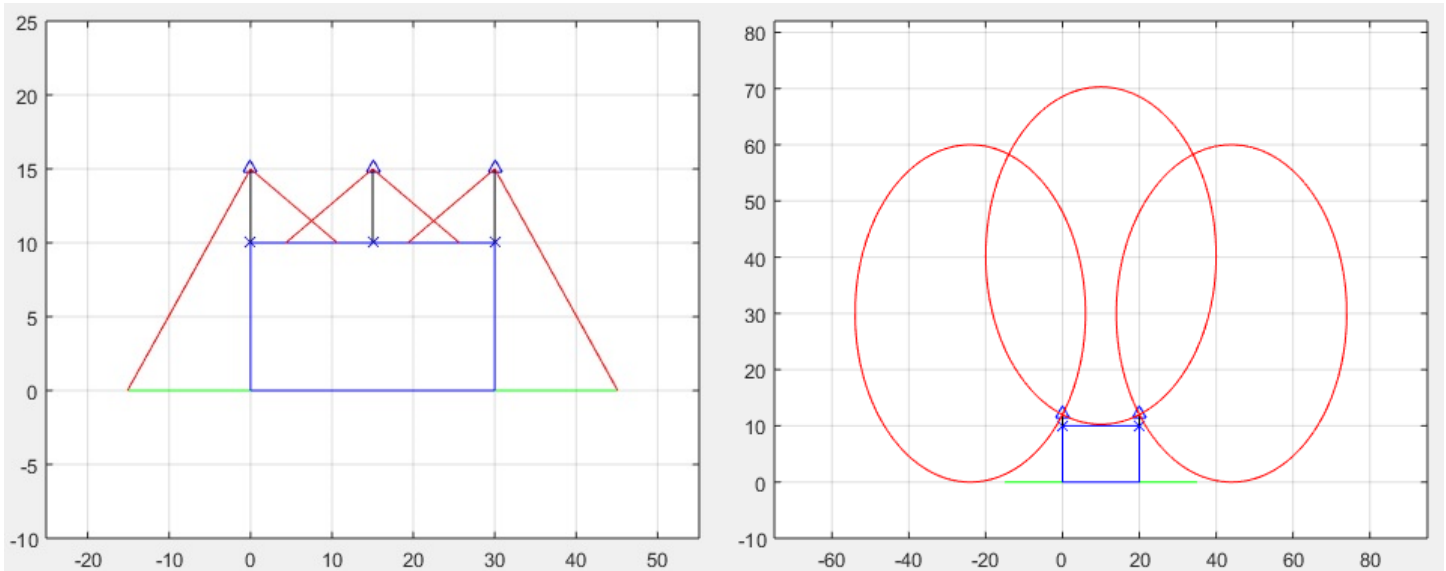


Figura 5.3. *Perfiles de protección por ambos métodos antes de las modificaciones.*

5.1.2. Simulación Gráfica para Edificios Industriales

El segundo recuadro de la interfaz gráfica está dedicado a los edificios industriales, para una cantidad de puntas captadoras que simula desde dos puntas captadoras hasta veinte puntas lo cual es el límite del código de programación, aquí se muestran los dos métodos de cálculo para los lados A y B del edificio, o sea, la interfaz gráfica reproduce 4 simulaciones gráficas en total para la instalación, vease Figuras 5.4 y 5.5.

Un indicador especial en el método del ángulo de protección, del segundo recuadro de la interfaz gráfica es la línea inclinada de color verde en la primera punta captadora del edificio,

la que indica la apertura real del ángulo de protección desde la parte superior de la punta captadora hasta la superficie del techo del edificio, lo cual sirve como comprobación para los indicadores de acotación en la simulación gráfica del método, vease Figura 5.4.

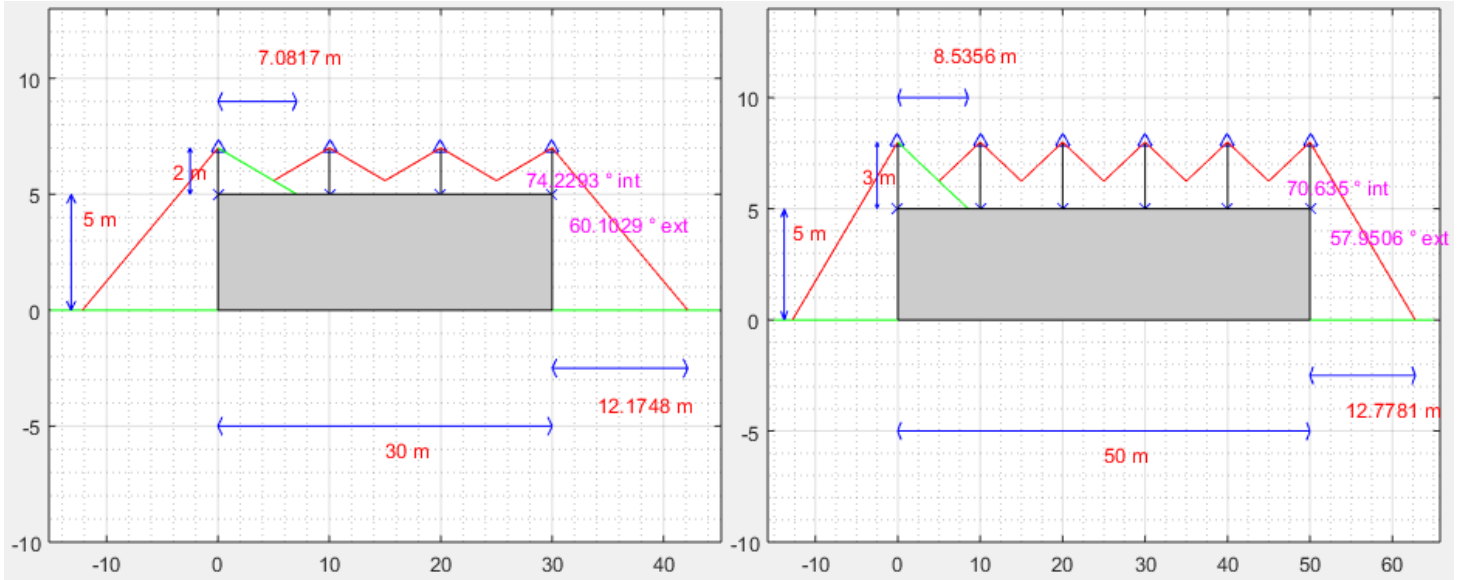


Figura 5.4. Perfiles de protección del edificio en lado A y B por el método del ángulo de protección.

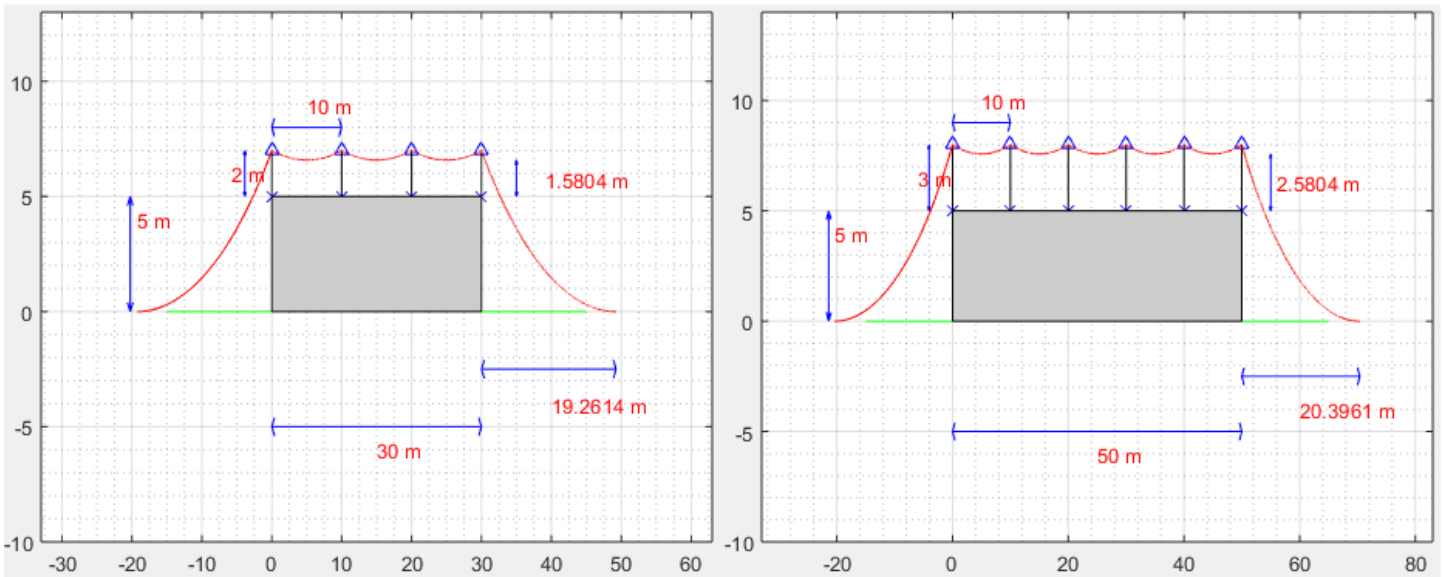


Figura 5.5. Perfiles de protección del edificio del edificio en lado A y B por el método de la esfera rodante.

El estudio de este tipo de edificios finaliza conociendo el área bajo las líneas hacia el suelo donde debe observarse que ningún punto de la estructura del edificio toque dicha curva o recta. Solo entonces se procede a la construcción física o modificación del sistema de pararrayos en la planta industrial.

5.1.3. Simulación Gráfica para Parques Eólicos

Para el tercer recuadro dedicado a el diseño de los perfiles de protección en generadores eólicos, se realizó la primera parte de programación del código en el que se observa el generador en tres tipos de posiciones y el diseño del método de la esfera rodante en la Figura 5.6.

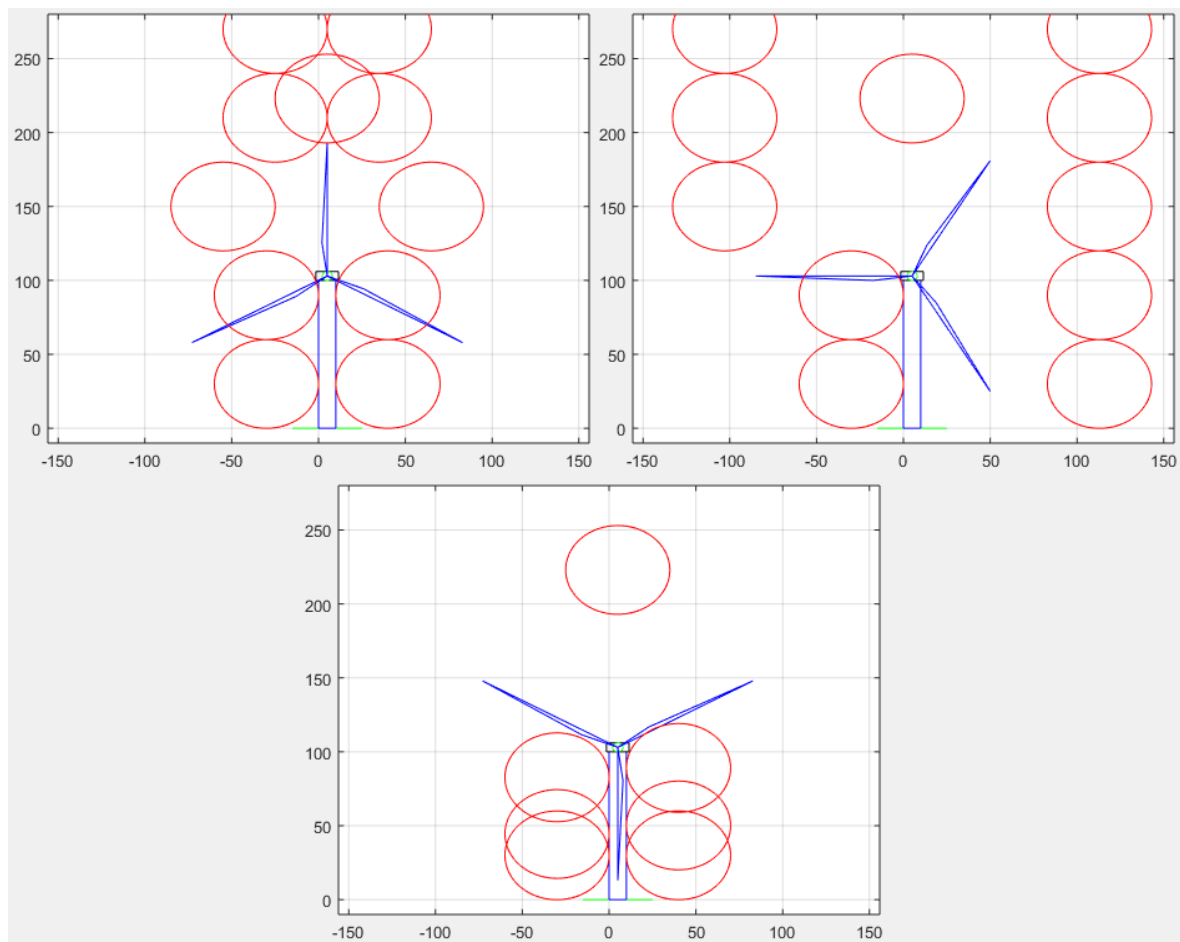


Figura 5.6. *Perfiles de protección del generador eólico en las posiciones superior, horizontal e inferior.*

Conclusiones y trabajos futuros

En el capítulo final se resumen las conclusiones de este trabajo y se muestran las propuestas e ideas para el desarrollo futuro del proyecto.

6.1 CONCLUSIONES

En el proyecto de tesis “Software para el cálculo de perfiles de protección de pararrayos en parques eólicos y redes industriales” se desarrolló un software para simular la distribución de las terminales de pararrayos en las instalaciones que necesitan la protección ante una eventual descarga atmosférica por medio de cálculos matemáticos de posicionamiento, y haciendo uso de los datos que se introducen inicialmente, se muestran las simulaciones graficas necesarias para tomar la decisión de diseño final por el usuario.

Este trabajo demuestra por medio de los métodos de cálculo propuestos, que el código de programación del software desarrollado cumple con las expectativas de reducir el tiempo de obtención de los perfiles de protección introduciendo solamente pocos datos en el software; en comparación a la manera clásica de diseño de los perfiles de protección de pararrayos, en softwares de dibujo arquitectónico y demás técnicas de cálculo a mano y a escala en planos físicos.

Como se observa en los resultados, para los métodos de cálculo de edificios industriales solamente se simularon edificios sin inclinación en sus techos o paredes, y para el método de los aerogeneradores se llegó hasta el diseño de la estructura de los mismos y el dibujo de las esferas rodantes alrededor de los aerogeneradores sin ajustarlas en sus posiciones exactas alrededor de los mismos, como último paso de diseño, se observa una interfaz gráfica de usuario sencilla la cual se puede manejar fácilmente e introducir los parámetros correspondientes de cada método a elegir por el usuario, dando como resultado las simulaciones gráficas para todos los métodos de diseño de los que dispone el software.

Es necesario ejecutar el software MATLAB para la simulación del código de programación, debido a que no se cuenta con una versión ejecutable individual del software de diseño de perfiles de protección.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

El software desarrollado de este proyecto tiene la oportunidad de adquirir mejoras en las dos áreas de aplicación como lo son los edificios industriales y los parques eólicos, como por ejemplo, el mejoramiento estético de la sección de los edificios industriales, añadiendo el área sombreada en las zonas de protección por ambos métodos de cálculo y la posibilidad de cambiar el color y el tipo de líneas en los dibujos representados.

Otra opción a futuro muy importante después de lo estético, es la capacidad de añadir una cantidad mayor a las 20 puntas captadoras que ofrece el software de cálculo, también ampliar el catálogo de tipos de puntas captadoras que se ofrecen en el mercado y sus métodos de cálculo que los acompañan dependiendo el tipo de opción de protección que se necesita en el momento de diseñar el sistema de protección.

Un aspecto más que se puede perfeccionar en el área de los edificios industriales, es respecto a las características dimensionales del edificio, es decir, no solo simular edificios con un área regular sino poder realizar los cálculos por ambos métodos en instalaciones con un área más compleja, como por ejemplo los edificios con inclinaciones en sus paredes o techos, asimismo como también tener la capacidad de realizar reportes de resultados como último paso en la simulación de los sistemas de protección.

Finalmente, en el área de los parques eólicos se exhorta a seguir realizando el diseño de la simulación como lo es el realizar los cálculos de posicionamiento de las esferas rodantes alrededor del generador eólico y sus respectivas acotaciones.

Referencias

- [1] NMX-J-549-ANCE-2005 “Sistemas de Protección Contra Tormentas Eléctricas - Especificaciones, Materiales y Métodos de Medición”, 2006.
- [2] M. O. Durham and R. A. Durham, "Lightning, Grounding and Protection for Control Systems". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, pp. 45-54, January 1995.
- [3] Puntas Captadoras Simples [Online], Disponible en:
<https://www.ingesco.com/es/productos/puntas-captadoras>
- [4] NFPA 780 "Standard for the Installation of Lightning Protection Systems", 2014.
- [5] E. O. Jara, “Estudio comparativo de los diferentes métodos de protección contra descargas atmosféricas directas en edificios”, Tesis de grado, EPN, Qu, ECU, 2005.
- [6] *Protección Contra Sobretensiones Transitorias Baja Tensión Guía 2010*. Schneider Electric, 2010.
- [7] J. Gutierrez, “Léxico técnico e historia de la lengua: Las enseñanzas del pararrayos”, *Ex admiratione et amicitia: homenaje a Ramón Santiago*, vol. 1, pp. 589-610, 2007.
- [8] A. E. Kisielewky, “Estudio de la protección contra las descargas atmosféricas. Modelización y simulación computacional de una descarga atmosférica. Aplicación a pararrayos pasivos y activos”, Tesis de grado, Departamento de Electrotecnia, UBA, BA, ARG, 2000.
- [9] M. Villarrubia. *Ingeniería de la Energía Eólica*. Primera edición. México: Alfaomega, 2013.
- [10] *Blitzplaner Manual De Protección Contra Rayos*. Alemania: DEHN SOHNE, 2007.
- [11] *Lightning Protection Guide*. Third Edition. Germany: DEHN SOHNE, 2014.