

**UNIVERSIDAD CENTRAL  
VICERRECTORÍA ACADÉMICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**PROPUESTA DE UN SISTEMA CONTRA DESCARGAS  
ATMOSFÉRICAS BASADO EN LA NFPA 780 PARA NAVES  
INDUSTRIALES COMO MEDIO DE PROTECCIÓN PARA LA  
VIDA HUMANA**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD DE TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO  
ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**ESTUDIANTE: ROBERTO JOSÉ SOLANO BONILLA**

**TUTOR: ING. MARIO ALBERTO BALLAR CALVO**

**SEDE METROPOLITANA, COSTA RICA**

**JULIO, 2024**

# DECLARACIÓN JURADA

# CÉDULA DE IDENTIDAD

**SOLICITUD DE DEFENSA**

## **CARTA DE APROPACI3N DEL TUTOR**

# CARTA DE AUTORIZACIÓN DEL LECTOR

# CERTIFICADO DEL FILÓLOGO

# CARTA DE ENTENDIMIENTO

# CONTENIDO

DECLARACIÓN JURADA .....	I
CÉDULA DE IDENTIDAD .....	II
SOLICITUD DE DEFENSA .....	III
CARTA DE APROPIACIÓN DEL TUTOR .....	IV
CARTA DE AUTORIZACIÓN DEL LECTOR .....	V
CERTIFICADO DEL FILÓLOGO .....	VI
CARTA DE ENTENDIMIENTO .....	VII
CONTENIDO .....	VIII
TABLAS .....	XI
FIGURAS .....	XII
DEDICATORIA .....	XV
AGRADECIMIENTOS .....	XVI
EPÍGRAFE .....	XVII
RESUMEN .....	18
<b>CAPÍTULO I. PROBLEMA .....</b>	<b>19</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	20
1.2 OBJETIVOS .....	21
1.2.1 <i>Objetivo general</i> .....	21
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	21
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	22
1.4 ANTECEDENTES .....	23
1.4.1 <i>Antecedentes internacionales</i> .....	23
1.4.2 <i>Antecedentes nacionales</i> .....	25
1.5 PROYECCIONES .....	28
1.5.1 <i>Alcances</i> .....	29
1.5.2 <i>Limitaciones</i> .....	29
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>30</b>
2.1 HERRAMIENTAS INGENIERILES .....	31
2.1.1 <i>Análisis de normativa National Fire Protection Association NFPA 780</i> .....	31

2.1.2	<i>Análisis de radios de cobertura de las puntas Franklin por medio del software AutoCAD</i>	31
2.1.3	<i>Análisis de cálculos por medio del software AutoCAD para determinar la cantidad y disposición óptima de los componentes del sistema de pararrayos</i>	32
2.1.4	<i>Analizar la resistividad eléctrica presente en el suelo por medio de un estudio de suelos</i>	32
2.1.5	<i>Encuesta a Profesionales sobre la interpretación y diseño con respecto a la normativa NFPA 780 en su versión 2014</i>	32
2.2	<b>CONCEPTOS TEÓRICOS</b>	32
2.2.1	<i>El rayo y formación de descargas atmosféricas</i>	33
2.2.2	<i>El pararrayos</i>	37
2.2.3	<i>Métodos de cálculo aplicados según NFPA 780 versión 2014</i>	42
2.2.4	<i>Análisis de sistema de puesta a tierra mediante las ecuaciones de Schwarz</i>	42
2.2.5	<i>Consecuencias de las descargas atmosféricas</i>	43
	<b>CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>46</b>
3.1	<b>ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN</b>	47
3.2	<b>MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	47
3.3	<b>FUENTES DE INFORMACIÓN</b>	51
3.3.1	<b>SUJETOS DE INFORMACIÓN</b>	53
	CREACIÓN PROPIA, (2024)	53
3.4	<b>VARIABLES DE ANÁLISIS</b>	54
3.5	<b>INSTRUMENTOS</b>	56
3.6	<b>PROCESO PARA LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS</b>	62
	<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>65</b>
4.1	<b>ANALIZAR</b>	66
4.1.1	<i>Análisis de la Normativa NFPA 780 2014</i>	66
4.3.3.1	<i>Paso 1: Definición de altura de la estructura y materiales</i>	67
4.3.3.2	<i>Paso 2: Definición de tipo de techo</i>	68
4.3.3.3	<i>Paso 3: Métodos de protección</i>	70
4.3.3.4	<i>Paso 4: Ubicación de terminales y método de mallas</i>	75
4.3.3.5	<i>Paso 5: Cálculo de cantidad de conductores bajantes</i>	81
4.3.3.6	<i>Paso 6: Colocación de electrodos de puesta a tierra</i>	83
4.3.3.7	<i>Paso 7: Verificar interconexión con objetos metálicos</i>	85
4.3.3.7	<i>Paso 8: Consideraciones adicionales</i>	87
4.3.4	<i>Análisis de Resistividad Eléctrica del Suelo</i>	94
4.3.5	<i>Análisis de Resistencia del Sistema de Puesta a Tierra</i>	98
4.3.6	<i>Análisis de Radios de Protección de Pararrayos Mediante el Uso del Software AutoCAD</i>	107
4.3.7	<i>Análisis de Distancias, Distribución de Puntas, Bajantes y Diseño de un Sistema de Pararrayos</i>	

<i>Mediante el Uso del Software AutoCAD</i> .....	109
<i>4.3.8 Propuesta de Diseño de un Sistema de Pararrayos</i> .....	112
<i>4.3.9 Análisis de resultados de la encuesta</i> .....	137
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>144</b>
CONCLUSIONES .....	145
RECOMENDACIONES .....	146
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>148</b>
<b>APÉNDICES Y ANEXOS</b> .....	<b>152</b>
APÉNDICE 1.....	153

## TABLAS

Tabla 3.1: <i>Acta constitución del proyecto</i> .....	53
Tabla 3.2: <i>Variables de la investigación por objetivo específico</i> .....	55
Tabla 4.1 <i>Definición de materiales Clase I</i> .....	67
Tabla 4.2 <i>Definición de materiales Clase II de acuerdo a la NFPA 780 versión 2014</i> .....	68
Gráfico 4.1 <i>Coficiente K1 para determinar la resistencia de la malla a tierra de conductores</i> .....	99
Gráfico 4.2 <i>Coficiente K2 para determinar la resistencia de la malla a tierra de conductores</i> .....	100
Tabla 4.3 <i>Tabla de costos aproximados</i> .....	137

# FIGURAS

Figura 2.1 Nube cumulonimbos .....	34
Figura 2.2 Ionización de nube y carga del terreno .....	34
Figura 2.3 Fotografía de granizo blando o graupel .....	35
Figura 2.4 Formación de trazador descendente y ascendente .....	36
Figura 2.5 Ejemplo de formación de trazador descendente y ascendente .....	37
Figura 2.6 Ejemplos de terminales aéreas, puntas Franklin.....	38
Figura 2.7 Ejemplo de conductor de descarga .....	39
Figura 2.8 Ejemplo de sistema de conexión a tierra .....	40
Figura 2.9 Ejemplo de supresor de transientes SPD .....	40
Figura 2.10 Ejemplo de interconexión de conductores.....	41
Figura 2.11 Ejemplo de contador de eventos.....	41
Figura 3.1 <i>Tabla de Datos por Analizar Respecto a la NFPA 780</i> .....	57
Figura 3.2 Ejemplo de Cálculo de Radios de Cobertura por Medio de la Esfera Rodante.....	58
Figura 3.3 Ejemplo de Ubicación de Puntas Franklin Según NFPA 780, Estas Distancias serán Validadas Mediante el Software AutoCAD .....	59
Figura 3.4 Ejemplo de Estudio de Suelos, Resistividad Eléctrica .....	60
Figura 3.5 Ejemplo de Propuesta de Sistema contra Descargas Atmosféricas.....	61
Figura 3.6 Diagrama de bloques para el proceso de recolección y análisis de datos .....	63
Figura 3.7 Diagrama de Gantt para la organización y seguimiento de hitos.....	64
Figura 4.1 Inclinación o pendiente de un techo de acuerdo con la altura, el vano o el tendido .....	70
Figura 4.2 Medidas de protección para diversos tipos de techos.....	70
Figura 4.3 Protección de techos con niveles múltiples menores a 7.6m, relación uno a dos para techos planos .....	72
Figura 4.4 Protección de techos con niveles múltiples menores a 7.6m, relación uno a dos para techos inclinados .....	72
Figura 4.5 Protección de techos con niveles múltiples menores a 15m, relación uno a uno para techos planos .....	73
Figura 4.6 Protección de techos con niveles múltiples menores a 15m, relación uno a uno para techos inclinados .....	73
Figura 4.7 Método de la esfera rodante, zonas de protección .....	74
Figura 4.8 Ilustración de la tangente en techos inclinados con alturas entre 15m y 46m.....	77
Figura 4.9 Terminales sobre un techo inclinado.....	79
Figura 4.10 Terminales ubicadas sobre techos planos .....	79
Figura 4.11 Terminales sobre un techo ligeramente inclinado .....	80
Figura 4.12 Terminales sobre un techo plano o ligeramente inclinado con perímetro irregular .....	80
Figura 4.13 Conector tipo T para conexiones de un único conductor de elementos verticales .....	81
Figura 4.14 Cálculo de cantidad de bajantes en estructuras con perímetros mayores a 76m .....	82
Figura 4.15 Instalación de un electrodo de puesta a tierra.....	84
Figura 4.16 Instalación de anillo perimetral de puesta a tierra.....	85

Figura 4.17 Objetos metálicos aislados en medios no conductores .....	87
Figura 4.18 Conexión de terminales y conductores .....	89
Figura 4.19 Radios de curvatura de conductores.....	90
Figura 4.20 Conductor colgado una distancia igual o menor a 90 cm.....	90
Figura 4.21 Conductor colgado una distancia mayor a 90 cm.....	91
Figura 4.22 Resultado de Resistividad Eléctrica en Punto de Medición MT-01 .....	95
Figura 4.23 Resultado de Resistividad Eléctrica en Punto de Medición MT-02 .....	96
Figura 4.24 Resultado de Resistividad Eléctrica en Punto de Medición MT-03 .....	96
Figura 4.25 Resultado de Resistividad Eléctrica en Punto de Medición MT-04 .....	97
Figura 4.26 Resultado de Resistividad Eléctrica en Punto de Medición MT-05 .....	97
Figura 4.27 Malla de tierras de 4 varillas enterradas verticalmente, con 3m de distanciamiento entre ellas, figura tipo cuadrado.....	101
Figura 4.28 Extracto de la normativa NFPA 780, materiales Clase I, área transversal no menor a 58mm <sup>2</sup> . .....	102
Figura 4.29 Extracto de la normativa NFPA 70, tabla 8 propiedades de los conductores .....	102
Figura 4.30 Ejemplo de radios de cobertura con respecto a terminales perimetrales.....	108
Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024) .....	108
Figura 4.31 Ampliación del ejemplo de radios de cobertura con respecto a las terminales perimetrales. 108 Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024) .....	108
Figura 4.32 Ejemplo de método de la esfera rodante tocando el techo.....	110
Figura 4.33 Ejemplo del método de la esfera rodante sin tocar el techo .....	111
Figura 4.34 Vista en planta de la nave industrial de caso de estudio.....	113
Figura 4.35 Vista en corte de la nave industrial, altura más alta 14.37 m .....	114
Figura 4.36 Vista en corte de la nave industrial, subida y tendido .....	115
Figura 4.37 Vista en corte de la nave industrial, radios de cobertura con esfera rodante.....	116
Figura 4.38 Ampliación del corte, cobertura bajo la esfera rodante.....	117
Figura 4.39 Ampliación del corte, cobertura bajo la esfera rodante.....	117
Figura 4.40 Vista en corte de la nave industrial, radios de cobertura con esfera rodante.....	118
Figura 4.41 Ampliación del corte, cobertura bajo la esfera rodante.....	118
Figura 4.42 Ampliación del corte, cobertura bajo la esfera rodante.....	118
Figura 4.43 Representación gráfica del método de la esfera rodante en la nave industrial.....	119
Figura 4.44 Ampliación de la representación gráfica del método de la esfera rodante en la nave industrial .....	119
Figura 4.45 Representación gráfica del método de la esfera rodante en la nave industrial.....	120
Figura 4.46 Ampliación de la representación gráfica del método de la esfera rodante en la nave industrial .....	121
Figura 4.47 Distribución de terminales aéreas vista en planta.....	122
Figura 4.48 Ampliación de distribución de terminales aéreas vista en planta.....	123
Figura 4.49 Distribución de terminales aéreas vista en planta y acotada.....	123
Figura 4.50 Ampliación de distribución de terminales aéreas vista en planta y acotada.....	124
Figura 4.51 Terminal aérea con punta redondeada .....	125
Figura 4.52 Base universal para colocación vertical u horizontal.....	125

Figura 4.53 Adaptador pivote para regular el ángulo de colocación de la terminal aérea .....	126
Figura 4.54 Conector en cruz .....	126
Figura 4.55 Conector en “T” .....	126
Figura 4.56 Soporte adhesivo .....	127
Figura 4.57 Distribución de bajantes, vista en planta .....	128
Figura 4.58 Distribución de bajantes, ampliación de vista en planta .....	129
Figura 4.59 Ilustración esquemática de la nave industrial en 3D .....	130
Figura 4.60 Ilustración esquemática de la nave industrial en 3D .....	130
Figura 4.61 Planta de distribución de electrodos de puesta a tierra y bajantes.....	132
Figura 4.62 Ampliación de distribución de bajantes y registros de puesta a tierra .....	132

## DEDICATORIA

Me gustaría dedicarle este trabajo primeramente a Dios, quien fue el que me bendijo con la vida y con las oportunidades para estudiar, siempre en sus manos he encontrado fortaleza y sabiduría para afrontar los problemas que me he topado desde mi niñez hasta mi vida adulta.

A mi madre, María Elena Bonilla Marín, quien junto a Dios y a su vida llena de sacrificios me brindó la educación y los valores con los que hoy en día cuento, los cuales resaltan siempre la superación personal, la honradez y el trabajo. Sin cada uno de los sacrificios realizados por ella, hoy en día no podría decir que soy un profesional.

A mi novia Karol Arce Díaz, quien ha tenido la paciencia y el apoyo para conmigo durante todos estos meses de elaboración del estudio, así como previamente en los años previos a esta investigación y todas las materias de la universidad, trabajos, sacrificios de tiempo en pareja; siempre pensando en mi futuro y las prioridades para salir adelante.

También quiero dedicarle esta investigación a mi hermana Andrea Solano Bonilla, quien, a pesar de residir en otro país, a lo lejos siempre he recibido su apoyo y amor para salir adelante en cada prueba y situación en la que le he pedido apoyo y consejo.

Por último y no menos importante, quiero dedicarle este trabajo a mi gran amigo Mauricio Ureña Solís, quien, gracias a él y a su apoyo durante mi proceso de Bachillerato, logré terminar mis estudios. Su apoyo es invaluable y mi agradecimiento hacia él sigue siendo enorme a través de los años.

## AGRADECIMIENTOS

Como pilar fundamental, agradecerle a Dios por las oportunidades brindadas para conmigo, a nivel profesional, educativo y personal Dios siempre me ha brindado enormes posibilidades de crecimiento que espero haberlas tomado de la mejor manera, para con ello ser mejor persona y agradecerle. Por cada una de esas oportunidades, gracias.

A mi madre, por sus valiosos sacrificios, los cuales de niño para mí eran ajenos y los ignoraba; sin embargo, ahora como una persona adulta, logro dimensionar cada uno de ellos y cuánto significan para mí, dado que ello me permitió ser la persona que hoy en día soy. Te amo mucho mamita.

A mi tutor, el señor don Mario Alberto Ballar Calvo. Don Mario, le estaré por siempre agradecido, su ayuda durante todo este proceso es invaluable, no tendría cómo cancelar una deuda como la que tengo con su persona, dado que el empeño con el que acogió mi tema de investigación, así como el compromiso por ubicarme, ayudarme a buscar información, generar contactos, entre muchos otros aportes, han sido para mí parte de las acciones por destacar. Don Mario, como siempre le indicaba al finalizar las sesiones, sumamente agradecido con usted, de corazón, le agradezco enormemente tanta dedicación, Dios lo bendiga de manera increíble.

A mi novia Karol Arce Díaz, gracias, amor por tanta paciencia y tanto apoyo, sé que ha sido difícil para los dos, el camino ha sido largo y se han sacrificado muchas cosas, gracias por ese apoyo, por tanta ayuda en correcciones e intervenciones y gracias por siempre estar ahí presente para mí cuando más la he necesitado.

Por último, agradecerle a mi ex compañero de trabajo, antiguo jefe y gran amigo mío, Johnny Alvarado. Johnny, sin su paciencia para capacitarme en la rama de diseño, sin sus correcciones, sin su impulso a ser mejor, sin su aliento para destacar en la rama de la ingeniería y ser un mejor profesional, no sería el profesional que soy hoy. Mi amigo, como siempre gracias por tanto durante tantos años, gracias por acompañarme también en este proceso de Licenciatura.

# EPÍGRAFE

*No hay límites para lo que puedes lograr, excepto aquellos que impones a ti mismo.*

Autor desconocido

## RESUMEN

Durante cientos de años el ser humano se ha maravillado con uno de los fenómenos más imponentes de la naturaleza como lo son las descargas atmosféricas; tanto así que, en distintas culturas, al rayo, como mayormente se le conoce, se le atribuyen características de ira o expresión de furia por parte de diferentes deidades. Durante los años de evolución de la humanidad se han podido estudiar estos fenómenos atmosféricos permitiendo así diseñar distintos sistemas de protección que mitiguen, al menos de manera parcial, sus violentos impactos.

El presente trabajo de investigación busca definir una propuesta de un sistema contra descargas atmosféricas basado en la normativa vigente de la NFPA 780 para naves industriales, con el fin de guiar por medio de dicho caso de estudio, al lector para que tenga mayor facilidad de comprensión de la normativa guiándolo paso a paso. El estudio se realizó tomando datos específicos de resistividad y similares referentes al área de la Zona Franca de La Lima de Cartago; área que cuenta con diversas naves industriales y áreas abiertas que permiten el estudio como tal.

## **CAPÍTULO I. PROBLEMA**

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente estudio se enfoca en los desafíos asociados a la correcta aplicación de la normativa *National Fire Protection Association 780* (de ahora en adelante, NFPA 780), versión 2014 en español, en Costa Rica, particularmente en el contexto de la Zona Franca de La Lima de Cartago. Las multiplicidades de regulaciones y la interpretación variable de los diferentes enfoques metodológicos para el desarrollo de sistemas de protección contra descargas atmosféricas representan obstáculos significativos para los diseñadores y profesionales del sector eléctrico.

En la Zona Franca de La Lima de Cartago, donde se encuentran diversas naves industriales y amplias áreas transitadas por el personal de las empresas, la implementación incorrecta de un sistema de protección contra descargas atmosféricas podría resultar en graves consecuencias. Estas incluirían daños a las estructuras de los edificios, pérdidas económicas al afectar equipos electrónicos sensibles como servidores y tarjetas electrónicas, costos derivados por paradas no planificadas en la industria y, lo más crítico e irreparable, la pérdida de vidas humanas.

Por tanto, se hace necesario un estudio detallado de la normativa vigente NFPA 780 para desarrollar una guía resumida y un diseño específico que puedan ser implementados en naves industriales dentro de esta zona industrial. Este estudio busca proponer soluciones prácticas para proveer la protección integral de las estructuras, los equipos y, sobre todo, de la vida humana, enfrentando y superando los desafíos identificados en la correcta aplicación de la normativa en el contexto costarricense.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

El objetivo principal de esta investigación es elaborar una guía básica de diseño de un sistema de protección contra descargas atmosféricas, basada en la normativa NFPA 780, versión en español del año 2014.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Elaborar una guía de diseño con base en la normativa NFPA 780 versión 2014 para un sistema contra descargas atmosféricas en una nave industrial.
- Diseñar un sistema contra descargas atmosféricas para un caso de estudio de una nave industrial prototipo.
- Llevar a cabo una lista de materiales para el diseño de un sistema contra descargas atmosféricas para el caso de estudio de una nave industrial prototipo.
- Realizar una encuesta a profesionales con amplia experiencia en diseño eléctrico en torno a la normativa NFPA 780, con el fin de identificar las formas de aplicación, las discrepancias existentes en los criterios, y las experiencias o desafíos que han enfrentado los profesionales al aplicar dicha normativa.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Si bien Costa Rica no figura entre los países latinoamericanos con una alta incidencia de rayos por cada kilómetro cuadrado, su pequeña extensión territorial no la exime de experimentar un significativo número de descargas eléctricas. Según Instituto Costarricense de Electricidad (2020), "Costa Rica registra la caída de 500,000 rayos en el 2020" (párr. 1). Los cuales, lamentablemente, han cobrado la vida de varias personas en todo el territorio nacional.

Pese a que las descargas atmosféricas se pueden predecir en un sector, no se cuenta con un instrumento o un método capaz de determinar con precisión las trayectorias de la caída y descarga de energía de los rayos, ya que estos son fenómenos que no siguen un patrón ordenado debido a la influencia de diversas variables; por lo cual, el rayo acaba siendo un fenómeno abrupto e impredecible, en cuanto a la ruta que tomará para liberar su energía.

Ante la imposibilidad de predecir con total precisión la ruta de una descarga atmosférica, es fundamental contar con un sistema de protección que tenga la capacidad de atraer el rayo y conducir su energía de manera segura hacia la tierra. Esta medida es crucial para salvaguardar vidas humanas y proteger equipos sensibles como tarjetas electrónicas y otros dispositivos.

Esta investigación proporcionará a los profesionales de las áreas eléctrica y electromecánica una guía clara y concisa para la aplicación de la normativa NFPA 780. Esta normativa, referenciada en el código eléctrico nacional NFPA 70 (NEC 2014), será presentada con un caso práctico de diseño para una nave industrial. La guía está concebida para ser útil tanto para profesionales experimentados como para aquellos que se inician en la implementación de estos sistemas. Además, facilitará la comprensión y aplicación de la normativa, superando posibles confusiones interpretativas y barreras lingüísticas derivadas de la traducción de diferentes idiomas.

## **1.4 ANTECEDENTES**

### **1.4.1 Antecedentes internacionales**

1.4.2.1 De acuerdo con el peligro latente que representan las descargas atmosféricas para la vida humana, los sistemas de pararrayos deben contar con una conexión a tierra de manera eficaz. Según estudios realizados, se concluyó que las corrientes eléctricas generadas por descargas atmosféricas deben ser dirigidas intencionalmente hacia tierra para minimizar los impactos negativos que pueden causar (Verdugo, 2017).

En el estudio titulado “Contribución para la implementación de una red de detección de rayos en Ecuador” se destaca la importancia de contar con un sistema contra descargas atmosféricas que conduzcan las corrientes generadas por los rayos, el cual debe estar sólidamente conectado a tierra, para prevenir afectaciones o pérdidas de vidas humanas. El estudio detalla la generación de las descargas atmosféricas, las características y magnitudes de los rayos, las condiciones atmosféricas que facilitan su formación, e incluye un análisis económico para implementar un sistema de protección contra rayos.

1.4.2.2 Para realizar el estudio correctamente, se deben explicar a fondo las distintas teorías del rayo. Existen varias teorías sobre la formación de rayos, entre las que se destacan las de Simpson, Elster Geitel, Wilson y la relacionada con cristales de hielo. Todas estas teorías se basan principalmente en el movimiento de masas de aire (Juárez, 2006).

Al igual que en el estudio citado “Introducción y aplicación de un sistema de protección electro- atmosférico tipo pararrayo ionizante franklin france®, como el instrumento utilizado para dominar las pérdidas humanas y monetarias ocasionadas por el rayo en la industria”; este trabajo tiene como objetivo proporcionar datos necesarios para comprender la formación de este fenómeno natural y en consecuencia diseñar correctamente un sistema de pararrayos. El estudio detallará los componentes principales y necesarios de un sistema contra descargas atmosféricas, explicando la

función de cada elemento, las distancias permitidas según las normas vigentes y los elementos certificados para su uso.

1.4.2.3 Según Donaire y Gago (2018), "se parte de considerar una densidad de descargas (número de descargas / Km<sup>2</sup>) uniforme para una región con nivel cerámico constante. A partir de esta densidad, se determina el número de esas descargas interceptado por la línea" (p. 21). Aunque este estudio presenta una ecuación para obtener los datos, la presente investigación utilizará los datos de las tablas proporcionadas por las entidades mencionadas anteriormente para obtener datos más precisos sobre las incidencias de rayos en Costa Rica.

1.4.2.4 Este estudio abordará los diferentes métodos de conducción y disposición de terminales aéreas para proteger estructuras y salvaguardar la vida humana. Estos métodos serán detallados y explicados de manera tal, que el lector pueda tener una noción clara de cómo diseñar un efectivo sistema de protección contra rayos.

El principio de Faraday establece que el material encerrado dentro de una envolvente de material conductor, cuando este conductor es conectado a tierra, queda libre de interferencias electromagnéticas y que cualquier fenómeno eléctrico, por intenso que sea, no causará ningún efecto en el interior de la envoltura, ya que esta sirve como pantalla o blindaje del interior. (Montoya, 2019).

En la investigación "Evaluación del riesgo por descargas atmosféricas en espacios deportivos de la Universidad Tecnológica de Pereira" se menciona la importancia de los arreglos de terminales aéreas, así como la explicación del principio de Faraday.

1.4.2.5 Aunque el fenómeno natural de descarga atmosférica abarca muchos posibles daños tanto estructurales, pérdidas de equipo sensible, pérdidas económicas o similares:

Las principales consecuencias de caída de rayos para instalaciones industriales o académicas son: riesgo del alumnado y personal administrativo, pérdida de producción,

pérdida de reservas, daños materiales y consecuencias por incendios con daños materiales y consecuencias por ignición de materiales explosivos, pérdida por daño de equipos electrónicos y de cómputo. (Salazar Paredes, 2018).

Como se menciona en el estudio "Diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas para el polideportivo y pabellón 'S' de la U.C.S.M.", existe un alto riesgo de daños significativos, incendios y pérdidas de vidas humanas. Por ello, la presente investigación se centrará en la importancia de implementar correctamente un sistema para proteger contra descargas atmosféricas. En este contexto, el estudio enfocará sus esfuerzos en diseñar un sistema de pararrayos para naves industriales, con el objetivo de mejorar la protección de los recursos, prevenir incendios y salvaguardar la vida de los trabajadores en estas instalaciones. A tal efecto, se llevará a cabo un caso de estudio para determinar el diseño óptimo de un sistema contra descargas atmosféricas tanto para naves industriales existentes como para futuras construcciones en la zona.

## **1.4.2 Antecedentes nacionales**

1.4.1.1 De acuerdo con la investigación "Diseño de puesta a tierra y sistemas de protección de pararrayos para una planta fotovoltaica de 500 kW en la sede central del Tecnológico de Costa Rica", los sistemas de pararrayos deben ser diseñados de manera tal, que puedan sobrellevar las altas corrientes de una descarga atmosférica:

Los sistemas eléctricos deben conectarse a tierra, de manera que disminuyan la tensión generada por descargas atmosféricas, sobretensiones en la línea o contactos accidentales con líneas de mayor voltaje, y que estabilicen la tensión durante el funcionamiento normal. Por tanto, es esencial que el sistema de puesta a tierra pueda disipar corriente y limitar la sobretensión causada por los rayos, evitando así daños a los equipos protegidos (Cerdas, 2017).

La investigación tomada como base y antecedente describe los diversos tipos de pararrayos existentes, así como las distintas normativas de referencia que sirven de guía

para el diseño adecuado de sistemas de protección contra descargas atmosféricas; al igual que el presente estudio, la investigación base se limita a la normativa NFPA 780 para el diseño de un sistema de pararrayos basado en Puntas Franklin.

1.4.1.2 De acuerdo con la investigación “Diseño del sistema de seguridad electrónica, sistema de puesta a tierra, pararrayos y su alimentación eléctrica autosustentable para las radio bases de telefonía celular en zonas remotas y conflictivas del Instituto Costarricense de Electricidad” se deben tomar en cuenta datos de los elementos del sistema como lo son soportes, dispositivos de conexión, resistividad y ampacidad del cableado y las diferentes conexiones requeridas para lograr así el objetivo. Según Kinderson (2017):

En el caso del cable de bajante para rayos se utilizará –como mínimo– 2/0 AWG en cobre trenzado. Así se establecerá una resistencia objetivo de  $0.010\Omega$  con una distancia máxima de 37 metros en caída vertical. Esta cumple a cabalidad con la altura de la radio base, cuya medida es de 30 metros. El bajante deberá ir unido a una punta franklin que canalizará la corriente del rayo a tierra. El mismo deberá formar un cono desde la proyección perpendicular del suelo. Se definirá una generatriz que será la línea de protección de la RBS contra el rayo. (p. 78)

La investigación aborda el cálculo de la cantidad de bajantes, un aspecto crucial para lograr una correcta disipación de las descargas eléctricas. La cantidad y ubicación de dichos bajantes es esencial para el óptimo funcionamiento del sistema. Los calibres de los cables y los soportes son calculados y a nivel de diseño se realizan las indicaciones y recomendaciones para la ubicación de los soportes, esto con el fin de evitar desprendimientos del cableado.

1.4.1.3 La investigación comenzará con los conceptos básicos del diseño de un sistema de protección contra descargas atmosféricas y avanzará hasta abordar los aspectos más complejos de este tipo de sistemas. Se explicará la naturaleza y función de un pararrayos, profundizando en el funcionamiento específico de una punta Franklin y del sistema en su

totalidad. Este enfoque es similar al adoptado en la investigación "Diseño de sistema de supervisión de elementos externos a estaciones de Telecomunicaciones". Un dispositivo pararrayos está diseñado para atraer un rayo mediante la ionización del aire, guiando la descarga hacia el suelo para evitar daños a edificaciones o personas (Bedoya, 2010). El proyecto pretende diseñar de manera teórica un caso de estudio en el cual se requiera el uso de un sistema de pararrayos de puntas Franklin de acuerdo con la normativa NFPA 780.

1.4.1.4 El diseño de un sistema de pararrayos que sigue la normativa NFPA 780 y utiliza las puntas Franklin, se diferencia de otras regulaciones debido a su origen en los organismos encargados de actualizar el código eléctrico nacional, como la NFPA 70. Estas normativas sirven de base para diseñar sistemas conforme a las mejores prácticas de seguridad eléctrica. Este enfoque se menciona en el estudio titulado 'Rediseño eléctrico del sistema de potencia y emergencia del edificio La Colmena, San José, Costa Rica', y es importante resaltar que la normativa NFC 17-102 no ha sido reconocida por entidades como la NFPA. Según Brenes (2019):

En el sitio se encuentra una falta al código donde su anterior sistema se escogió del tipo con dispositivo de cebado (ionizante) por supuesta recomendación del fabricante, el mismo consiste en un sistema que por medio de electrodos inferiores que utilizan la energía eléctrica ambiental, lo cual convierte al sistema en un ente autónomo que no necesita ninguna fuente de poder. El mismo se basa en la norma francesa NFC 17-102, sobre la cual el código eléctrico nacional establece que no cuenta con el aval de las normas de instalación americanas NFPA 70 y UL96A, tampoco ha sido aceptada por la norma IEC62395 (Norma europea de pararrayos). (p. 106).

1.4.1.5 Los elementos del sistema de pararrayos deben estar sólidamente aterrizados, cada bajante debe contar con una varilla de puesta a tierra, la cual a su vez estará conectada al anillo perimetral de la nave industrial. El objetivo de este anillo y estas varillas de puesta a tierra colocadas en cada bajante es reducir al máximo la resistencia del sistema, creando un camino de menor impedancia para descargar la energía del rayo

a tierra, esto se explica de manera correcta en el estudio “Análisis y diseño de la instalación de un pararrayos en zonas de riesgo de descargas atmosféricas según las normas NFPA 70, NFPA780 e IEC 62305”.

Cada conductor de descarga de un pararrayos debe estar conectado a su propia configuración de conexión a tierra. La configuración de tierra consiste en un triángulo formado por tres varillas dispuestas de manera que cada una sirva como vértice, todas ellas fabricadas con acero de cobre, lo que resulta en una longitud mínima de 6 metros (Córdoba, 2012).

La disposición de las varillas de tierra se determinará según la resistividad del suelo, información que puede ser proporcionada por el cliente en función de un estudio de suelos. En el caso de esta investigación, se cuenta con un estudio de este tipo como referencia para calcular la configuración de la malla de tierra.

## **1.5 PROYECCIONES**

Posterior a explicar a detalle los conceptos claves de la formación de descargas atmosféricas, explicar la normativa NFPA 780 versión 2014 que aplica en Costa Rica, el documento de investigación pretende obtener los siguientes resultados:

1. Elaboración de una guía de diseño básica y de fácil entendimiento para profesionales con y sin experiencia en el ámbito de los sistemas contra descargas atmosféricas.
2. Desarrollo de un ejemplo claro sobre un sistema contra descargas atmosféricas en una nave industrial de manera ilustrativa para los lectores.
3. Creación de una lista de materiales para el diseño de un sistema contra descargas atmosféricas con base en el ejemplo ilustrativo antes mencionado.
4. Recopilación de experiencias, puntos de discrepancia entre profesionales sobre la interpretación de la normativa vigente NFPA 780 versión 2014 mediante la aplicación de una encuesta.

### **1.5.1 Alcances**

El presente estudio de investigación toma como referencia la Zona Franca de La Lima de Cartago, donde se ubica un parque industrial con diversas naves industriales y amplias adyacentes. El estudio abarca la correcta interpretación de la normativa NFPA 780, con el fin de salvaguardar la vida humana frente a los riesgos asociados a las descargas atmosféricas. Cabe señalar que no se toma en cuenta potenciales pérdidas económicas producidas por estos eventos como el paro de la producción, daños estructurales o daños a equipos sensibles.

Se pretende otorgar de manera gratuita este estudio como ya lo es una investigación de esta índole, así como también una breve explicación que será donada al personal administrativo del parque industrial Zona Franca la Lima de Cartago, esto con el fin de beneficiarlos en el entendimiento de las buenas prácticas de diseño de un sistema de pararrayos o descargas atmosféricas para evaluar los sistemas actualmente instalados o para futuros proyectos por construir.

### **1.5.2 Limitaciones**

Si bien la presente investigación no se vio impedida de alcanzar sus objetivos, se topó con algunas limitaciones, las cuales se enlistan a continuación:

1. Se toma como caso de estudio una nave industrial que se encuentra en construcción, no obstante, el propietario no desea dar a conocer el nombre de la empresa, por lo cual se asume como una nave industrial prototipo.
2. Algunos de los profesionales que habían aceptado participar en entrevistas y encuestas no pudieron hacerlo por motivos laborales.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

Primeramente, es imperativo entender desde un punto de vista teórico, una serie de conceptos referentes a descargas atmosféricas. Esto incluye la formación de los rayos, las variables que influyen en su constitución, y las herramientas y datos que se tomaron en cuenta para crear este trabajo. A continuación, se explica brevemente cada una de las herramientas utilizadas, seguida de una exposición de los conceptos técnicos y teóricos.

## **2.1 HERRAMIENTAS INGENIERILES**

Seguidamente se detallan las herramientas y conceptos ingenieriles que se tomaron en cuenta para el desarrollo del presente estudio.

### **2.1.1 Análisis de normativa *National Fire Protection Association NFPA 780***

El presente estudio analiza en detalle la normativa vigente a nivel internacional NFPA 780 en su versión en español, la cual contiene la información para el diseño adecuado de un sistema contra descargas atmosféricas. Según López, (2014), “El propósito de la presente norma debe ser el de brindar los medios de protección para personas y propiedad contra los riesgos que surgen de la exposición a los rayos” de manera tal que se estarán utilizando los elementos, cálculos y métodos para el correcto funcionamiento del sistema, con el objetivo primordial de salvaguardar la vida humana.

### **2.1.2 Análisis de radios de cobertura de las puntas Franklin por medio del software AutoCAD**

Se evalúa por medio del software AutoCAD los radios de cobertura con los cuales cuentan las puntas Franklin en el diseño de un sistema contra descargas atmosféricas, de acuerdo con lo indicado en la normativa NFPA 780. Se generarán secciones para realizar la metodología correcta en el cálculo por el método de la esfera rodante. La información obtenida mediante el software AutoCAD resulta fundamental para este estudio, ya que proporciona la certeza de que se utilizarán las dimensiones y distancias adecuadas para el caso de estudio en cuestión.

### **2.1.3 Análisis de cálculos por medio del software AutoCAD para determinar la cantidad y disposición óptima de los componentes del sistema de pararrayos**

Se examina por medio del software AutoCAD las ubicaciones ideales para la colocación de los componentes del sistema de pararrayos, incluyendo los conductores de bajada, el mástil y los conductores de puesta a tierra, en un sistema contra descargas atmosféricas de acuerdo con la normativa NFPA 780. Esta información es de suma importancia, dado que el software proporciona una vista más amplia de la estructura de la nave industrial del caso de estudio, lo que permite con detalle milimétrico contar con las dimensiones reales y con ello decidir la mejor ubicación de los elementos de acuerdo con la normativa NFPA 780.

### **2.1.4 Analizar la resistividad eléctrica presente en el suelo por medio de un estudio de suelos**

Se analizan los datos del estudio de suelos con respecto a la resistividad eléctrica de una nave industrial que se encuentra en proceso de construcción. El parque industrial proporciona los datos de este estudio y se presentan en forma de tablas de datos.

### **2.1.5 Encuesta a Profesionales sobre la interpretación y diseño con respecto a la normativa NFPA 780 en su versión 2014**

Se realiza una breve encuesta dirigida a distintos profesionales destacados en el área de diseño. El objetivo de esta encuesta es obtener una perspectiva amplia y diversificada sobre las diferentes interpretaciones y enfoques que estos expertos pueden tener en relación con la normativa NFPA 780. Este ejercicio busca identificar las variaciones en la comprensión y aplicación de dicha normativa, así como recopilar opiniones y experiencias que puedan enriquecer el análisis del cumplimiento y la implementación de los estándares de protección contra descargas atmosféricas.

## **2.2 CONCEPTOS TEÓRICOS**

A continuación, se abordan los conceptos teóricos que serán utilizados en este estudio

### **2.2.1 El rayo y formación de descargas atmosféricas**

Las descargas atmosféricas o rayos, como comúnmente se conocen. Según Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (2020), "Los rayos, son la rápida descarga de electricidad entre regiones de cargas opuestas, constituyen uno de los principales peligros de las tormentas" (párr. 1).

La descarga eléctrica que se dirige hacia la tierra se conoce como rayo, mientras que aquella que viaja de una nube a otra se denomina relámpago, aunque comúnmente se utilizan indistintamente para referirse al mismo evento.

Una descarga se da cuando las cargas entre las nubes se separan generando que el aire se ionice y se logra vencer la constante dieléctrica, por lo que permite el paso de la descarga. A pesar de la falta de comprensión completa sobre el proceso de formación de los rayos, se entiende que tanto el hielo como el agua deben estar presentes en la nube para que las cargas eléctricas se separen lo necesario y desencadenen la descarga eléctrica.

Las descargas desde las nubes hasta el suelo son las más mortales. Por lo general, lo que se identifica como un rayo no es el recorrido inicial entre la nube y el suelo, ya que esto ocurre demasiado rápido para ser percibido, sino más bien, la descarga que regresa desde la superficie.

Estas descargas normalmente se presentan en nubes cumulonimbos. Según el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (2020). "Son elementos similares a una masa nubosa densa y poderosa, de gran altura vertical, adoptando la forma de una montaña o de gigantescas torres" (párr. 17).

La base de estas nubes se sitúa a una altitud que oscila entre 700 y 1.500 metros, mientras que sus picos alcanzan alturas de entre 24 y 35 kilómetros. Estas formaciones están compuestas por una mezcla de gotas de agua, cristales de hielo, gotas súper enfriadas, así como áreas de nieve y granizo.

**Figura 2.1 Nube cumulonimbos**

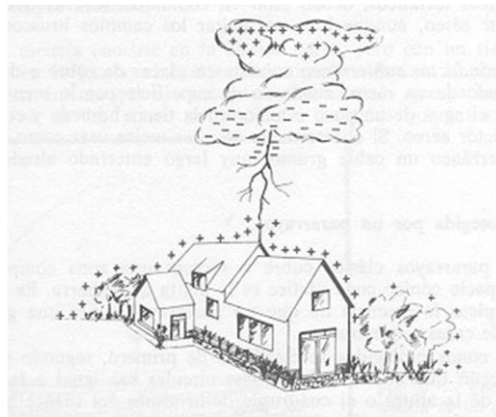


Tomado de Alvarado, (2023).

Cuando se forman las nubes de tormenta, se produce una alteración en el equilibrio de cargas positivas y negativas en la atmósfera debido a la polarización de las cargas eléctricas.

Durante una tormenta, la facilitación del paso de la chispa eléctrica ocurre gracias a que la tierra debajo de la nube adquiere una carga contraria, la parte inferior de las nubes adquiere una carga negativa, lo que induce una carga positiva en la tierra y en los objetos cercanos, este fenómeno se conoce como inducción electrostática. Esto da lugar a la creación de un campo eléctrico que puede alcanzar varios kilovoltios.

**Figura 2.2 Ionización de nube y carga del terreno**



Tomado de EMC, (s.f.).

La nube se carga eléctricamente mediante diversos procesos de electrificación, siendo uno de los principales, la colisión entre partículas de granizo blando o graupel de tamaño milimétrico y pequeños cristales de hielo en presencia de gotas de agua súper enfriada.

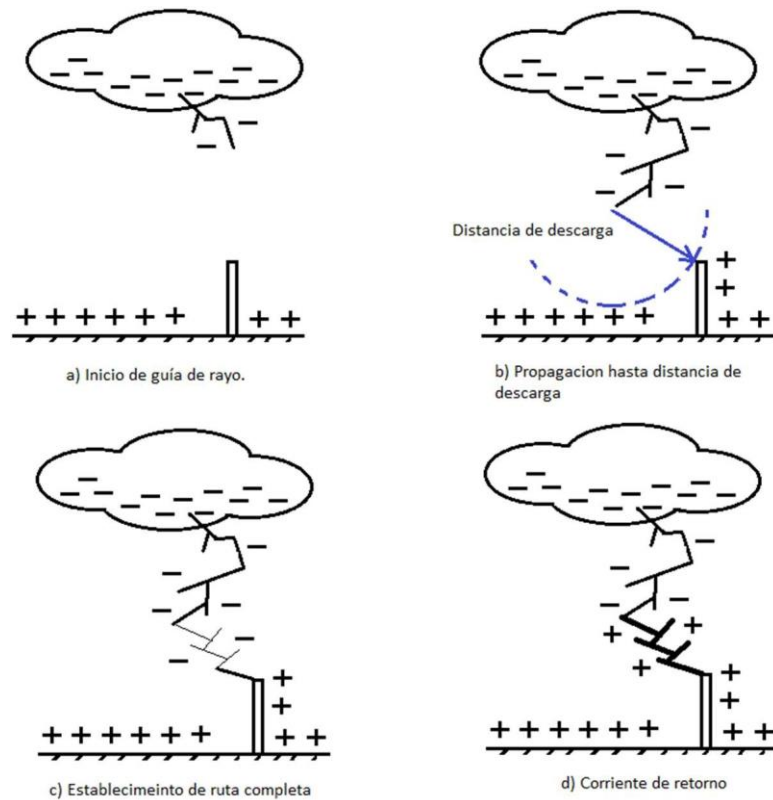
**Figura 2.3** Fotografía de granizo blando o graupel.



Tomado de Infobae, (2024).

Como se puede observar en la figura 2.2, la ionización de la nube desplaza las cargas positivas y negativas, así como también con el terreno y elementos sobre la superficie; cuando el campo eléctrico del aire supera su nivel de ionización, este pasa de ser un aislante a un conductor, permitiendo de tal forma crear un camino para que la carga de la nube busque la ruta más directa hacia la tierra, la descarga buscará el camino más corto, por lo cual, y generalmente, los elementos de mayor altura crearán esta vía.

**Figura 2.4** Formación de trazador descendente y ascendente



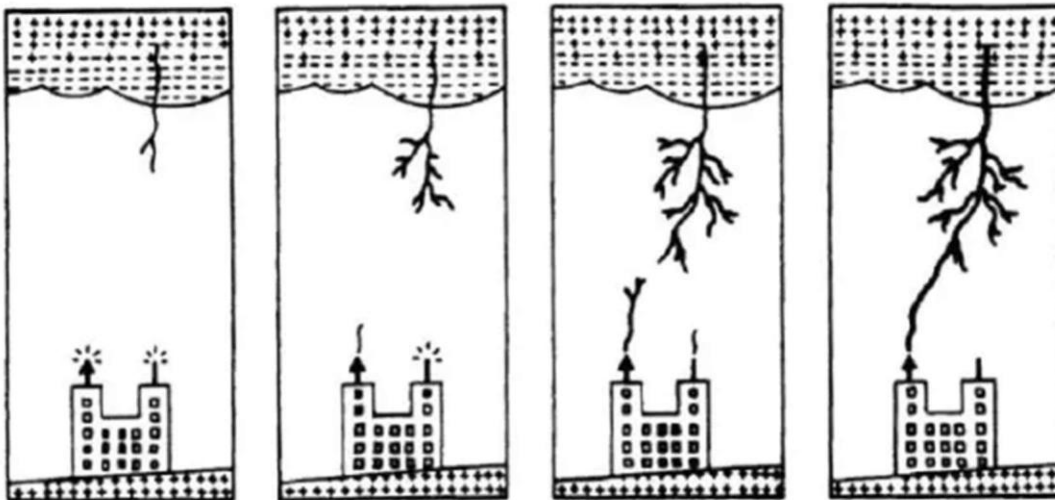
Tomado de Torrez, (2020).

En el proceso descrito se forma un trazador descendente, también conocido en inglés como *stepped leader*, que emerge de la nube llevando consigo parte de su carga. Este trazador avanza en pasos discretos o saltos a lo largo del camino del rayo desde la nube hasta la tierra. Durante su trayecto, el trazador puede ramificarse en múltiples direcciones, pero siempre avanza en pasos que están determinados por la corriente asociada a la descarga.

Una vez que el rayo se acerca lo suficiente al suelo, el campo eléctrico en la superficie terrestre se intensifica, provocando que uno o varios puntos de objetos conectados a tierra emitan descargas *corona*, las cuales hacen referencia a un fenómeno eléctrico producto de la ionización del gas que rodea a un conductor cargado. A partir de estas descargas, se forman los líderes ascendentes o trazadores. El primer líder ascendente

que se encuentre con un líder descendente establecerá un camino de descarga entre la nube y el suelo. En el momento final del salto del líder descendente, su dirección ya no es aleatoria, sino que es influenciada por el líder ascendente más cercano. Lo explicado anteriormente se puede visualizar de manera más sencilla en la figura 2.4.

**Figura 2.5** Ejemplo de formación de trazador descendente y ascendente.



Tomado de Gal Electric, (2020).

En la figura 2.5 se ejemplifica cómo se forma la descarga atmosférica y cómo se realiza la formación del trazador descendente y el trazador ascendente con respecto a una edificación. Como puede visualizarse en la imagen, aun cuando los dos elementos con mayor altura de la edificación generaron un trazador ascendente, el trazador descendente realizó la conexión y la descarga con el elemento de la izquierda; no obstante, se pudo realizar para el elemento de la derecha o para ambos. Este ejemplo de polarización y formación de trazadores se puede proyectar a otras edificaciones, personas, animales o al suelo terrestre como tal.

### **2.2.2 El pararrayos**

El pararrayos es un sistema que consiste en una o varias varas metálicas afiladas, con excelentes propiedades conductoras de electricidad, que se colocan en la parte más alta de un edificio u otra estructura que lo necesite. Estas varas metálicas se conectan

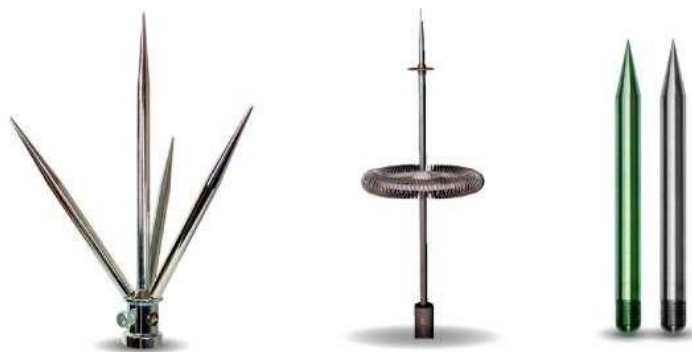
mediante un cable grueso de cobre a una placa del mismo metal, la cual se entierra profundamente en el suelo.

Los electrones, al ser partículas con carga eléctrica negativa, pueden desplazarse con facilidad a través del pararrayos. En el caso de una descarga atmosférica, esta energía seguirá la ruta más directa y accesible para disiparse. Dado que el pararrayos está conectado a tierra y ofrece una trayectoria de baja impedancia, la descarga eléctrica optará por este camino. Consecuentemente, la energía del rayo será conducida a través de las puntas del pararrayos y los conductores de bajada hasta la tierra, donde se disipará de forma segura. De esta manera, el sistema de pararrayos cumple con su función de proteger la estructura y su entorno de los daños potenciales asociados a las descargas atmosféricas.

Los elementos básicos que conforman un sistema de pararrayos se pueden resumir de la siguiente forma:

- Terminal aérea o captor de rayos: Es el elemento expuesto al aire y está diseñado para atraer y capturar los rayos. En este elemento se genera el “efecto punta” dado que las cargas se acumulan ocasionando una aglomeración del campo electrostático ante una superficie pronunciada.

**Figura 2.6 Ejemplos de terminales aéreas, puntas Franklin**



Tomado de Cenergía. (2021).

- Conductor de descarga: Es el cable conductor que conecta el terminal aéreo con el sistema de conexión a tierra. Este conductor es esencial en el sistema, su función principal es proporcionar un camino de baja resistencia para que la corriente eléctrica generada por un rayo sea conducida de manera segura

**Figura 2.7** Ejemplo de conductor de descarga



Tomado de Electro Persa, (2022).

- Sistema de conexión a tierra: Es un conjunto de dispositivos y estructuras diseñados para proporcionar un camino seguro y eficiente para que la corriente eléctrica fluya hacia la tierra en caso de una falla eléctrica o una descarga atmosférica, como un rayo. Incluye el cable de conexión a tierra y los electrodos de puesta a tierra, que se encargan de disipar la energía del rayo hacia la tierra de manera segura.

**Figura 2.8** Ejemplo de sistema de conexión a tierra



Tomado de Prosegsa, (s.f.)

Dispositivos de protección: Pueden incluir dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias, como supresores de sobretensión, para proteger los equipos eléctricos y electrónicos conectados al sistema de pararrayos.

**Figura 2.9** Ejemplo de supresor de transientes SPD



Tomado de Eproteca, (s.f.)

Conductores de interconexión: Son los cables o conexiones que unen todas las partes del sistema de pararrayos para garantizar su correcto funcionamiento y protección contra rayos.

**Figura 2.10 Ejemplo de interconexión de conductores**



Tomado de Morgan, (s.f.).

Contador de eventos: Es un dispositivo que se instala en el bajante del pararrayos, el cual permite contar de forma automática el número de impactos que recibe el sistema de protección contra el rayo.

**Figura 2.11 Ejemplo de contador de eventos**



Tomado de Corpelima, (2023).

### 2.2.3 Métodos de cálculo aplicados según NFPA 780 versión 2014

De acuerdo con la normativa NFPA 780 en su versión 2014, existen diversos métodos de cálculo para la colocación de puntas captadoras de rayos, que varían en distribución, distancias y alturas. Estos métodos se resumen en los siguientes tres:

- Método del ángulo: Este método permite la aplicación de una o varias puntas captadoras que forman un cono de protección. El ángulo del cono varía entre  $45^\circ$  y  $63^\circ$  respecto a la vertical, definiendo así la zona de protección. Este método es comúnmente utilizado en techos múltiples.
- Método de la esfera rodante: Este método se basa en un modelado 3D de la estructura. Se hace rodar una esfera de 46 metros de radio sobre la edificación hasta tocar el suelo, identificando los puntos de contacto con la estructura. En estos puntos se colocan las puntas captadoras, asegurando que ningún punto de contacto con el techo quede sin protección.
- Método de mallas: Este método se basa en distancias predeterminadas según la normativa NFPA 780. Siguiendo un patrón de distanciamiento entre puntas captadoras, se evita que haya puntos de contacto sin protección en el techo.

### 2.2.4 Análisis de sistema de puesta a tierra mediante las ecuaciones de Schwarz

El análisis de sistema de puesta a tierra se lleva a cabo gracias a la colaboración de las fórmulas de Schwarz. De acuerdo con el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* 80 (de ahora en adelante IEEE-80), Schwarz desarrolló una serie de ecuaciones para determinar la resistencia total de un sistema de puesta a tierra en un suelo homogéneo, que consiste en electrodos horizontales (la malla) y verticales (barras o varillas). Las ecuaciones ampliadas de Schwarz presentan un conductor recto horizontal que representa la resistencia de tierra  $R_1$  de una red formada por conductores entrelazados, y una esfera incrustada en la tierra que representa las varillas  $R_2$ . También presentó una ecuación para la resistencia de tierra mutua  $R_m$  entre la malla y las varillas.

Schwarz utilizó una fórmula, introducida por Sunde y Rüdénberg para combinar la resistencia de la red, las barras y la resistencia mutua, con el fin de calcular la resistencia

total del sistema,  $R_g$ . El análisis del sistema de puesta a tierra, así como la aplicación de dichas ecuaciones se estarán evaluando en el siguiente capítulo de este estudio.

### **2.2.5 Consecuencias de las descargas atmosféricas**

Las descargas atmosféricas pueden tener una serie de consecuencias tanto en términos de impacto ambiental como en términos de seguridad humana. A continuación, se explican brevemente algunas de las principales consecuencias:

- Incendios forestales: Los rayos pueden causar incendios forestales cuando impactan en áreas con vegetación seca y combustible. Estos incendios pueden extenderse rápidamente y causar daños significativos al ecosistema, la propiedad y la vida silvestre.
- Daños a estructuras: Los rayos pueden golpear edificios, árboles, torres de comunicación, líneas eléctricas y otras estructuras, lo que puede causar daños estructurales, incendios y fallos en equipos electrónicos.
- Lesiones y muertes: Las personas pueden resultar heridas o incluso morir como resultado directo de ser alcanzadas por un rayo. Además, las personas también pueden resultar heridas por la caída de escombros o incendios causados por los rayos.
- Daños a equipos electrónicos: Los rayos pueden causar sobretensiones en las redes eléctricas, lo que puede dañar equipos electrónicos sensibles, como computadoras, televisores, sistemas de seguridad, etc.
- Impacto en la vida silvestre: Los rayos pueden afectar negativamente a la vida silvestre al destruir hábitats, causar incendios forestales y provocar lesiones o muertes directas a los animales.
- Impacto en la agricultura: Los rayos pueden dañar los cultivos, los sistemas de riego y otras infraestructuras agrícolas, lo que puede tener consecuencias económicas significativas para los agricultores y las comunidades agrícolas.

Los puntos antes mencionados representan solo algunas de las consecuencias más comunes de las descargas atmosféricas. Es importante tener en cuenta que la magnitud

de estas consecuencias puede variar según diversos factores como la intensidad de la descarga, la ubicación geográfica y las medidas de mitigación implementadas.

Dado que las cargas eléctricas tienden a concentrarse en puntos elevados, como edificios o árboles, los pararrayos se consideran la mejor protección contra los rayos.

Según las recomendaciones del Instituto Meteorológico Nacional, ante una tormenta se aconseja lo siguiente:

1. Evitar refugiarse bajo árboles aislados, ya que la humedad y la altura aumentan el riesgo de atracción de rayos. Los árboles en bosques ofrecen una protección relativa al dispersar la chispa eléctrica.
2. En el campo, no correr para evitar tormentas, ya que es peligroso. No es recomendable acostarse en el suelo mojado, sino adoptar una posición de cuclillas: sentarse con los pies juntos, la cabeza entre las rodillas y las manos tapando las orejas o estiradas contra las rodillas.
3. En áreas rurales, cerrar puertas y ventanas, y evitar caminar sobre suelos húmedos o con calzado mojado.
4. No permanecer en lugares altos como colinas durante la tormenta; buscar refugio en lugares bajos, pero no en quebradas o ríos.
5. Evitar salir a la puerta o dejar las ventanas abiertas.
6. No manipular herramientas ni objetos metálicos durante la tormenta.
7. Evitar el contacto con el agua, especialmente en la playa, cerca de ríos o lagos, ya que la salinidad aumenta el riesgo de efectos fatales.
8. Alejarse de verjas metálicas o vallas, ya que pueden ser peligrosas incluso sin contacto directo. Se recomienda evitar toda maquinaria, vehículos y herramientas.
9. En el interior de la casa, la cama de madera ofrece mayor seguridad durante una tormenta.
10. Evitar el uso de artefactos eléctricos y limitar el uso del teléfono a emergencias durante la tormenta.
11. No utilizar paraguas con puntas metálicas en lugares abiertos.

12. Los vehículos proporcionan un refugio seguro; se debe permanecer dentro del automóvil durante una tormenta.
13. Los edificios grandes como escuelas son lugares seguros durante una tormenta.

## **CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN**

El presente estudio empleará un enfoque metodológico mixto, también conocido como investigación mixta de métodos, combina tanto métodos cuantitativos y cualitativos en un mismo estudio, permitiendo a los investigadores abordar los fenómenos estudiados de manera más completa y holística.

En la investigación mixta, se pueden recopilar y analizar datos cuantitativos como radios de curvaturas, distancias entre elementos, dimensiones de elementos, así como costos económicos de elementos del sistema de pararrayos; y cualitativos como análisis de normativa NFPA 780 y sus respectivos artículos y conceptos, todo lo anterior, dado que se analizan documentos y discuten contextos legales en la misma investigación.

### **3.2 MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN**

El método o diseño según Hernández et al. (2014, p. 128), “se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea con el fin de resolver al planteamiento del problema”.

El método de la investigación implica varias etapas, que pueden variar dependiendo del enfoque metodológico específico, en el caso de este trabajo y como se indicó anteriormente, será de enfoque mixto e incluye las siguientes fases:

1. Se procede a analizar minuciosamente los preceptos establecidos en la normativa internacional NFPA 780, edición 2014, en su versión en español, la cual provee los lineamientos esenciales para la adecuada concepción de un sistema de protección contra descargas atmosféricas. Este documento engloba tanto los elementos necesarios como los cálculos y métodos pertinentes para asegurar el óptimo desempeño del sistema, con el fin último de preservar la integridad y seguridad de la vida humana, coincidiendo así con los objetivos de la presente investigación.
2. Se lleva a cabo un análisis detallado mediante el uso del software AutoCAD para determinar los radios de cobertura que poseen las puntas Franklin en el diseño de un sistema de protección contra descargas atmosféricas, conforme a las

directrices establecidas por la normativa NFPA 780. En este proceso, se generarán secciones específicas que facilitarán la correcta aplicación de la metodología requerida para el cálculo. Se ha elegido el método de la esfera rodante y de mallas, ya que ofrecen una visualización clara de las posibles intersecciones o puntos de impacto de los rayos sobre la edificación. La utilización de este software reviste una importancia crucial, ya que proporciona una garantía de precisión al emplear las dimensiones y distancias adecuadas para el caso en estudio. Esto asegura que el diseño del sistema contra descargas atmosféricas sea óptimo y cumpla con los estándares de seguridad requeridos, minimizando así los riesgos asociados a las descargas eléctricas atmosféricas y garantizando la protección efectiva de las estructuras y personas involucradas.

3. Se procede a analizar los cálculos a través del software AutoCAD para determinar la cantidad y la disposición óptima de los componentes del sistema de pararrayos en una nave industrial específica. Este método de investigación implica el uso del software AutoCAD para realizar una evaluación detallada de las ubicaciones ideales para la colocación de los componentes del sistema, incluyendo conductores de bajada, mástiles y conductores de puesta a tierra, entre otros, esto de acuerdo con los lineamientos establecidos por la normativa NFPA 780. La utilización de esta herramienta de diseño asistido por computadora permite obtener una visión completa y detallada de la estructura de la nave industrial en estudio, lo que facilita la identificación de áreas críticas que requieren protección contra descargas atmosféricas. Además, el software AutoCAD brinda la capacidad de realizar cálculos precisos y realizar ajustes en tiempo real, lo que garantiza una disposición óptima de los componentes del sistema de pararrayos para maximizar su eficacia y asegurar la protección adecuada de la estructura y de las personas que trabajan en ella.
4. Se realiza un análisis de la resistividad eléctrica del suelo en la ubicación de una nave industrial en construcción, basándose en los datos obtenidos del estudio de suelos realizado en el sitio. El análisis implica una evaluación detallada de estos datos, que proporcionan información clave sobre la resistividad eléctrica del suelo en el lugar específico de la nave industrial. Los datos recopilados durante el

estudio de suelos, proporcionados por el parque industrial, se presentan en forma de tablas que contienen información detallada sobre la resistividad eléctrica del suelo en diferentes áreas de la nave industrial. Además, este análisis también puede proporcionar información relevante para la implementación de medidas de seguridad y protección contra descargas atmosféricas, así como para el diseño de sistemas de puesta a tierra adecuados.

En resumen, este enfoque de investigación permite obtener una comprensión detallada de la resistividad eléctrica del suelo en una nave industrial en proceso de construcción, lo que es fundamental para garantizar la seguridad y el funcionamiento óptimo de los sistemas eléctricos en el lugar.

5. Se lleva a cabo una encuesta dirigida a una selección de profesionales destacados en el área de diseño, como lo son ingenieros eléctricos e ingenieros electromecánicos especializados en el diseño de sistemas de protección contra descargas atmosféricas. El objetivo principal de esta encuesta es obtener una visión completa y diversa sobre las diferentes interpretaciones y enfoques que estos expertos pueden tener en relación con la normativa NFPA 780, versión 2014 en español. El estudio se enfoca en identificar y analizar las variaciones en la comprensión y aplicación de dicha normativa. Se recopilan opiniones detalladas y experiencias prácticas que estos profesionales han tenido en la implementación de sistemas de protección contra descargas atmosféricas. Esta recopilación de datos busca enriquecer el análisis del cumplimiento de la normativa y su implementación efectiva en proyectos reales. La encuesta cuenta con las siguientes interrogantes:

- a. Desde su perspectiva ¿cuál es el propósito principal de la norma NFPA780?
- b. Si usted ha diseñado sistemas de protección contra descargas atmosféricas siguiendo la normativa NFPA 780, ¿podría señalar qué obstáculos o dificultades ha encontrado?
- c. En el diseño de sistemas de protección contra descargas atmosféricas, ¿considera que la norma NFPA780 es suficientemente clara, o podría dar pie a interpretaciones diferentes?

- d. De acuerdo con su experiencia, ¿podría mencionar algunas de las consideraciones que deben tenerse en cuenta al diseñar un sistema de protección contra descargas atmosféricas?
- e. ¿Qué medidas de seguridad deberían seguirse durante la instalación y mantenimiento de sistemas de protección contra descargas atmosféricas?
- f. ¿Qué pruebas deberían realizarse para verificar la eficacia de un sistema de protección contra descargas atmosféricas?
- g. ¿Cuáles considera son los principales errores que se cometen en el diseño de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas?

### 3.3 FUENTES DE INFORMACIÓN

Una fuente de información es cualquier recurso, material o medio que proporciona datos, hechos, conocimientos o ideas sobre un tema específico. Estas fuentes pueden ser de diferentes tipos, como libros, revistas, periódicos, documentos gubernamentales, informes técnicos, entrevistas, encuestas, sitios web, bases de datos.

Las fuentes de información pueden ser primarias o secundarias, dependiendo de la naturaleza y la originalidad de los datos que proporcionan. Según Miranda y Acosta (2009). “Son todos aquellos medios de los cuales procede la información, que satisfacen las necesidades de conocimiento de una situación o problema presentado y, que posteriormente será utilizado para lograr los objetivos esperados” (p.2).

Una fuente de información primaria es aquella que proporciona datos originales directamente relacionados con un evento, fenómeno o tema de investigación. Estas fuentes suelen ser documentos, investigaciones, estudios, encuestas, entrevistas u observaciones realizadas por el investigador o por alguien que estuvo presente en el momento del evento.

Por otro lado, una fuente de información secundaria es aquella que proporciona información que ha sido recopilada, analizada o interpretada por otros. Estas fuentes incluyen libros, artículos de revistas científicas, informes de investigación, bases de datos, enciclopedias y sitios web que recopilan datos de diversas fuentes primarias.

Las fuentes de información abarcan una amplia gama de recursos, y en esta investigación se incluyen las siguientes:

1. Fuentes en línea: Se cuenta con antecedentes, tesis y estudios de investigación sobre sistemas de pararrayos, sistemas de puesta a tierra y propuestas de diseño conforme a la normativa NFPA 780 para diversas aplicaciones.
2. Se utiliza adicionalmente la normativa NFPA 780 como fuente primaria, la cual puede ser visualizada de manera gratuita en su página web.

3. Se recibe un gran apoyo y respaldo por parte del departamento administrativo y de mantenimiento del parque industrial Zona Franca La Lima, quienes proporcionan información sobre la cantidad de naves industriales, la presencia de sistemas de descargas atmosféricas y la cantidad aproximada de empleados en el parque. El departamento administrativo del parque industrial también contribuye con estudios de suelos para analizar la resistividad eléctrica presente en el terreno.
4. El criterio de expertos en el diseño de sistemas de protección contra descargas atmosféricas.

### 3.3.1 Sujetos de información

**Tabla 3.1: Acta constitución del proyecto**

<b>ACTA CONSTITUCIÓN DEL PROYECTO</b>	
<b>1-Fecha:</b> 07/02/2024	<b>2-Nombre del Proyecto:</b> PROPUESTA DE UN SISTEMA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS BASADO EN LA NFPA 780 PARA NAVES INDUSTRIALES COMO MEDIO DE PROTECCIÓN PARA LA VIDA HUMANA
<b>3-Miembros:</b> Estudiante: Roberto José Solano Bonilla Tutor: Ing. Mario Alberto Ballar Calvo	<b>4-Área de Aplicación, Interesados del Proyecto:</b> Área de seguridad en diseño e inspección de ingeniería eléctrica, departamento administrativo del parque industrial Zona Franca La Lima Cartago,
<b>5-Fecha de Inicio del Proyecto</b> 13/01/2024	<b>6-Fecha Tentativa de Finalización</b> 28/06/2024
<b>7-Objetivos del Proyecto</b> <b>7.1 Objetivo General:</b> El objetivo principal de esta investigación es elaborar una guía básica de diseño de sistemas de protección contra descargas atmosféricas, basado en la normativa NFPA 780 en su versión 2014 en español. <b>7.2 Objetivos Específicos:</b> <b>7.2.1</b> Diseñar un sistema contra descargas atmosféricas para un caso de estudio de una nave industrial prototipo. <b>7.2.2</b> Elaborar una lista de materiales para el diseño de un sistema contra descargas atmosféricas para el caso de estudio de una nave industrial prototipo. <b>7.2.3</b> Realizar una encuesta a profesionales con experiencia en diseño eléctrico sobre la normativa NFPA 780, con el fin de identificar las formas de aplicación, las discrepancias en los criterios y las experiencias o desafíos durante el diseño conforme a esta normativa.	
<b>8-Descripción del Producto:</b> Propuesta de un sistema contra descargas atmosféricas para una nave industrial	
<b>Justificación del Proyecto:</b> Costa Rica experimenta una alta incidencia de rayos por kilómetro cuadrado en su territorio, estos fenómenos pueden ser mortales. Ante la imprevisibilidad de la trayectoria de los rayos, se busca investigar métodos para atraer y canalizar la energía de las descargas atmosféricas de manera controlada y segura. La normativa NFPA 780 proporciona pautas y cálculos utilizando puntas Franklin, con el objetivo de generar una ruta guiada para la descarga de energía, minimizando así el riesgo de incidentes y protegiendo la seguridad física de las personas.	
<b>Posibles Restricciones:</b> Confidencialidad del nombre de la empresa propietaria de la nave industrial estudiada, ausencia de datos sobre incidencias de rayos proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional, la falta de una versión en español de la normativa NFPA 780.	
<b>Clientes directos:</b> Ingenieros eléctricos e ingenieros electromecánicos <b>Clientes Indirectos:</b> Departamento administrativo del parque industrial Zona Franca La Lima Cartago	
<b>Líder del Proyecto de Investigación:</b> Roberto José Solano Bonilla	

Creación propia, (2024)

### **3.4 VARIABLES DE ANÁLISIS**

Una variable de análisis es una característica, propiedad o factor que se examina, estudia o mide en el contexto de un estudio, investigación o análisis. Estas variables pueden ser cualitativas o cuantitativas y se utilizan para comprender mejor un fenómeno, identificar relaciones entre diferentes elementos o evaluar el impacto de ciertos factores sobre un resultado específico.

**Tabla 3.2: Variables de la investigación por objetivo específico**

<b>Objetivo específico</b>	<b>Variable</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Operacionalización</b>	<b>Instrumentalización</b>
Elaborar una guía básica de diseño de sistemas de descargas atmosféricas con base en la normativa NFPA 780 para naves industriales.	Desarrollo de guía de diseño	Desarrollar una guía básica de diseño basada en la normativa NFPA 780.	Se analiza la normativa NFPA 780 para elaborar una guía básica de los puntos más importantes en un sistema de pararrayos.	Normativa NFPA 780, software AutoCAD.
Diseñar teóricamente un sistema contra descargas atmosféricas para un caso de estudio de una nave industrial.	Diseño teórico	Elaboración de un sistema contra descargas atmosféricas de manera teórica para una nave industrial.	Se analiza desde un punto teórico, el diseño de un sistema de pararrayos para una nave industrial con respecto a la normativa NFPA 780.	Normativa NFPA 780, software AutoCAD, análisis de resistividad eléctrica del suelo.
Elaborar una lista de materiales para el diseño de un sistema contra descargas atmosféricas para el caso de estudio de una nave industrial prototipo.	Desarrollo de lista de materiales	Desarrollo de una lista de materiales con sus respectivos costos para un sistema contra descargas atmosféricas.	Se realiza el análisis de cantidad, tipo y costo de los elementos incluidos en un sistema contra descargas atmosféricas.	Tabla de datos de elementos y costos asociados a cada uno de ellos.
Realizar una encuesta a profesionales de la rama eléctrica o electromecánica con el fin de identificar discrepancias en criterios sobre la normativa NFPA 780.	Desarrollo de encuesta	Entrevistar profesionales de la rama de ingeniería eléctrica sobre posibles discrepancias de criterios con base en la normativa NFPA 780.	Se analizan las respuestas emitidas por los distintos profesionales de la rama en ingeniería sobre experiencias, falencias, criterios y obstáculos encontrados al momento de diseñar con base en la normativa NFPA 780.	Cuestionario realizado a los profesionales de la rama.

Creación propia, (2024)

### 3.5 INSTRUMENTOS

1. Para esta etapa de la investigación, se procede a analizar minuciosamente los preceptos establecidos en la normativa internacional NFPA 780, edición 2014, en su versión en español. Esta normativa provee los lineamientos esenciales para la adecuada concepción de un sistema de protección contra descargas atmosféricas. El documento en cuestión engloba tanto los elementos necesarios como los cálculos y métodos pertinentes para asegurar el óptimo desempeño del sistema, con el fin último de preservar la integridad y seguridad de la vida humana, coincidiendo así con los objetivos de la presente investigación.

Este análisis minucioso de la NFPA 780 permitirá comprender a fondo los estándares y recomendaciones establecidos por esta normativa reconocida internacionalmente. Al examinar los requisitos y directrices detallados en el documento, se podrá evaluar la idoneidad y la aplicabilidad de estas normas en el contexto específico de la investigación sobre la protección contra descargas atmosféricas.

Además, este análisis proporcionará una base sólida para comparar y contrastar las prácticas y regulaciones existentes con los estándares internacionales establecidos por la NFPA 780. Esto permitirá identificar posibles brechas o áreas de mejora en la implementación de sistemas de protección contra descargas atmosféricas, así como sugerir recomendaciones para alinear las prácticas locales con los estándares internacionales de seguridad.

**Figura 3.1** Tabla de Datos por Analizar Respecto a la NFPA 780

Análisis de Normativa NFPA 780	
Capítulo	Análisis
1- Administración	Analizar el alcance de la normativa Analizar el propósito de la normativa Entender las unidades de medida utilizadas
3- Definiciones	Analizar los conceptos claves Analizar las definiciones Entender el lenguaje utilizado y los elementos del sistema de pararrayos
4- Requisitos Generales	Analizar ubicación de dispositivos Analizar cantidad de elementos Analizar distancias permitidas por la normativa Analizar limitaciones y restricciones del sistema

Creación propia, (2024).

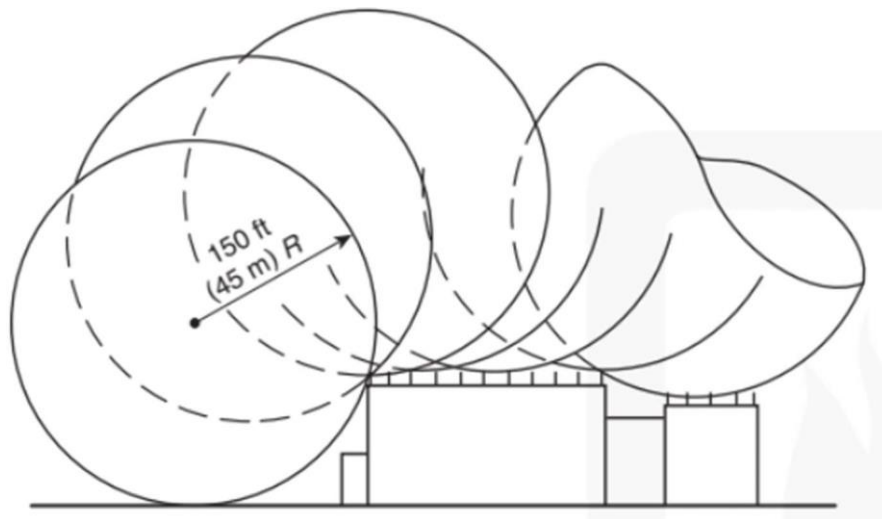
2. Se lleva a cabo un análisis detallado mediante el uso del software AutoCAD con el objetivo de determinar los radios de cobertura que poseen las puntas Franklin en el diseño de un sistema de protección contra descargas atmosféricas, conforme a las directrices establecidas por la normativa NFPA 780.

En este proceso, se generarán secciones específicas que facilitarán la aplicación correcta de la metodología requerida para el cálculo, utilizando el método de la esfera rodante. La utilización de este software reviste una importancia crucial, ya que proporciona una garantía de precisión al emplear las dimensiones y distancias adecuadas para el caso de estudio en particular.

Esta precisión asegura que el diseño del sistema contra descargas atmosféricas sea óptimo y cumpla con los estándares de seguridad requeridos, minimizando así los riesgos asociados a las descargas eléctricas atmosféricas y garantizando la protección efectiva de las estructuras y personas involucradas.

El análisis detallado que se llevó a cabo con el software AutoCAD permitirá visualizar con claridad los radios de cobertura de las puntas Franklin y su impacto en la protección contra descargas atmosféricas. Esto proporcionará una base sólida para la toma de decisiones en el diseño del sistema de protección, asegurando su eficacia y cumplimiento de las normativas vigentes.

**Figura 3.2 Ejemplo de Cálculo de Radios de Cobertura por Medio de la Esfera Rodante**



Tomado de López, (2014).

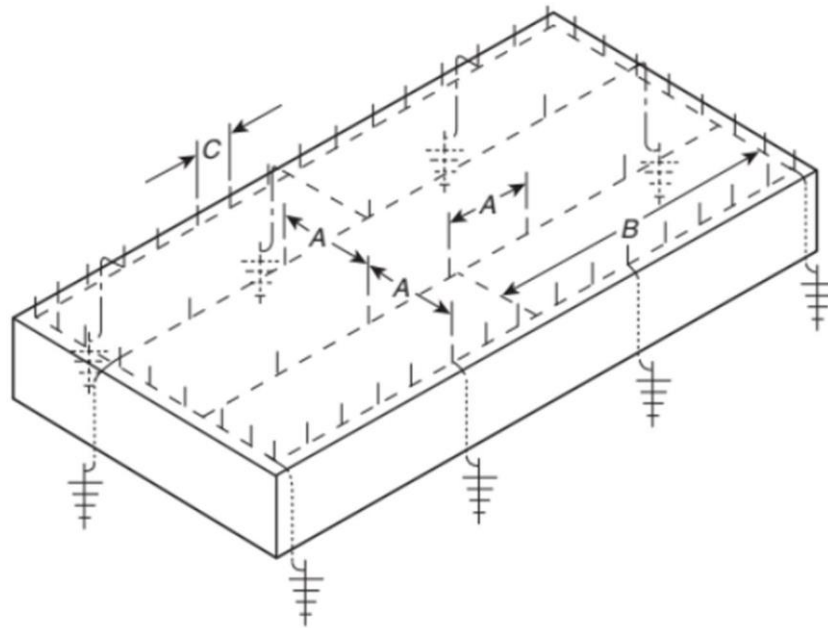
3. La elección de utilizar el software AutoCAD para analizar los cálculos y determinar la cantidad y disposición óptima de los componentes del sistema de pararrayos en una nave industrial específica, se basa en su capacidad para realizar evaluaciones detalladas y precisas, siguiendo los lineamientos establecidos por la normativa NFPA 780.

Este método de investigación implica el uso de AutoCAD para llevar a cabo una evaluación minuciosa de las ubicaciones ideales para la colocación de los componentes del sistema, tales como conductores de bajada, mástiles y conductores de puesta a tierra. Esta herramienta de diseño asistido por computadora proporciona una visión completa y detallada de la estructura de la

nave industrial en estudio, facilitando la identificación de áreas críticas que requieren protección contra descargas atmosféricas.

Además, AutoCAD ofrece la capacidad de realizar cálculos precisos y ajustes en tiempo real, lo que garantiza una disposición óptima de los componentes del sistema de pararrayos. Esto permite maximizar su eficacia y asegurar la protección adecuada de la estructura y de las personas que trabajan en ella. La utilización de esta herramienta contribuye a la elaboración de un diseño de sistema de pararrayos que cumpla con los estándares de seguridad y las normativas vigentes, proporcionando así una solución efectiva para mitigar los riesgos asociados a las descargas atmosféricas en la nave industrial en cuestión.

**Figura 3.3 Ejemplo de Ubicación de Puntas Franklin Según NFPA 780.**



- A: 50 ft (15 m) maximum spacing between air terminals
- B: 150 ft (45 m) maximum length of cross-run conductor permitted without a connection from the cross-run conductor to the main perimeter or down conductor
- C: 20 ft (6 m) or 25 ft (7.6 m) maximum spacings between air terminals along edge

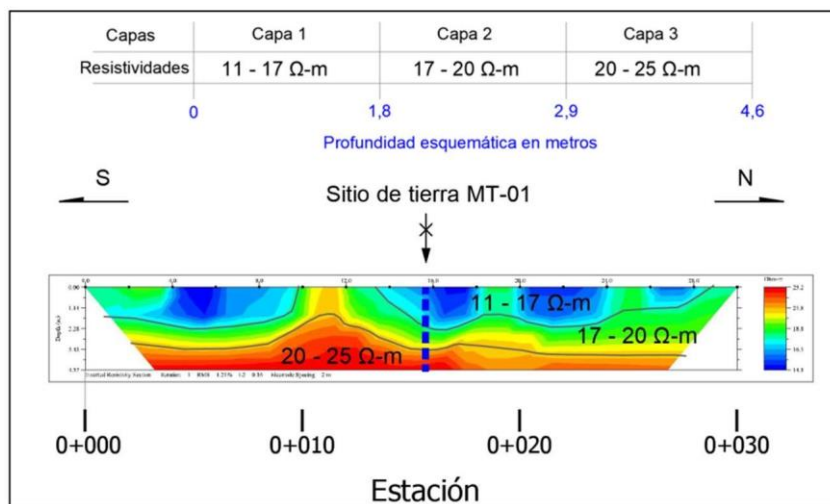
Tomado de López, (2014).

- El enfoque de investigación adoptado se centra en el análisis de la resistividad eléctrica del suelo mediante un estudio de suelos realizado en una nave industrial en proceso de construcción. Este análisis implica la evaluación detallada de los datos obtenidos del estudio de suelos, los cuales proporcionan información crucial sobre la resistividad eléctrica del suelo en la ubicación específica de la nave industrial.

Los datos recopilados del estudio de suelos, que el parque industrial proporcionó en forma de tablas de datos, contienen información detallada sobre la resistividad eléctrica del suelo en diferentes áreas de la nave industrial en construcción. Estas tablas ofrecen una visión general de la resistividad del suelo en el parque industrial, lo que es fundamental para comprender su idoneidad para la instalación de sistemas eléctricos y de pararrayos.

En resumen, este enfoque de investigación permite obtener una comprensión detallada de la resistividad eléctrica del suelo en una nave industrial en proceso de construcción, lo que es fundamental para garantizar la seguridad y el funcionamiento óptimo de los sistemas eléctricos en el lugar.

**Figura 3.4 Ejemplo de Estudio de Suelos, Resistividad Eléctrica**



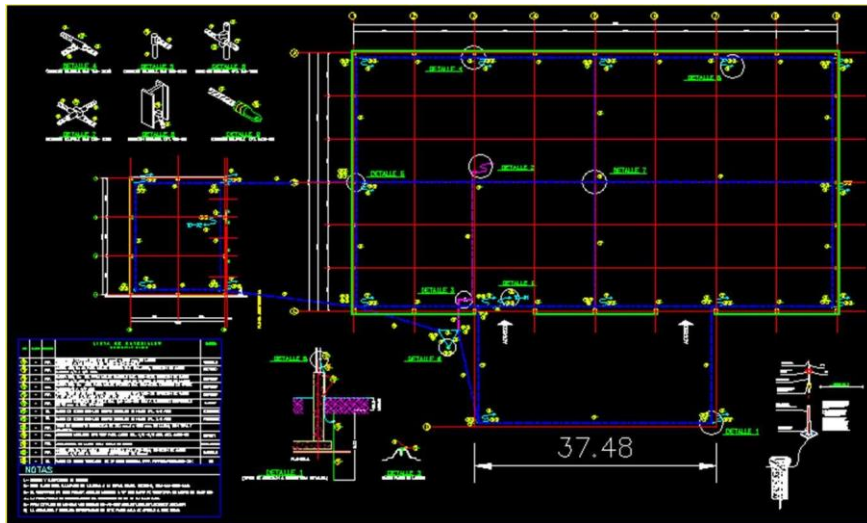
Tomado de Valverde, (2023).

5. Se propone el desarrollo de un sistema contra descargas atmosféricas para una nave industrial en la Zona Franca de La Lima de Cartago. El diseño de este sistema se basará en un caso de estudio de una nave industrial teórica o prototipo.

La propuesta se desarrollará teniendo en cuenta las particularidades de la nave industrial y su entorno, así como las normativas y mejores prácticas en protección contra descargas atmosféricas. Se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los planos para identificar áreas críticas que requieran ser protegidas y determinar la disposición óptima de los componentes del sistema como puntas de pararrayos, conductores de bajada y sistemas de puesta a tierra.

Además, se realizará una evaluación de las condiciones del suelo mediante el estudio de suelos mencionado anteriormente. Se considerarán también las normativas locales y nacionales relacionadas con la instalación y mantenimiento de sistemas de descargas atmosféricas, garantizando así que la propuesta cumpla con los estándares y regulaciones vigentes en materia de seguridad eléctrica.

**Figura 3.5 Ejemplo de Propuesta de Sistema contra Descargas Atmosféricas**



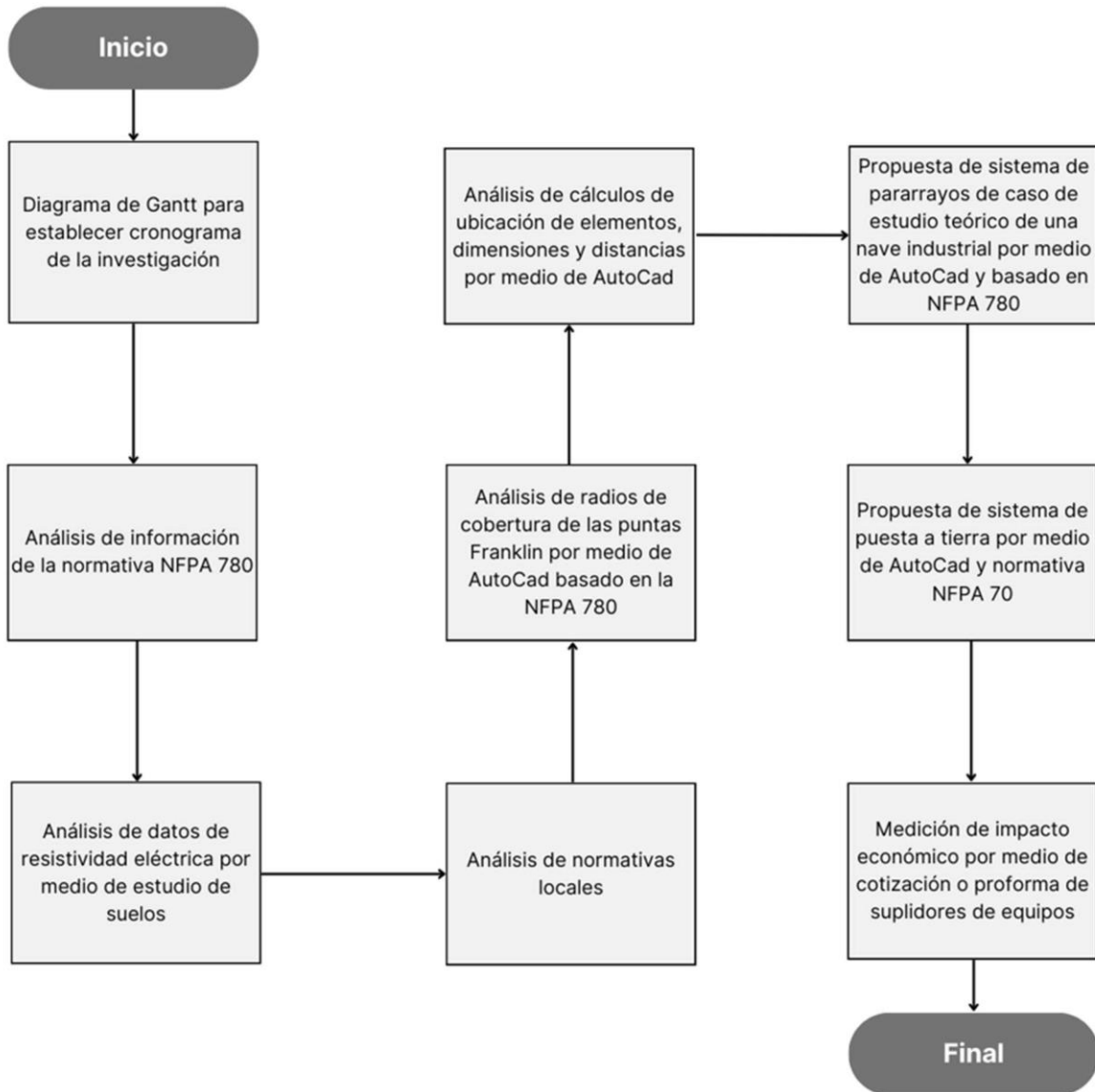
Tomado de DesignsCad, (2016).

### **3.6 PROCESO PARA LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS**

El proceso para la recolección y análisis de datos es una serie de pasos sistemáticos que se llevan a cabo para recopilar, organizar, interpretar y sacar conclusiones a partir de la información recabada. En la figura 3.6 se visualiza un diagrama de bloques donde se indica de manera breve y concisa la obtención de datos y cuál será su utilidad para los efectos de esta investigación.

Un diagrama de Gantt es una herramienta de gestión de proyectos que se utiliza para visualizar y planificar las tareas y actividades a lo largo del tiempo. En este caso, se empleará para tener una representación gráfica de las fechas de entregables de la investigación, así como de las reuniones con el tutor, las revisiones con el filólogo, las correcciones necesarias y la defensa final del trabajo como puede ser visualizado en la figura 3.7. Esto permitirá una mejor organización y seguimiento de los hitos clave del proyecto, asegurando que se cumplan los plazos establecidos y facilitando la coordinación de las diversas etapas.

**Figura 3.6 Diagrama de bloques para el proceso de recolección y análisis de datos**



Creación propia, (2024).

**Figura 3.7 Diagrama de Gantt para la organización y seguimiento de hitos.**

Gantt de Actividades - Seminario de Graduación									
Vacaciones Universitarias	Primer Cuatrimestre 2024				Segundo cuatrimestre 2024				
02/01/24 - 14/01/24	15/01/24 - 20/01/2024	20/01/24 - 10/02/24	11/03/24 - 16/03/24	17/03/24 - 11/05/24	12/05/24 - 29/06/24	30/06/24 - 06/07/24	07/07/24 - 20/07/24	21/07/24 - 10/08/24	11/08/24 - 24/08/24
Semana 0	Semana 1	Semana 1 a 4	Semana 9	Semana 10 a 17	Semana 1 a 7	Semana 8	Semana 9 a 10	Semana 11 a 13	Semana 14 a 15
Tema a Director	Matricula TII								
		Taller TII	Reunión inicial						
			Desarrollo del TFG con tutoría			CD Borrador			
							Lecturas		
							Correcciones + ensayo	Defensas	
								Correcciones + filólogo	CD Final

Creación propia, (2024).

## **CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

El propósito primordial de este proyecto es llevar a cabo un exhaustivo análisis sobre la correcta interpretación de la normativa vigente en Costa Rica en lo que respecta al diseño de sistemas contra descargas atmosféricas para estructuras industriales, particularmente en la región de Cartago.

Aunque el alcance de este estudio puede abarcar todo el país, este se enfocará específicamente en el área de La Lima de Cartago, dentro de la Zona Franca. Elegida por la notable concentración de naves industriales en este sector, las cuales son el objeto principal de análisis. Además, dado el potencial de crecimiento y construcción de más instalaciones industriales en esta zona, el estudio servirá como referencia fundamental para la interpretación adecuada de las regulaciones nacionales pertinentes.

El objetivo principal de esta investigación es mejorar significativamente los diseños de los sistemas contra descargas atmosféricas en el contexto costarricense, con el fin último de prevenir posibles tragedias causadas por eventos meteorológicos de esta índole.

Es importante destacar que este trabajo no está asociado con ninguna empresa en particular, aunque cuenta con el respaldo y colaboración del personal administrativo e ingenieril del parque industrial. Este apoyo es crucial para recopilar datos esenciales, como el número de edificaciones, la cantidad estimada de trabajadores en la zona, y los diferentes tipos de medidas de protección empleadas en las naves industriales para mitigar los efectos de las descargas atmosféricas.

## **4.1 ANALIZAR**

### **4.1.1 Análisis de la Normativa NFPA 780 2014**

Esta sección del estudio se centrará en el análisis del capítulo 4 de la normativa NFPA 780 en su edición 2014. Este apartado aborda los requisitos generales del sistema de protección contra descargas atmosféricas. Sin embargo, es importante señalar que este

análisis puede abarcar aspectos, referencias o conceptos de otros capítulos de la normativa, que se mencionarán según sea necesario. Además, se excluirá el método de pararrayos a través de mástiles, tal como se establece en el artículo 4.6.3 de dicha normativa.

Para comenzar el análisis de la normativa y su aplicación al elaborar de una guía de diseño para un sistema de pararrayos, es crucial iniciar con la definición de los pasos, los cuales se detallarán seguidamente.

#### 4.3.3.1 Paso 1: Definición de altura de la estructura y materiales

Según el artículo 4.1.1.1.1 de la NFPA 780, *los materiales a utilizar en el diseño de los sistemas de pararrayos estarán condicionados de acuerdo con la altura de las estructuras. Una estructura con una altura final menor a 23 metros debe emplear materiales Clase I*, los cuales están detallados en la tabla 4.1 "Definición de materiales Clase I, según la NFPA 780 versión 2014".

**Tabla 4.1 Definición de materiales Clase I.**

Tabla 4.1.1.1.1 Requisitos mínimos de los materiales de Clase I

Tipo de conductor	Parámetro	De cobre		De aluminio	
		En unidades del sistema estadounidense (U.S.)	En unidades del sistema internacional (SI)	En unidades del sistema estadounidense (U.S.)	En unidades del sistema internacional (SI)
Terminal aéreo, sólido	Diámetro	3/8 pulg.	9.5 mm	1/2 pulg.	12.7 mm
Terminal aéreo, tubular	Diámetro	3/8 pulg.	15.9 mm	3/8 pulg.	15.9 mm
Conductor principal, cable	Espesor	0.033 pulg.	0.8 mm	0.064 pulg.	1.63 mm
	Tamaño de cada filamento	17 AWG	1.04 mm <sup>2</sup>	14 AWG	2.08 mm <sup>2</sup>
Conductor de interconexión, cable (sólido o trenzado)	Peso por unidad de longitud	187 lb/1000 pies	278 g/m	95 lb/1000 pies	141 g/m
	Sección transversal	57,400 cir. mils	29 mm <sup>2</sup>	98,600 cir. mils	50 mm <sup>2</sup>
Conductor de interconexión, tipo cinta	Tamaño de cada alambre	17 AWG	1.04 mm <sup>2</sup>	14 AWG	2.08 mm <sup>2</sup>
	Sección transversal	26,240 cir. mils	13.3 mm <sup>2</sup>	41,100 cir. mils	20.8 mm <sup>2</sup>
Conductor principal, tira sólida	Espesor	0.051 pulg.	1.30 mm	0.064 pulg.	1.63 mm
	Ancho	1/2 pulg.	12.7 mm	1/2 pulg.	12.7 mm
Conductor principal, tira sólida	Espesor	0.051 pulg.	1.30 mm	0.064 pulg.	1.63 mm
	Sección transversal	57,400 cir. mils	29 mm <sup>2</sup>	98,600 cir. mils	50 mm <sup>2</sup>

Tomado de López, (2014).

Del mismo modo, conforme con el artículo 4.1.1.1.2 de la NFPA 780, *las estructuras que sobrepasen los 23 metros de altura deben estar protegidas con materiales Clase II*, los

cuales se encuentran especificados en la tabla 4.2 "Definición de materiales Clase II según la NFPA 780 versión 2014".

**Tabla 4.2 Definición de materiales Clase II de acuerdo a la NFPA 780 versión 2014**

Tabla 4.1.1.1.2 Requisitos mínimos de los materiales de Clase II

Tipo de conductor	Parámetro	De cobre		De aluminio	
		En unidades del sistema estadounidense (U.S.)	En unidades del sistema internacional (SI)	En unidades del sistema estadounidense (U.S.)	En unidades del sistema internacional (SI)
Terminal aéreo, sólido	Diámetro	½ pulg.	12.7 mm	¾ pulg.	15.9 mm
Conductor principal, cable	Tamaño de cada alambre	15 AWG	1.05 mm <sup>2</sup>	13 AWG	2.62 mm <sup>2</sup>
	Peso por longitud	375 lb/1000 pies	558 g/m	190 lb/1000 pies	283 g/m
	Sección transversal	115,000 cir. mils	58 mm <sup>2</sup>	192,000 cir. mils	97 mm <sup>2</sup>
Conductor de interconexión, cable (sólido o trenzado)	Tamaño de cada alambre	17 AWG	1.04 mm <sup>2</sup>	14 AWG	2.08 mm <sup>2</sup>
	Sección transversal	26,240 cir. mils	13.2 mm <sup>2</sup>	41,100 cir. mils	20.8 mm <sup>2</sup>
Conductor de interconexión, tira sólida	Espesor	0.051 pulg.	1.30 mm	0.064 pulg.	1.63 mm
Conductor principal, tira sólida	Ancho	½ pulg.	12.7 mm	½ pulg.	12.7 mm
	Espesor	0.064 pulg.	1.63 mm	0.1026 pulg.	2.61 mm
	Sección transversal	115,000 cir. mils	58 mm <sup>2</sup>	192,000 cir. mils	97 mm <sup>2</sup>

Tomado de López, (2014).

Es esencial considerar que, en el caso de que una sección de la estructura supere los 23 metros de altura mientras que otra no, los requisitos para el uso de materiales Clase II se aplicarán únicamente a la parte de la estructura que exceda los 23 metros de altura. No obstante, los materiales y elementos deben extenderse hasta el suelo y estar interconectados para garantizar la integridad del sistema.

#### 4.3.3.2 Paso 2: Definición de tipo de techo

Prosiguiendo y conforme con el artículo 4.7.1 de la NFPA 780 versión 2014, se identifican cinco tipos de techos que requieren análisis específicos para colocar las terminales y determinar la zona de protección. Estos son:

1. Techos inclinados
2. Techos planos o ligeramente inclinados
3. Techos con buhardillas
4. Techos abovedados

## 5. Techos con cumbreras, huecos, chimeneas o ventilaciones.

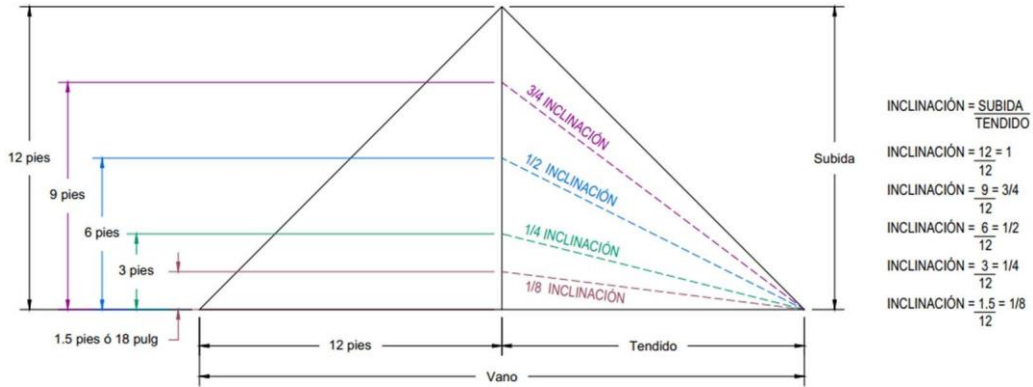
Dentro del contexto de este estudio, se excluyen los techos con buhardillas, techos abovedados, techos con niveles múltiples y techos con chimeneas, ya que el enfoque de la investigación se centra en un caso hipotético de una nave industrial, la cual no es común que cuente con estos elementos arquitectónicos y estructurales. De igual forma, se excluyen de este estudio los objetos móviles o giratorios situados sobre techos.

Con base en lo expuesto anteriormente, se establece la clasificación de techos inclinados de acuerdo a los siguientes puntos:

- Si el vano es menor a 12m y su pendiente es mayor a  $1/8$  el techo será definido como techo inclinado.
- Si el vano es menor a 12m y su pendiente es menor a  $1/8$  entonces el techo será definido como plano o ligeramente inclinado.
- Si el vano es mayor a 12m y su pendiente es mayor a  $1/4$  entonces el techo será definido como techo inclinado.
- Si el vano es mayor a 12m y su pendiente es menor a  $1/4$  entonces el techo será definido como techo plano o ligeramente inclinado.

Se puede utilizar de referencia la figura 4.1 para resumir lo indicado anteriormente, dicha imagen está basada en la normativa oficial NFPA 780 en su versión 2014.

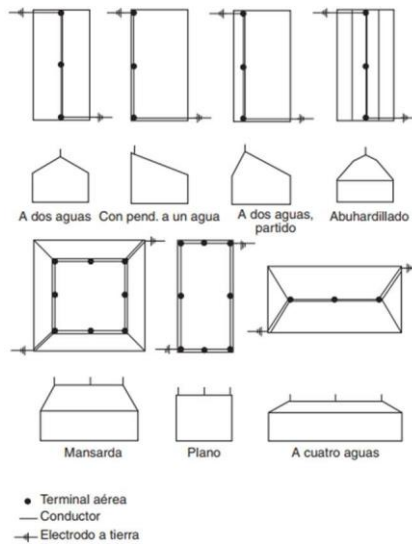
**Figura 4.1** Inclinación o pendiente de un techo de acuerdo con la altura, el vano o el tendido.



Adaptado de López, (2014).

Los techos pueden variar en distintas formas, por lo cual la normativa NFPA 780 indica claramente en el artículo 4.7.1.4 cómo deber ser la colocación de las terminales de acuerdo a la forma del techo. Ver figura 4.2.

**Figura 4.2** Medidas de protección para diversos tipos de techos.



Tomado de López, (2014).

### 4.3.3.3 Paso 3: Métodos de protección

Se permitirá proteger la estructura mediante uno o más de los siguientes métodos y dicha zona de protección estará definida por la geometría del edificio:

- Se permite la colocación de terminales aéreos por el “Método de mallas” de acuerdo y como se explica en la sección 4.3.3.4.
- Se permite el uso del método del ángulo.
- Se puede utilizar el método de la esfera rodante.

Es de suma importancia destacar que, en todos los métodos autorizados, los conductores principales deben conectar de manera integral todos los terminales de protección. Estos conductores deben establecer al menos dos trayectorias independientes desde cada terminal hacia abajo, ya sea de forma horizontal o ascendente, con una inclinación que no exceda 1/4 de la distancia vertical total hasta llegar al punto de conexión con los electrodos de puesta a tierra. Este enfoque asegura una adecuada dispersión de la corriente y una protección efectiva contra descargas atmosféricas.

Adicionalmente, los conductores principales deben instalarse a todo lo largo de las cumbreras de techos de dos aguas, abuhardillados (los cuales se excluyen de este estudio) y a cuatro aguas, se deben instalar alrededor del perímetro de techos planos y a través de las áreas de techos planos o ligeramente inclinados de acuerdo con lo indicado en las secciones 4.3.3.3 y 4.3.3.4.

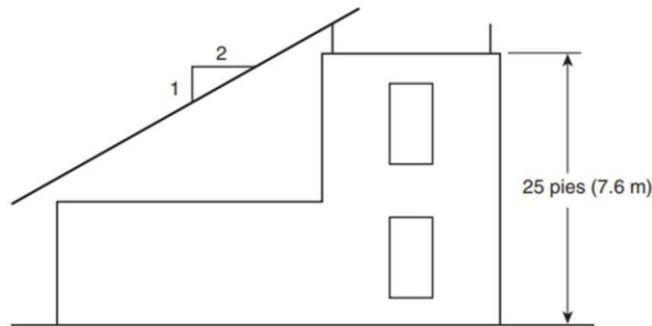
- **Método del ángulo**

Conforme a las regulaciones de la normativa, se permite la aplicación del método del ángulo para delinear la zona de protección de la estructura. Esta delimitación se configura en forma de cono, con su vértice situado en el punto más alto de la terminal. Se establece un ángulo de 45 y 63 grados respecto a la vertical para definir esta zona de protección.

Aunque los techos de niveles múltiples en naves industriales no son comunes, en este estudio se aborda la protección contra descargas atmosféricas utilizando el método del ángulo para tales estructuras. En estos casos, se deben considerar las siguientes pautas:

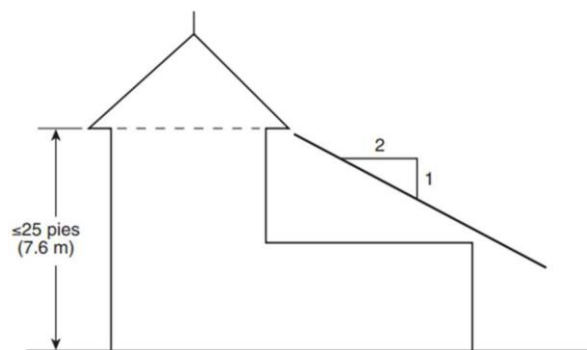
Se permite proteger los sectores más bajos de edificaciones con techos de niveles múltiples, con una altura no superior a 7.6 metros sobre el terreno, utilizando un ángulo de 63 grados respecto a la vertical. Esto se traduce en una relación de uno a dos, según se ilustra en la figura 4.3 para estructuras con techos planos y en la figura 4.4 para estructuras con techos inclinados.

**Figura 4.3 Protección de techos con niveles múltiples menores a 7.6m, relación uno a dos para techos planos.**



Tomado de López, (2014).

**Figura 4.4 Protección de techos con niveles múltiples menores a 7.6m, relación uno a dos para techos inclinados.**

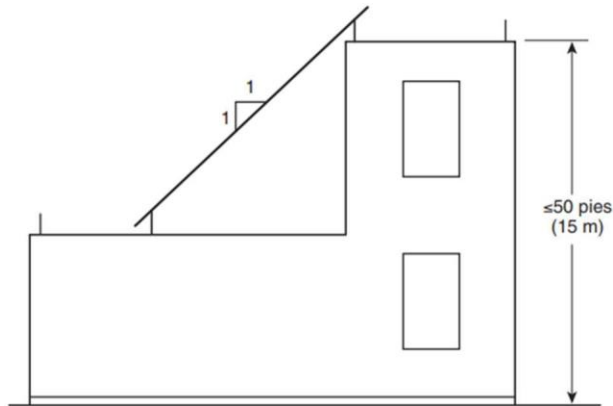


Tomado de López, (2014).

En el caso de estructuras con techos de múltiples niveles y una altura máxima de 15 metros sobre el nivel del terreno, se autoriza el empleo de la relación de uno a uno o un ángulo de 45 grados respecto a la vertical. Esto permite proteger de manera efectiva tanto la estructura principal como los techos de menor altura. Esto se puede visualizar en la

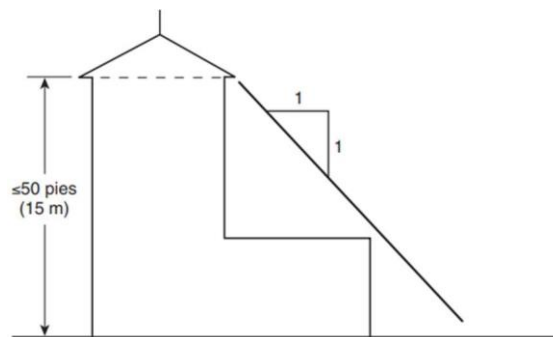
figura 4.5 para estructuras con techos planos y en la figura 4.6 para estructuras con techos inclinados.

**Figura 4.5 Protección de techos con niveles múltiples menores a 15m, relación uno a uno para techos planos.**



Tomado de López, (2014).

**Figura 4.6 Protección de techos con niveles múltiples menores a 15m, relación uno a uno para techos inclinados.**



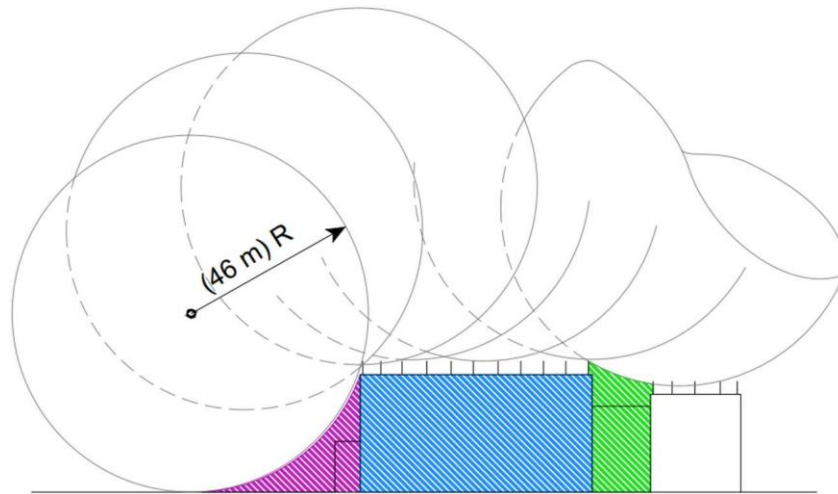
Tomado de López, (2014).

- **Método de la esfera rodante**

El procedimiento de la "esfera rodante" implica el uso de una esfera de tamaño específico, con un radio que no excede los 46 metros. Esta esfera se desplaza sobre el techo de la

estructura con el propósito de identificar las áreas donde un rayo podría impactar. Aquellas zonas que la esfera pueda tocar se consideran vulnerables a ser alcanzadas por descargas atmosféricas.

**Figura 4.7 Método de la esfera rodante, zonas de protección.**



Adaptado de López, (2014).

Como se muestra en la figura 4.7, se hace rodar la esfera de radio de 46m de manera tal, que la estructura quede protegida en todos sus segmentos.

Cuando la esfera toque el suelo y esté en contacto con un terminal de interceptación de descargas, se debe tener en cuenta que todo el espacio vertical entre los dos puntos de contacto y debajo de la esfera, forma parte de la zona de protección; esto se puede visualizar en la figura 4.7, en el sector resaltado con color magenta.

Además, si la esfera está apoyada en dos o más terminales de interceptación de descargas, se establece una zona de protección que incluye el espacio vertical entre los dispositivos, como se ilustra en la figura 4.7 en el sector resaltado con color verde.

De acuerdo a la figura 4.7, se resalta en color celeste el área protegida por las terminales ubicadas en el techo de la estructura, todos los elementos bajo estos terminales se consideran protegidos.

Cabe resaltar que, al aplicar este método, se deben considerar todas las posibles posiciones de la esfera para determinar la zona de protección de manera integral. Por lo cual se debe realizar un análisis en todas las direcciones o en efecto un modelado en tres dimensiones.

El análisis por el método de la esfera rodante también permite el cálculo de la distancia horizontal protegida por medio de la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{h_1(2R - h_1)} - \sqrt{h_2(2R - h_2)}$$

En donde:

$d$  = Hace referencia a la distancia horizontal protegida (metros o pies).

$h_1$  = Está determinado por la altura del techo más alto (metros o pies).

$R$  = Será el radio de la distancia de impacto de la esfera rodante (metros o pies).

$h_2$  = Está determinado por la altura del techo más bajo (la parte superior del objeto) (metros o pies).

Es crucial tener en cuenta que la ecuación será efectiva solo si las unidades son coherentes entre sí. La esfera debe tocar ya sea el techo más bajo o estar en contacto con el suelo, y al mismo tiempo, con el lado vertical de la parte más alta de la estructura. Además, es necesario que la diferencia de altura entre el techo más alto y el más bajo, o el suelo, no exceda la distancia de impacto establecida, que es de 46 metros.

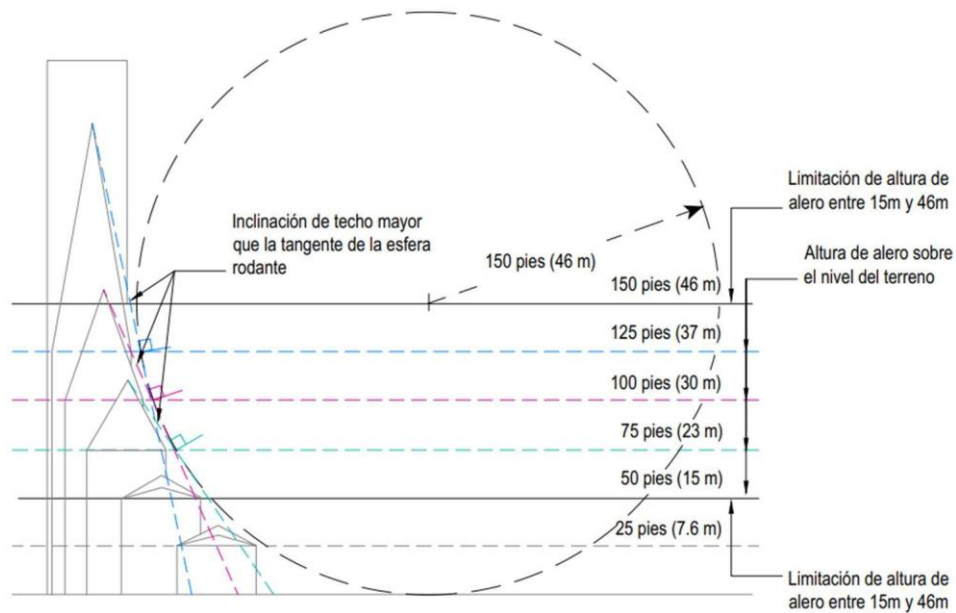
#### **4.3.3.4 Paso 4: Ubicación de terminales y método de mallas**

La disposición de las terminales, también conocida como Puntas Franklin, se realiza de manera similar para ambos tipos de techos, pero es necesario distinguir las siguientes especificidades:

- **Techos inclinados:**

- Es esencial diseñar la ubicación de las terminales de manera que la distancia entre las puntas y los extremos de las cumbreras no sobrepase los 60 cm.
- Las terminales deben colocarse en las cumbreras sin exceder una distancia entre cada una de 6 m.
- Se permite una excepción en la distancia entre terminales, permitiendo hasta 7.6 m si están posicionadas 60 cm por encima del área u objeto que protegen.
- Techos con aleros de una altura igual o inferior a 15 m sobre el terreno no requieren terminales alrededor de su perímetro.
- La omisión de terminales en los aleros está permitida para techos con un vano de 30 m o menor y alturas de aleros entre 15 m y 46 m, siempre que la pendiente del techo sea igual o más pronunciada que la tangente del arco formado por la elevación del alero de una esfera rodante con un radio de 46 m. Ver figura 4.8. Se hace una excepción para la canaleta; sin embargo, cualquier otra parte de la estructura que se extienda más allá de la tangente, debe estar protegida.
- Las terminales de conexión en los techos deben tener al menos dos conductores principales para conectar las unidades del techo al sistema de protección contra rayos. Sin embargo, se permite el uso de un solo conductor para las terminales instaladas en partes verticales de la estructura del techo. Este conductor adicional que conecta con el conductor principal no debe exceder los 4.9 metros de longitud. La unión entre este cable único y el conductor principal debe realizarse mediante un empalme en forma de T u otro dispositivo aprobado para este propósito. Ver figura 4.13
- Si los techos inclinados no cumplen con los puntos anteriores, deben ser diseñados con las disposiciones estipuladas para techos planos o ligeramente inclinados.

**Figura 4.8 Ilustración de la tangente en techos inclinados con alturas entre 15m y 46m.**



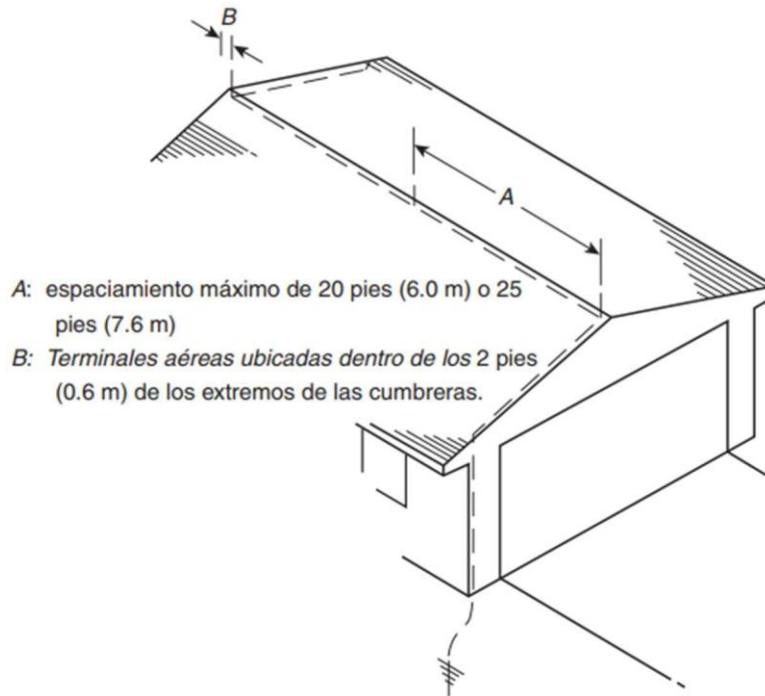
Adaptado de López, (2014).

- **Techos ligeramente inclinados o planos:**

- Deben considerar una separación máxima de 60 cm entre los bordes y esquinas exteriores del techo y las terminales. Ver figura 4.9.
- Las terminales deben ser colocadas adicionalmente alrededor del perímetro del techo sin exceder una distancia entre cada terminal de 6 m.
- Se permite una excepción, permitiendo una distancia entre terminales de 7.6m si están posicionadas 60 cm por encima del área u objeto que protegen.
- Techos con longitudes mayores a 15m deben contar con terminales en intervalos que no sobrepasen los 15m. Ver figura 4.10 y figura 4.11.
- Se permite la utilización del método de la esfera rodante para proteger el área mencionada en el punto anterior. La esfera no podrá entrar en contacto con el área del techo plano o ligeramente inclinado. Este método se explicó en la sección 4.3.3.3.

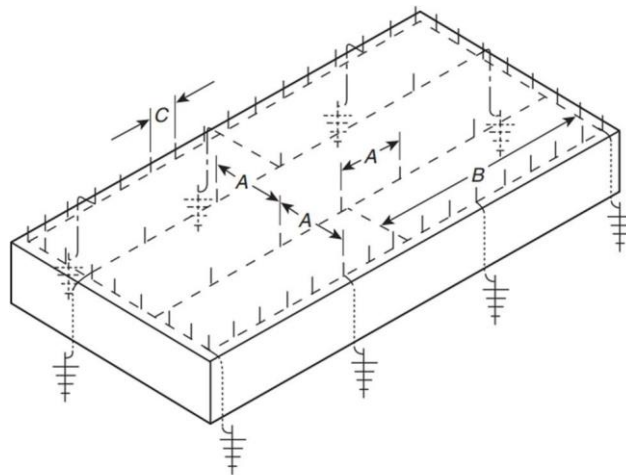
- Si se cuenta con un techo que posee un perímetro irregular, se deben utilizar los elementos más distantes para colocar las terminales de acuerdo a los puntos anteriormente mencionados. Ver figura 4.12.
- Las terminales de conexión en los techos deben tener al menos dos conductores principales para conectar las unidades del techo al sistema de protección contra rayos. Sin embargo, se permite el uso de un solo conductor para las terminales instaladas en partes verticales de la estructura del techo. Este conductor adicional que conecta con el conductor principal no debe exceder los 4.9 metros de longitud. La unión entre este cable único y el conductor principal debe realizarse mediante un empalme en forma de T u otro dispositivo aprobado para este propósito. Ver figura 4.13.
- Si el techo plano cuenta con secciones abiertas para huecos de iluminación comúnmente conocidos como “traga luz” o para equipos mecánicos, el perímetro de estos huecos debe contar con protección cuando el perímetro del área abierta supere los 92m y si ambas dimensiones rectangulares son mayores a 15m.
- Se emplearán conductores principales de tramo transversal para conectar las terminales en techos con una anchura superior a los 15 metros, como se ilustra en la figura 4.5, identificada con la letra "B". La instalación de estos conductores transversales seguirá el siguiente criterio: si el ancho del techo es de 15 metros a 30 metros, se requerirá un conductor transversal; si el ancho del techo es de 30 metros a 46 metros, se necesitarán dos conductores de tramo transversal, de 46 metros a 60 metros se necesitarán tres conductores de tramo transversal y así sucesivamente, cada 15 metros adicionales se requerirá un conductor transversal adicional. Estos conductores de tramo transversal deben conectar con el perímetro principal en intervalos que no excedan los 46m como se muestra en la figura 4.10.

**Figura 4.9 Terminales sobre un techo inclinado.**



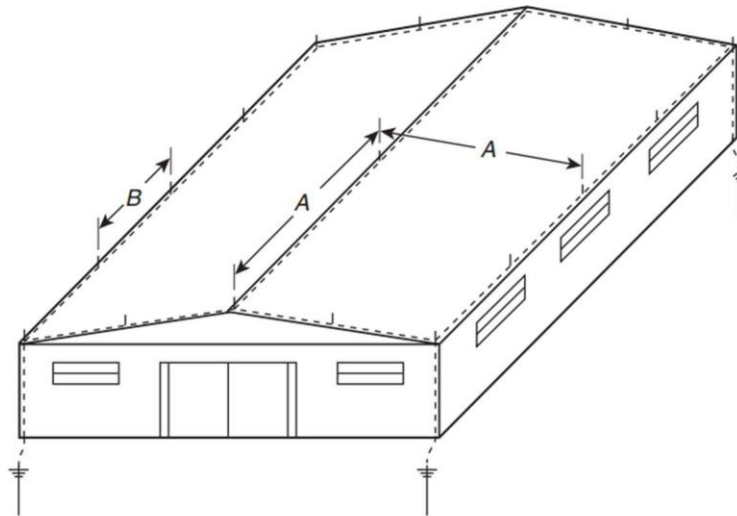
Tomado de López, (2014).

**Figura 4.10 Terminales ubicadas sobre techos planos.**



Tomado de López, (2014).

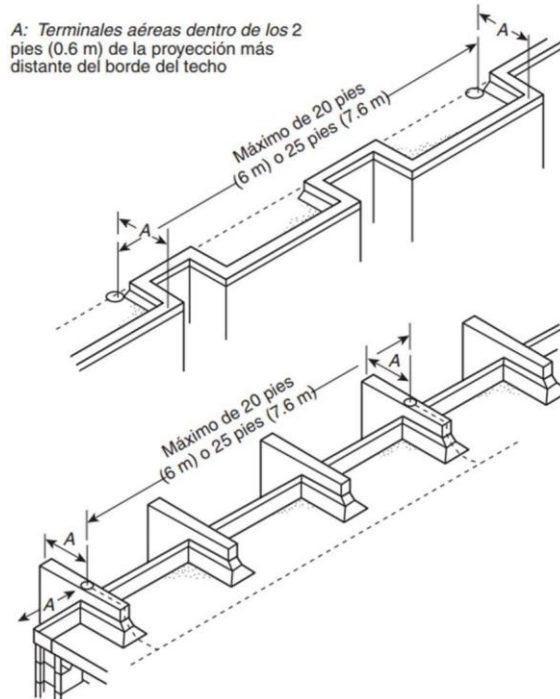
**Figura 4.11 Terminales sobre un techo ligeramente inclinado.**



A: espaciamiento máximo de 50 pies (15 m)  
B: espaciamiento máximo de 20 pies (6 m) o de 25 pies (7.6 m)

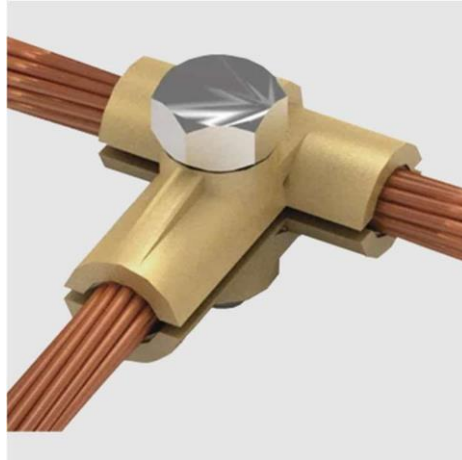
Tomado de López, (2014).

**Figura 4.12 Terminales sobre un techo plano o ligeramente inclinado con perímetro irregular.**



Tomado de López, (2014).

**Figura 4.13 Conector tipo T para conexiones de un único conductor de elementos verticales.**



Tomado de Teser, (s.f.)

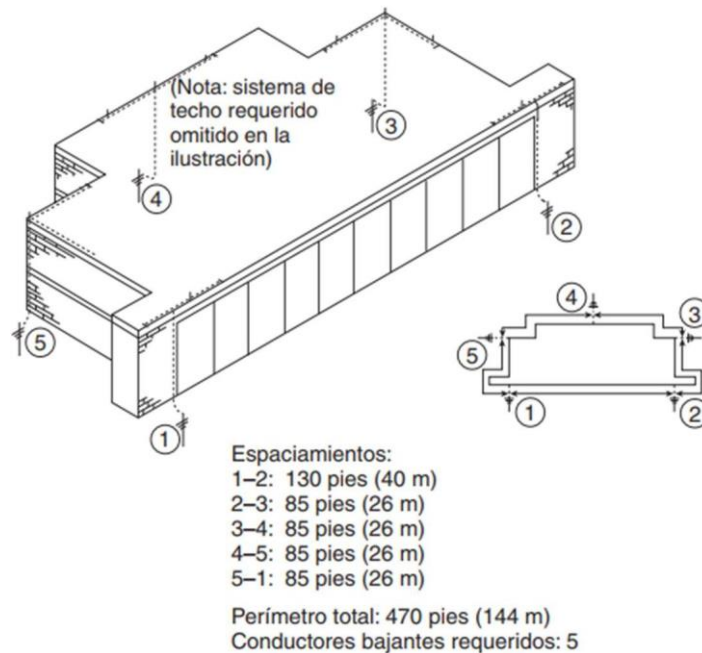
#### **4.3.3.5 Paso 5: Cálculo de cantidad de conductores bajantes**

Los conductores bajantes, también conocidos solamente como bajantes, son aquellos que conectan los conductores de los techos con las terminales aéreas y los electrodos de puesta a tierra. Su disposición es importante y se deben considerar varios aspectos:

1. Ubicación de terminales: Deben estar estratégicamente ubicados para garantizar una conexión eficiente.
2. Ruta más directa de los conductores: Se debe priorizar la ruta más corta y directa posible para minimizar la resistencia y mejorar la conductividad.
3. Condiciones del terreno: La topografía y otras características del terreno deben tenerse en cuenta para evitar interferencias o problemas de seguridad.
4. Seguridad contra desplazamientos: Los conductores deben estar protegidos contra movimientos o desplazamientos que puedan comprometer su función.
5. Ubicación de objetos metálicos de gran tamaño: Se deben evitar interferencias con objetos metálicos grandes que puedan afectar la eficacia de los conductores.
6. Ubicación de sistemas de tuberías metálicas subterráneas: Es importante considerar la presencia de tuberías subterráneas metálicas para evitar daños o interferencias.

Según la normativa NFPA 780 versión 2014, se requiere al menos la instalación de dos conductores bajantes en cualquier estructura. Sin embargo, para estructuras con un perímetro superior a 76 metros, se debe agregar un conductor adicional por cada 30 metros de perímetro o fracción de este. Esta disposición se puede visualizar de manera gráfica en la figura 4.14.

**Figura 4.14** Cálculo de cantidad de bajantes en estructuras con perímetros mayores a 76m.



Tomado de López, (2014).

En resumen, en estructuras con un perímetro superior a 76 metros, se debe asegurar que la cantidad de conductores bajantes sea tal, que la distancia promedio entre ellos no exceda los 30 metros. Para ilustrarlo, la figura 4.14 muestra separaciones entre conductores bajantes de 40 metros y 26 metros. Sin embargo, al calcular el promedio de estas separaciones, se obtienen 28.8 metros, lo cual cumple con el requisito de la normativa de no superar los 30 metros promedio.

En el caso de estructuras con formas irregulares, como se presenta en la figura 4.7, se deben agregar conductores bajantes adicionales según sea necesario para garantizar una trayectoria bidireccional desde cada terminal.

El cálculo del perímetro de la estructura se realiza de la siguiente forma:

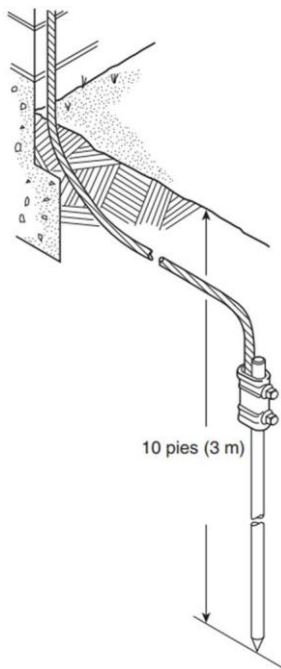
- Estructuras planas o ligeramente inclinadas: Se mide únicamente el perímetro de las áreas de techos que requieren protección.
- Estructuras de techo inclinado: Se debe realizar la proyección horizontal o superficie proyectada del techo protegido tal como se muestra en la figura 4.14.
- No es necesario incluir en la medición del perímetro, los techos o proyecciones más bajos que estén dentro de la zona de protección.

#### **4.3.3.6 Paso 6: Colocación de electrodos de puesta a tierra**

El electrodo de puesta a tierra es un elemento que forma parte del sistema de puesta a tierra, el cual tiene como función disipar la corriente eléctrica de forma segura y eficaz hacia la tierra. A nivel de normativa, se determina que cada bajante del sistema contra descargas debe contar con un electrodo de puesta a tierra exclusivo para el sistema, lo cual se traduce en que cada bajante debe tener un electrodo de puesta a tierra o también conocido como varilla.

Estos electrodos no deben tener una profundidad de enterramiento menor a 3m y deben ser colocados de manera vertical donde su longitud completa esté enterrada, esto se ilustra de mejor manera en la figura 4.15.

**Figura 4.15** Instalación de un electrodo de puesta a tierra.

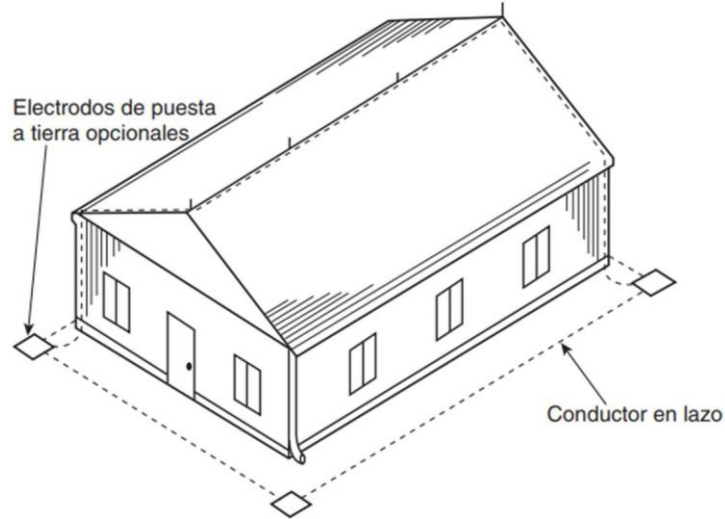


Tomado de López, (2014).

Para las consideraciones de este trabajo, se valorará la implementación de un anillo perimetral de puesta a tierra. Este anillo se define como la interconexión de todos los electrodos de puesta a tierra mediante un conductor, el cual rodea el contorno de la estructura. Es importante destacar que este conductor une todos los electrodos de puesta a tierra y se asegura de que estén en contacto directo con el suelo a una profundidad mínima de 46 cm.

Es fundamental que el conductor del anillo perimetral tenga dimensiones iguales o superiores al conductor principal del sistema de pararrayos, tal como se detalla en el paso número 1. La instalación de este anillo se ilustra en la figura 4.16.

**Figura 4.16** Instalación de anillo perimetral de puesta a tierra.



Tomado de López, (2014).

Se debe tomar en cuenta que la distancia mínima entre los cimientos de la estructura y los electrodos de puesta a tierra debe ser de 60cm.

Cabe destacar que, en el caso de edificios con una altura superior a 18 metros, como suele ser el caso en estructuras industriales según lo revelado en este estudio, se requiere interconectar los electrodos de puesta a tierra de todos los sistemas. Esto incluye tanto el sistema de protección contra descargas como sistemas eléctricos, de telecomunicaciones y de antenas, con el fin de crear un lazo común que garantice una diferencia de potencial nula. Estructuras menores a 18m no están definidas en este estudio.

#### **4.3.3.7 Paso 7: Verificar interconexión con objetos metálicos**

Esta sección del estudio aborda las consideraciones relacionadas con los elementos metálicos presentes en la estructura, los cuales, debido a su naturaleza conductora, requieren estar interconectados al sistema de puesta a tierra. En este sentido, se ofrece un breve resumen de los diferentes elementos por tener en cuenta durante el proceso de diseño:

- Los elementos metálicos de las estructuras con armazón de acero y de concreto armado, que superen los 18 metros de altura, independientemente de si tienen conexión a tierra o no, deben estar interconectados con las partes de acero estructural, a menos que dicha interconexión se haya realizado durante la fase de construcción.
- Para estructuras que superen los 12 metros de altura, se debe considerar la interconexión de los elementos metálicos con el sistema de protección contra rayos, siguiendo la siguiente ecuación:

$$D = \frac{h}{6n} * K_m$$

Donde:

D representa la distancia de interconexión.

h indica la distancia vertical entre la interconexión considerada y la interconexión más cercana al sistema de pararrayos.

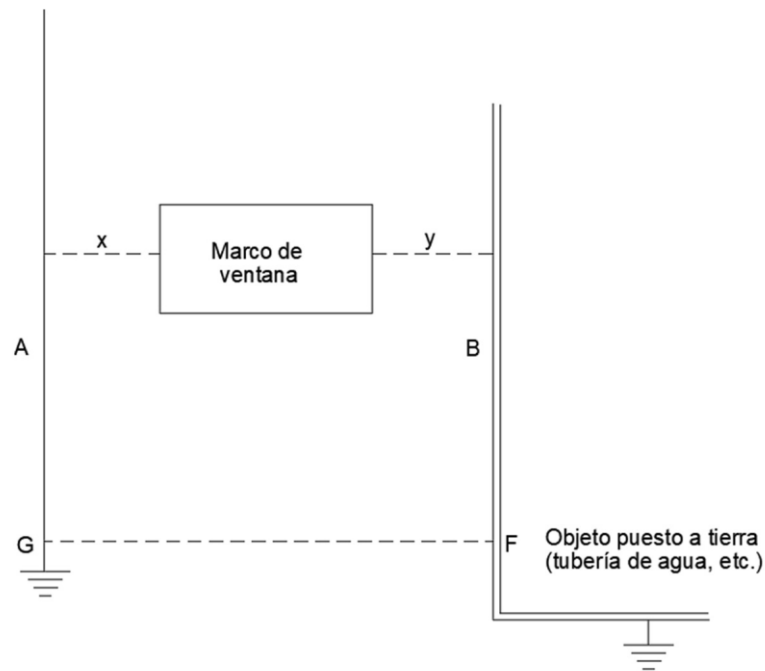
n es el valor relacionado con la cantidad de conductores bajantes. Se asigna 1 si hay un único conductor bajante en esa zona, 1.5 si hay dos conductores bajantes, y 2.25 cuando hay tres o más conductores bajantes en dicha zona.

$K_m$  es un factor con valor de 1 si la descarga se transmite vía aérea, o de 0.50 si se transmite a través de un material denso como concreto, ladrillo, madera, etc.

Los elementos metálicos aislados, que se refieren a aquellos elementos que no están conectados a tierra, como lo son marcos de ventanas, deben considerar lo que se muestra en la figura 4.17.

En la siguiente figura se ilustra la distancia mínima que debe existir entre los elementos conectados a tierra. En caso de que esta distancia no se respete, se deberá establecer una interconexión entre los elementos.

**Figura 4.17** Objetos metálicos aislados en medios no conductores.



Tomado de López, (2014).

En esta figura se muestra que si la suma de las distancias indicadas con las letras "x" y "y" es menor que la distancia de interconexión (puntos F y G), deberá existir una interconexión entre los elementos A y B. Por otro lado, si la suma de las distancias indicadas con las letras "x" y "y" es mayor que la distancia de interconexión (puntos F y G), no se requerirá de una interconexión entre los elementos A y B.

Los materiales requeridos para las interconexiones de elementos deben cumplir con lo establecido en el paso 1.

#### **4.3.3.7 Paso 8: Consideraciones adicionales**

**Materiales:** Al emplear aluminio como material, es fundamental considerar que no debe estar en contacto directo con el suelo. Se requiere que la distancia entre el suelo y cualquier elemento de aluminio sea superior a 46 centímetros. Por lo tanto, al utilizar

aluminio en bajantes de pararrayos, conductores o dispositivos de conexión, es imperativo que se cumpla con esta distancia. Antes de que esta distancia se supere, se debe realizar la transición a cobre mediante conectores o accesorios bimetálicos apropiados, los cuales también deben estar instalados a una altura superior a los 46 centímetros sobre el suelo.

El diseño de sistemas que emplean aluminio como conductor debe evitar la exposición a pinturas alcalinas, así como su colocación en concreto o mampostería, o en áreas susceptibles a una alta humedad que pueda acelerar la corrosión (NFPA 780, 2014).

El uso de estos materiales está restringido a su combinación, evitando el uso de materiales que, al combinarse, formen pares galvánicos que puedan acelerar la corrosión. Por ello, se recomienda el empleo de materiales como cobre, aleaciones de cobre resistentes a ella, y aluminio de grado eléctrico.

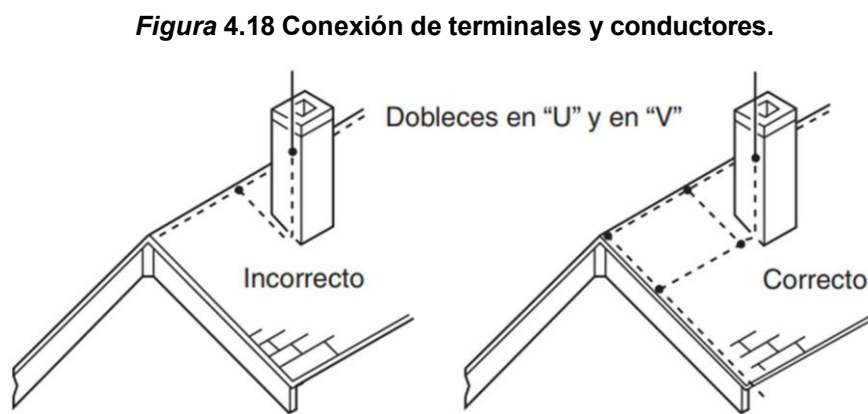
Al diseñar, es crucial tener en cuenta los materiales que componen los techos, ya que los elementos de cobre no deben entrar en contacto con los de aluminio, y viceversa. Esto cobra relevancia al seleccionar los materiales para el sistema de pararrayos, acoples, conectores y elementos similares.

**Protección:** Según lo estipulado por la normativa NFPA 780, en situaciones donde haya riesgo de daño mecánico o desplazamiento del sistema de protección contra rayos, se hace necesario proteger dicho tramo mediante una moldura o cubierta apropiada (NFPA 780, 2014).

**Estructuras con partes metálicas expuestas:** Es relevante tener presente que, en las estructuras con partes metálicas expuestas, cuyo grosor sea igual o superior a 4.8 mm, únicamente requerirán ser conectadas al sistema de protección contra descargas atmosféricas. En consecuencia, no se necesitarán terminales de interceptación.

**Instalación de terminales:** En el diseño, es esencial considerar que las terminales, comúnmente conocidas como puntas, deben colocarse de manera que su altura exceda los 25.4 cm sobre el área u objeto que protegen. Estas puntas deben estar aseguradas adecuadamente para prevenir cualquier desplazamiento. Lo anterior debe ser considerado en la fase de diseño para evitar la carencia de dispositivos para interceptar posteriormente en la instalación del sistema.

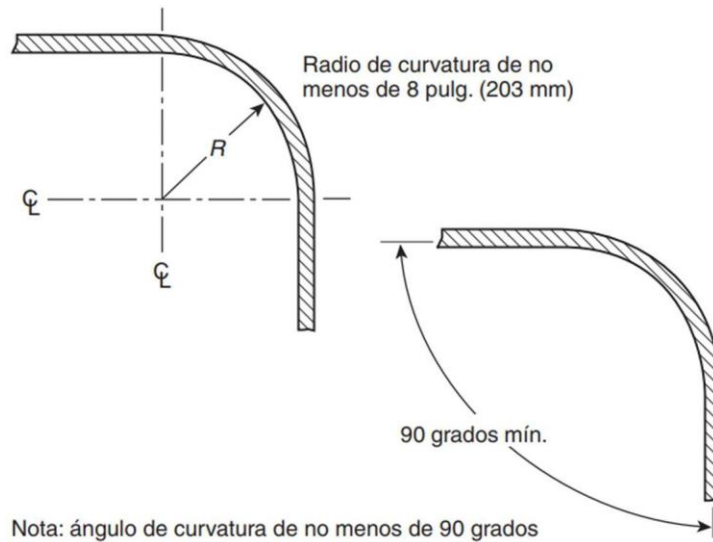
**Conductores:** La conexión de los conductores debe realizarse con las terminales de manera que los tramos se mantengan en una disposición horizontal o descendente. Se prohíbe cualquier tipo de doblez en forma de "U" o "V" en los conductores. Para una referencia visual, se puede consultar la figura 4.18.



Tomado de López, (2014).

La curvatura de los conductores debe mantenerse con un ángulo mayor a 90 grados, y deben contar con un radio de curvatura menor de 20.3 cm. Ver figura 4.19.

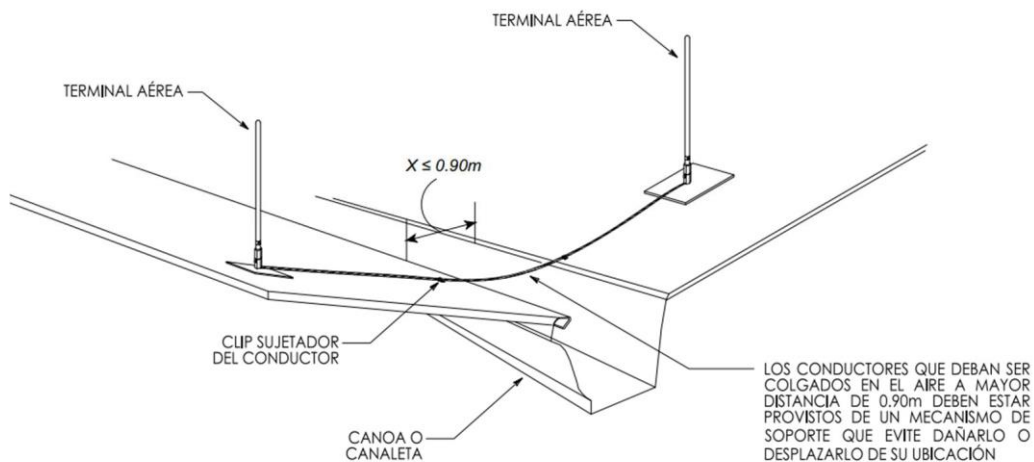
**Figura 4.19** Radios de curvatura de conductores.



Tomado de López, (2014).

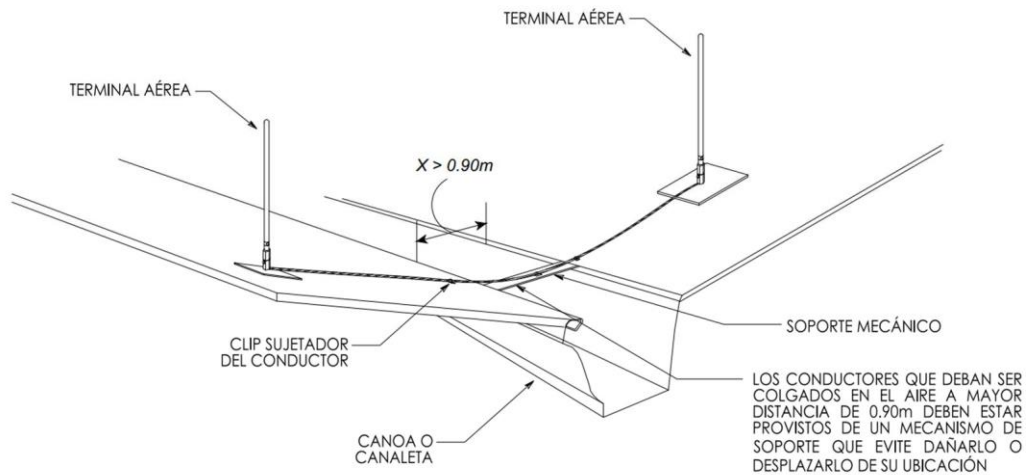
**Soportes de conductores:** Según se indica en la normativa, se permite que los conductores estén colgados en el aire sin que exista un soporte, siempre y cuando la distancia del conductor de manera colgada no sea mayor de 90 cm. Si se requiere que el conductor esté colgado en el aire una distancia mayor de 90 cm será necesario un soporte mecánico que evite el daño o el desplazamiento del conductor. Estos conceptos se ejemplifican en las figuras 4.20 y 4.21 respectivamente.

**Figura 4.20** Conductor colgado una distancia igual o menor a 90 cm.



Creación propia, (2024).

**Figura 4.21 Conductor colgado una distancia mayor a 90 cm.**



Creación propia, (2024).

**Bajantes:** Es imperativo tener en cuenta que los bajantes, susceptibles a daños físicos o desplazamientos, necesitan estar adecuadamente protegidos. Es necesario que el conductor esté protegido a una altura mínima de 1.8 metros sobre el terreno para garantizar su integridad. Además, es esencial considerar el tipo de suelo, ya que aquellos con propiedades corrosivas demandan una protección adicional mediante una cubierta protectora.

Es importante destacar que los bajantes cercanos a columnas de concreto armado o sobre columnas de acero estructural deben estar conectados al acero de refuerzo o al miembro estructural de acero tanto en su parte superior como en su parte inferior, y dichas conexiones deben hacerse mediante grapas, placas listadas o soldadura. Los sujetadores deben ser dispuestos a intervalos no superiores a 0.9 metros y deben estar fabricados con el mismo material que el conductor, o bien, con un material igualmente resistente a la corrosión que afecta al conductor

**Electrodos de puesta a tierra:** Los electrodos utilizados para la puesta a tierra deben estar fabricados con acero recubierto de cobre, cobre macizo o acero inoxidable. En caso de que estos componentes sean instalados en hormigón, “es necesario tener en cuenta

pautas adicionales que pueden encontrarse en la normativa NFPA 780, edición de 2014, específicamente en los artículos 4.13.3 y siguientes”. *Para esta investigación*, no se abarcan los procesos de instalación de estos elementos en concreto, dado que se asume que la nave industrial cuenta con áreas verdes alrededor de su perímetro para la colocación de dichos electrodos.

Se establece que las varillas de puesta a tierra no deben tener un diámetro inferior a 12.7 mm y deben contar con una longitud mínima de 2.4 metros. Es importante destacar que estas varillas no pueden estar recubiertas con pintura u otros materiales, lo que garantiza un contacto directo y eficiente con el suelo. Estas medidas son fundamentales para asegurar la integridad del sistema de puesta a tierra y proteger tanto los equipos eléctricos como las personas que interactúan con ellos.

En el alcance de este estudio, no se incluyen las tuberías metálicas, ya sean eléctricas o mecánicas, utilizadas para acometidas o para el suministro de agua potable, aguas negras, pluviales u otros servicios similares, dado que es común el uso de PVC en estos sistemas. No obstante, al diseñar un sistema de protección contra descargas atmosféricas conforme a las normativas mencionadas en este estudio, “es necesario considerar la interconexión de estas tuberías metálicas con el sistema de puesta a tierra, si es que las hubiera y debe cumplir con los artículos 4.14.4 y 4.14.6 de la normativa NFPA 780 versión 2014”.

**Interconexión de objetos metálicos:** En adición a las recomendaciones señaladas en el paso 7, es esencial tener en cuenta la integración con los elementos de soporte metálicos, tales como los mástiles de antenas que se sitúan sobre la estructura.

Es importante considerar que, al instalar un conductor en un conducto metálico, este debe estar conectado al ducto tanto en su entrada como en su salida, así como en cualquier punto donde no se garantice la continuidad eléctrica. Esta medida no solo asegura la eficacia del sistema, sino que también previene posibles interferencias y problemas de seguridad.

**Sistemas ocultos:** Los sistemas ocultos de los cuales se habla en la normativa haciendo referencia a elementos que no se encuentran visibles ya sea porque son elementos que se instalan dentro de la estructura, losa, o similar; “deberán cumplir con las disposiciones del artículo 4.18 de la normativa NFP780 versión 2014”. Este apartado no fue discutido en esta investigación.

**Sistemas estructurales metálicos:** De acuerdo con las regulaciones establecidas, se permite el uso del armazón metálico de la estructura como el conductor principal del sistema de protección, siempre y cuando su grosor sea igual o superior a 4.8 mm y mantenga una continuidad eléctrica. En tal caso, es esencial que las terminales se conecten directamente al armazón de la estructura mediante conductores individuales.

Cuando se proceda a realizar conexiones con el armazón estructural, es necesario que los conductores se unan a una superficie previamente limpiada hasta alcanzar su metal base, utilizando placas de interconexión con un área de contacto no mayor a 8 pulgadas cuadradas, las cuales pueden ser unidas mediante soldadura u otros métodos. Además, se contempla la opción de realizar perforaciones roscadas en la columna metálica para la inserción de un conector roscado, con la condición de que cuente con al menos 5 vueltas completas y esté asegurado con una contratuerca o mecanismo equivalente, y que la rosca no tenga un diámetro menor a 12.7 mm

Por otra parte, las placas de conexión deben estar equipadas con conectores de cables que posean pernos de presión, y deben ser fijadas al armazón estructural mediante pernos o soldaduras, con el fin de garantizar la continuidad eléctrica. Asimismo, una vez retirados los recubrimientos para efectuar la conexión eléctrica, es necesario restaurar esa protección contra la corrosión a su estado original.

En relación con los electrodos de puesta a tierra, se requiere que estén conectados a las columnas de acero ubicadas alrededor del perímetro de la estructura, manteniendo un intervalo promedio no superior a 18 metros entre ellos.

**Protección contra sobretensiones:** Es esencial la instalación de sistemas de Protección contra Sobretensiones Transitorias (SPD, por sus siglas en inglés) en las estructuras mencionadas en este análisis, tanto para los servicios de suministro eléctrico como para los servicios de comunicación y antenas. Estas pautas están respaldadas por el artículo 4.20 de la normativa NFPA 780 versión 2014. Sin embargo, estas consideraciones están más allá del ámbito de esta investigación, ya que involucran datos e información relacionados con las conexiones eléctricas internas, sistemas de telecomunicaciones, sistemas de seguridad.

Es importante destacar que el sistema de SPD no debe conectarse a los conductores bajantes de los pararrayos. Además, no se requerirá la instalación de un SPD si el proveedor de servicios ha implementado medidas adicionales para hacer frente a las amenazas de sobretensiones causadas por rayos.

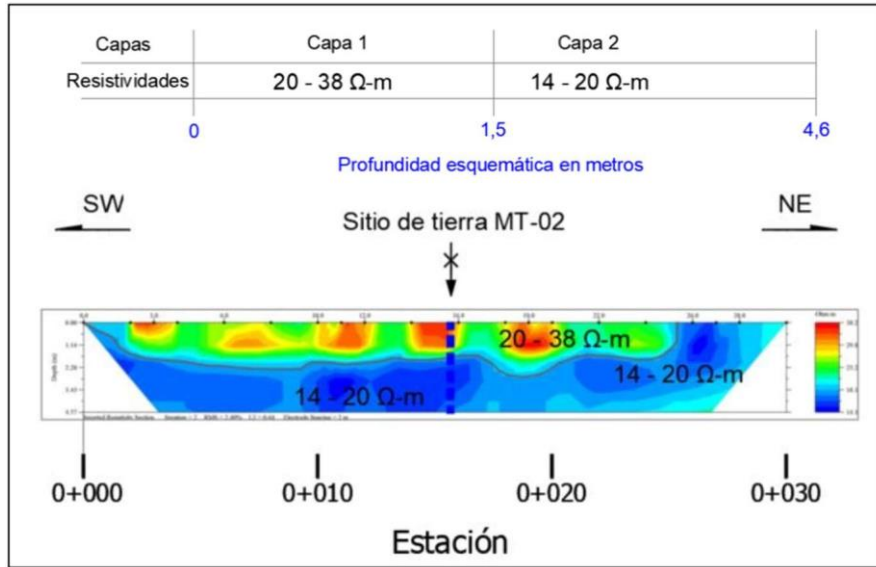
#### **4.3.4 Análisis de Resistividad Eléctrica del Suelo**

La obtención de resultados significativos en el estudio de resistividad eléctrica en el área destinada a la construcción de una nave industrial en el parque industrial "Zona Franca La Lima" ha sido posible gracias a la invaluable colaboración del personal ingenieril de dicha entidad. Este estudio, encargado y costado por el propio equipo del parque industrial, ha sido llevado a cabo por una empresa especializada en la realización de investigaciones de esta naturaleza.

Aunque la presente investigación no profundiza exhaustivamente en la metodología empleada para la obtención de los resultados, se ofrece una concisa explicación de la metodología aplicada. En este análisis, se privilegió el uso del método de imagen de resistividad, conocido también como tomografía eléctrica. Este método se fundamenta en la modelización en dos dimensiones de la resistividad del terreno, empleando electrodos enterrados en la zona de estudio. El arreglo de electrodos utilizado fue el conocido como *Wenner Alfa*, el cual prescribe la disposición de cuatro electrodos en línea recta, a una

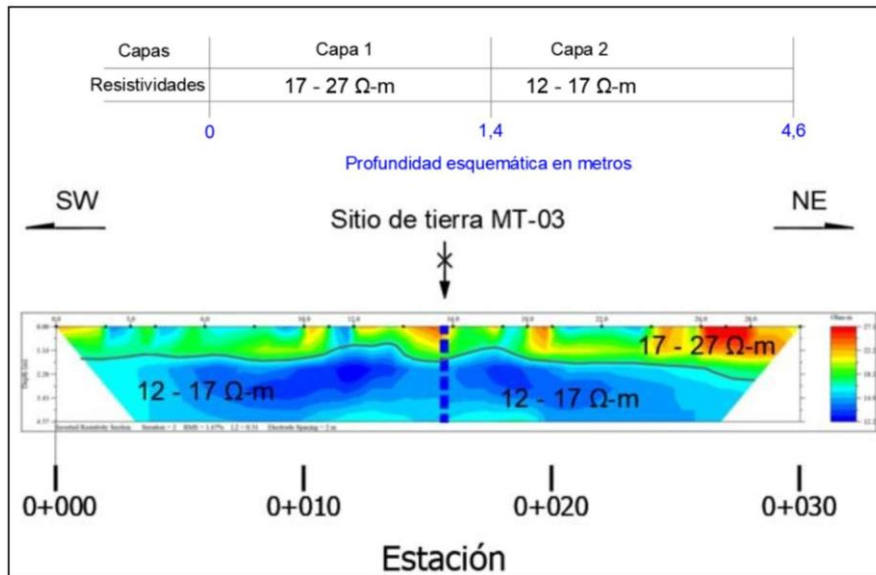


**Figura 4.23 Resultado de Resistividad Eléctrica en Punto de Medición MT-02.**



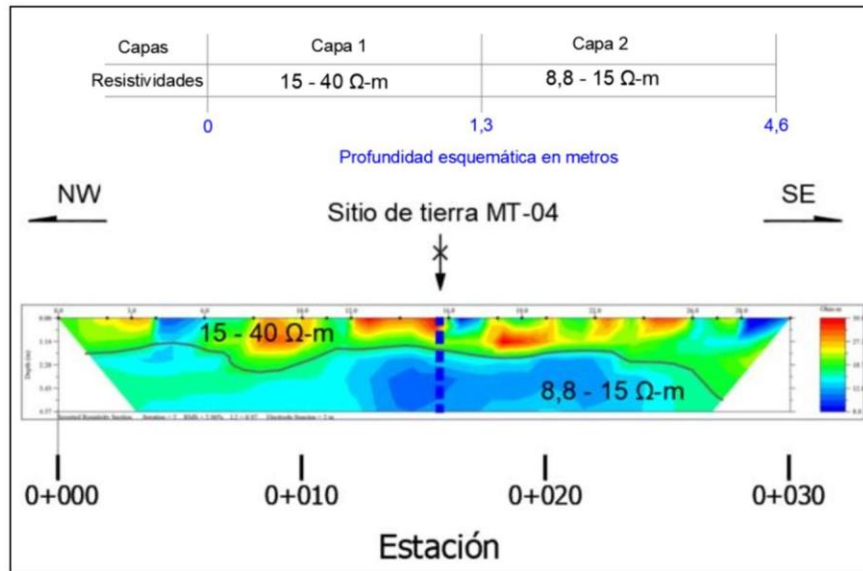
Tomado de Valverde, (2023).

**Figura 4.24 Resultado de Resistividad Eléctrica en Punto de Medición MT-03.**



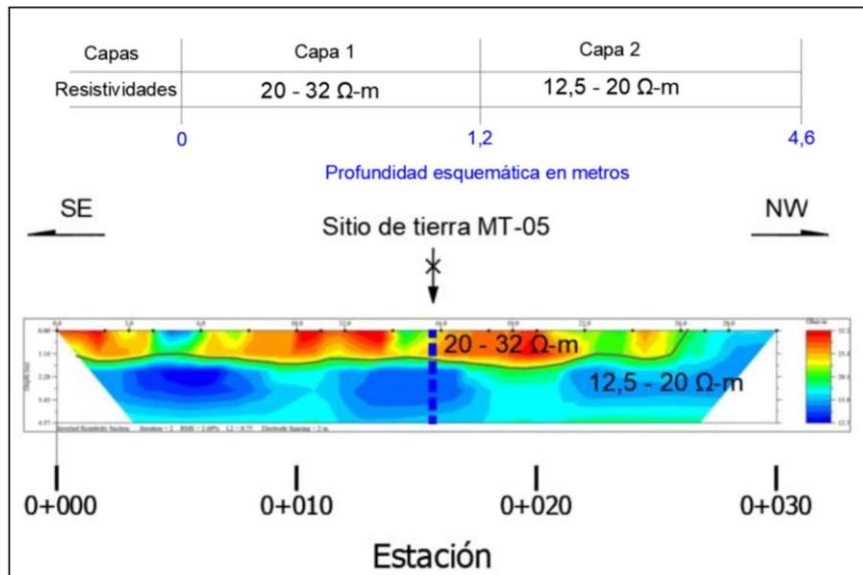
Tomado de Valverde, (2023).

**Figura 4.25 Resultado de Resistividad Eléctrica en Punto de Medición MT-04.**



Tomado de Valverde, (2023).

**Figura 4.26 Resultado de Resistividad Eléctrica en Punto de Medición MT-05.**



Tomado de Valverde, (2023).

Los resultados de este estudio evidencian consistentemente una baja resistividad del suelo en todos los puntos analizados, lo cual es fundamental para el diseño de la malla de tierras requerida para la infraestructura industrial. Esta malla se conectará a los bajantes de pararrayos, cuyo diseño posterior se basará en esta información. El uso de

la ecuación de *Sverak* para calcular la resistividad total del sistema, que incluye la variable de resistividad del suelo, subraya la importancia de estos hallazgos.

Al considerar la información recopilada, se enfocará en los datos de resistividad más elevados dentro del rango de profundidad de 0 m a 1.2 m. Se asume una longitud promedio de 2.44 m para las varillas de puesta a tierra y un enterramiento de 0.5 m que es lo usual en estos sistemas y por ello se eligen estos rangos.

En consecuencia, se adoptará una resistividad del suelo de 40  $\Omega$ -m como punto crítico para el cálculo de la malla de puesta a tierra.

#### 4.3.5 Análisis de Resistencia del Sistema de Puesta a Tierra

Según las ecuaciones de Schwarz mencionadas en la normativa IEEE 80, *es posible calcular la resistencia total del sistema de puesta a tierra en un suelo homogéneo, considerando un diseño que incorpora conductores horizontales y varillas enterradas de forma vertical. De acuerdo con la ecuación proporcionada, se establece que:*

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

En donde:

$R_g$  = Resistencia total del sistema.

$R_1$  = Resistencia a tierra de los conductores de la malla en  $\Omega$ .

$R_2$  = Resistencia a tierra de todas las barras de tierra en  $\Omega$ .

$R_m$  = Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la red,  $R_1$  y un grupo de barras de tierra  $R_2$  en  $\Omega$ .

Para obtener la resistencia a tierra de los conductores de la malla se procede de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{K_1 * L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

En donde:

$R_1$  = Resistencia a tierra de los conductores de la malla en  $\Omega$ .

$\rho$  = Resistividad del suelo en  $\Omega \cdot m$ .

$L_c$  = Longitud total de todos los conductores de la malla conectados en metros.

$a'$  = Es  $\sqrt{2ha}$  para conductores enterrados a una profundidad  $h$  en metros.

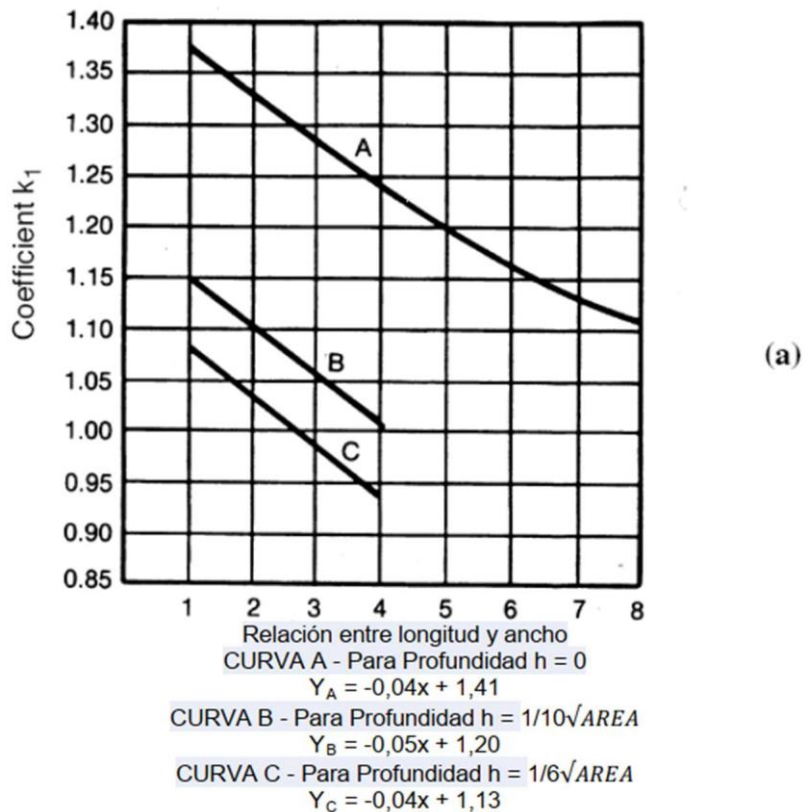
$a'$  = Es "a" para conductores en la superficie de la tierra en metros.

$2a$  = Es el diámetro del conductor en metros.

$A$  = Es el área cubierta por los conductores en metros.

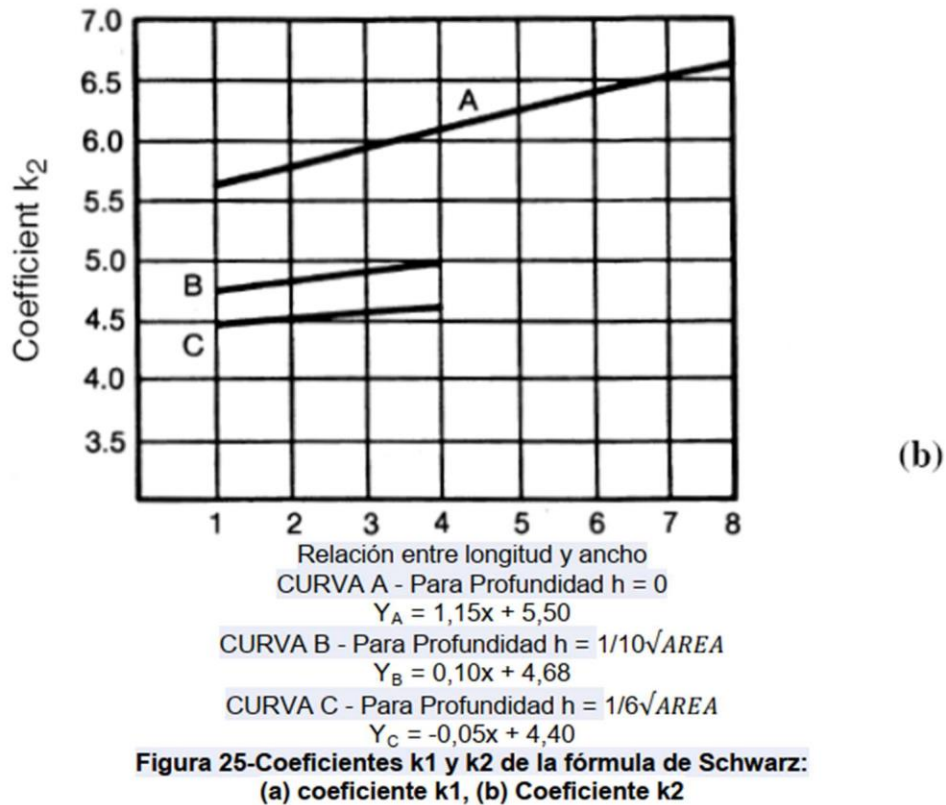
$K_1, K_2$  = Son los coeficientes mostrados en los gráficos 4.1 y 4.2

**Gráfico 4.1 Coeficiente  $K_1$  para determinar la resistencia de la malla a tierra de conductores.**



Tomado de IEEE 80, (2005).

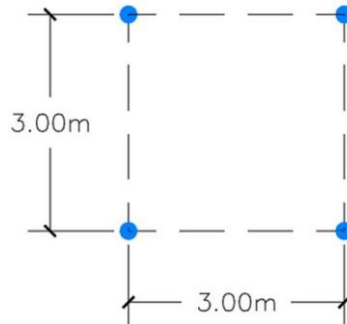
**Gráfico 4.2 Coeficiente K2 para determinar la resistencia de la malla a tierra de conductores.**



Tomado de IEEE 80, (2005).

Según las ecuaciones previamente mencionadas y considerando una malla de tierras con una forma cuadrada, con dimensiones de tres metros en cada uno de sus lados, junto con la disposición de cuatro varillas de tierra enterradas verticalmente, como se ilustra en la Figura 4.27, se obtienen los siguientes resultados:

**Figura 4.27** Malla de tierras de 4 varillas enterradas verticalmente, con 3m de distanciamiento entre ellas, figura tipo cuadrado.



Creación propia, (2024).

Tal como se mencionó previamente, el valor crítico de  $40 \Omega\cdot m$  se emplea como referencia para la resistividad del suelo, conforme al estudio realizado; este valor está representado por  $\rho$ .

Para calcular la longitud total del conductor " $L_c$ ", se suman geoméricamente las líneas punteadas en la Figura 4.27, que representan las conexiones del conductor de puesta a tierra. El resultado de esta suma es de 12 metros.

Para calcular  $a'$ , se realiza la operación de obtener la raíz cuadrada del producto de dos veces el diámetro del conductor por la altura de enterramiento de este, habitualmente de 0.5 metros.

Asimismo, de acuerdo con las directrices establecidas en la normativa NFPA 780 versión 2014, y considerando una nave industrial con una altura de 15 metros, se especifica que los materiales a utilizar deben pertenecer a la Clase I como se indica en la Figura 4.28.

**Figura 4.28 Materiales Clase I, área transversal no menor a 58mm<sup>2</sup>.**

Tabla 4.1.1.1.1 Requisitos mínimos de los materiales de Clase I

Tipo de conductor	Parámetro	De cobre		De aluminio	
		En unidades del sistema estadounidense (U.S.)	En unidades del sistema internacional (SI)	En unidades del sistema estadounidense (U.S.)	En unidades del sistema internacional (SI)
Terminal aéreo, sólido	Diámetro	¾ pulg.	9.5 mm	½ pulg.	12.7 mm
Terminal aéreo, tubular	Diámetro	¾ pulg.	15.9 mm	¾ pulg.	15.9 mm
Conductor principal, cable	Espesor	0.033 pulg.	0.8 mm	0.064 pulg.	1.63 mm
	Tamaño de cada filamento	17 AWG	1.04 mm <sup>2</sup>	14 AWG	2.08 mm <sup>2</sup>
	Peso por unidad de longitud	187 lb/1000 pies	278 g/m	95 lb/1000 pies	141 g/m
Conductor de interconexión, cable (sólido o trenzado)	Sección transversal	57,400 cir. mils	29 mm <sup>2</sup>	98,600 cir. mils	50 mm <sup>2</sup>
	Tamaño de cada alambre	17 AWG	1.04 mm <sup>2</sup>	14 AWG	2.08 mm <sup>2</sup>
Conductor de interconexión, tipo cinta	Sección transversal	26,240 cir. mils	13.3 mm <sup>2</sup>	41,100 cir. mils	20.8 mm <sup>2</sup>
	Espesor	0.051 pulg.	1.30 mm	0.064 pulg.	1.63 mm
Conductor principal, tira sólida	Ancho	¾ pulg.	12.7 mm	½ pulg.	12.7 mm
	Espesor	0.051 pulg.	1.30 mm	0.064 pulg.	1.63 mm
	Sección transversal	57,400 cir. mils	29 mm <sup>2</sup>	98,600 cir. mils	50 mm <sup>2</sup>

Tomado de López, (2014).

Bajo el entendido de que el cableado de puesta a tierra se debe calcular con respecto al código eléctrico nacional, NFPA 70 y asumiendo para este ejemplo que el cableado de puesta a tierra es de un calibre 1/0 AWG es importante tomar en cuenta las propiedades de la tabla 8 de la NFPA 70 indicada en la figura 4.29.

**Figura 4.29 Tabla 8 propiedades de los conductores**

Tabla 8 Propiedades de conductores

Calibre (AWG o kcmil)	Área		Cantidad	Conductores					
				Trenzado		Total		Área	
	mm <sup>2</sup>	Mils circulares		mm	pulg.	mm	pulg.	mm <sup>2</sup>	pulg. <sup>2</sup>
18	0.823	1620	1	—	—	1.02	0.040	0.823	0.001
18	0.823	1620	7	0.39	0.015	1.16	0.046	1.06	0.002
16	1.31	2580	1	—	—	1.29	0.051	1.31	0.002
16	1.31	2580	7	0.49	0.019	1.46	0.058	1.68	0.003
14	2.08	4110	1	—	—	1.63	0.064	2.08	0.003
14	2.08	4110	7	0.62	0.024	1.85	0.073	2.68	0.004
12	3.31	6530	1	—	—	2.05	0.081	3.31	0.005
12	3.31	6530	7	0.78	0.030	2.32	0.092	4.25	0.006
10	5.261	10380	1	—	—	2.588	0.102	5.26	0.008
10	5.261	10380	7	0.98	0.038	2.95	0.116	6.76	0.011
8	8.367	16510	1	—	—	3.264	0.128	8.37	0.013
8	8.367	16510	7	1.23	0.049	3.71	0.146	10.76	0.017
6	13.30	26240	7	1.56	0.061	4.67	0.184	17.09	0.027
4	21.15	41740	7	1.96	0.077	5.89	0.232	27.19	0.042
3	26.67	52620	7	2.20	0.087	6.60	0.260	34.28	0.053
2	33.62	66360	7	2.47	0.097	7.42	0.292	43.23	0.067
1	42.41	83690	19	1.69	0.066	8.43	0.332	55.80	0.087
1/0	53.49	105600	19	1.89	0.074	9.45	0.372	70.41	0.109
2/0	67.43	133100	19	2.13	0.084	10.62	0.418	88.74	0.137
3/0	85.01	167800	19	2.39	0.094	11.94	0.470	111.9	0.173
4/0	107.2	211600	19	2.68	0.106	13.41	0.528	141.1	0.219

Tomado de Valverde, M., Macías, A y Galbiatti, E. (2014).

Sustituyendo los datos obtenidos del diámetro del conductor en la ecuación previamente mencionada, donde "2a" es el diámetro del conductor y "h" la profundidad de enterramiento del conductor, se obtiene el siguiente resultado:

$$a' = \sqrt{2 * h * a} = \sqrt{0.5 * 9.45 \times 10^{-3}}$$

$$a' = 0.069 \text{ m}$$

Para determinar el valor de "A", se procede a calcular el área del conductor. De acuerdo con la Figura 4.27, se sabe que el área corresponde a la de un rectángulo. Por lo tanto, la ecuación y el resultado obtenidos son los siguientes:

$$A = \text{Base} \times \text{Altura} = 3 \times 3 = 9 \text{ m}^2$$

Se determinan los factores K1 y K2 siguiendo las ecuaciones y gráficos 4.1 y 4.2, respectivamente. En este contexto, se emplearán las ecuaciones correspondientes a la curva B, ya que la curva A representa conductores con una profundidad de enterramiento de 0 m, lo cual no es aplicable al caso de estudio, y la curva C hace referencia a una profundidad de enterramiento de conductor mayor. Por consiguiente, la curva B es la más adecuada para la investigación.

Para calcular el valor de K1, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Y_B = -0.05 * X + 1.20$$

Donde "X" hace referencia a la relación del ancho de la malla de tierras, dividido entre el largo de la malla de tierras:

$$Y_B = -0.05 * \left(\frac{3}{3}\right) + 1.20 = 1.15$$

Se tiene por resultado que K1 posee un valor de 1.15.

De acuerdo con el gráfico 4.1 y de acuerdo con su ecuación se procede a calcular el valor de K2 de la siguiente manera:

$$Y_B = 0.10x + 4.68$$

Donde "X" hace referencia a la relación del ancho de la malla de tierras, dividido entre el largo de la malla de tierras:

$$Y_B = 0.10 * \left(\frac{3}{3}\right) + 4.68 = 4.78$$

Se tiene por resultado que K2 posee un valor de 4.78.

De acuerdo con los resultados previamente obtenidos, se procede a calcular el valor de R1 sustituyendo los datos en la ecuación:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \ln \left( \frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{K_1 * L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

$$R_1 = \frac{40}{\pi * 12} \left[ \ln \left( \frac{2 * 12}{0.069} \right) + \frac{1.15 * 12}{\sqrt{9}} - 4.78 \right]$$

$$R_1 = 6.02 \Omega$$

Teniendo el resultado de la resistencia a tierra de los conductores de la malla, se continúa con el cálculo de la resistencia de tierra de las barras, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi * n_R * L_R} * \left[ \ln \left( \frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 * L_R}{\sqrt{A}} * \left( \sqrt{n_R} - 1 \right)^2 \right]$$

En donde:

$R_2$  = Resistencia de tierra de las barras.

$\rho$  = Resistividad del suelo en  $\Omega \cdot m$ .

$L_R$  = Longitud de cada varilla en metros.

$2b$  = Es el diámetro de la varilla en metros ó

$n_R$  = Es el número de barras situado en la zona A.

A = Es el área cubierta por los conductores en metros.

$K_1, K_2$  = Son los coeficientes mostrados en los gráficos 4.1 y 4.2

Antes de realizar el cálculo de  $R_2$  se deben definir los valores de  $L_R$ ,  $N_R$  y  $b$  ya que son los valores que aún no se tienen definidos. El valor de  $L_R$  está determinado por los valores comerciales de las varillas de tierra, así como también por normativa del NFPA 70, por lo cual, el valor de  $L_R$  será de 2.44 m de largo para cada varilla.

Por otro lado, el valor de  $N_R$  está determinado por la cantidad de varillas y de acuerdo con la figura 4.27, según la propuesta inicial de malla de tierras, se cuenta con un valor de  $N_R$  igual a 4.

Las varillas para utilizar en el diseño serán de 19 mm de diámetro, por lo cual el valor de  $b$  está determinado por la relación de  $2b$  en metros, dando como resultado 0.0095 m.

De acuerdo con los valores previamente calculados, se pueden sustituir los valores en la ecuación:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi * n_R * L_R} * \left[ \ln \left( \frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 * L_R}{\sqrt{A}} * (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right]$$
$$R_2 = \frac{40}{2\pi * 4 * 2.44} * \left[ \ln \left( \frac{4 * 2.44}{0.0095} \right) - 1 + \frac{2 * 1.15 * 2.44}{\sqrt{9}} * (\sqrt{4} - 1)^2 \right]$$

$$R_2 = 5.09 \Omega$$

De igual forma, se procede a calcular el valor de  $R_m$  que hace referencia a la resistencia mutua entre la malla de tierras y las barras, dicho cálculo se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \ln \left( \frac{2L_C}{L_R} \right) + \frac{K_1 * L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

Donde las variables representan los valores previamente calculados o definidos, con lo cual, sustituyendo, se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_m = \frac{40}{\pi * 12} \left[ \ln \left( \frac{2 * 12}{2.44} \right) + \frac{1.15 * 12}{\sqrt{9}} - 4.78 + 1 \right]$$

$$R_m = 3.30 \Omega$$

Como último paso, se determina la resistencia total del sistema  $R_g$  por medio de la ecuación:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

Sustituyendo los valores calculados, se obtiene que:

$$R_g = \frac{6.02 * 5.09 - 3.30^2}{6.02 + 5.09 - 2 * 3.30}$$

$$R_g = 4.38 \Omega$$

El sistema exhibe una resistencia total que se mantiene por debajo del límite máximo de  $10 \Omega$  establecido para un sistema de pararrayos de acuerdo con las recomendaciones indicadas por la normativa IEC 62305 y NF C 17-102. Es notable que el valor registrado

de  $4.38 \Omega$  sea significativamente bajo, lo cual indica una mayor eficiencia del sistema para canalizar la energía de las descargas atmosféricas hacia la tierra. Esto sugiere una capacidad efectiva del sistema para mitigar los efectos de las descargas eléctricas atmosféricas.

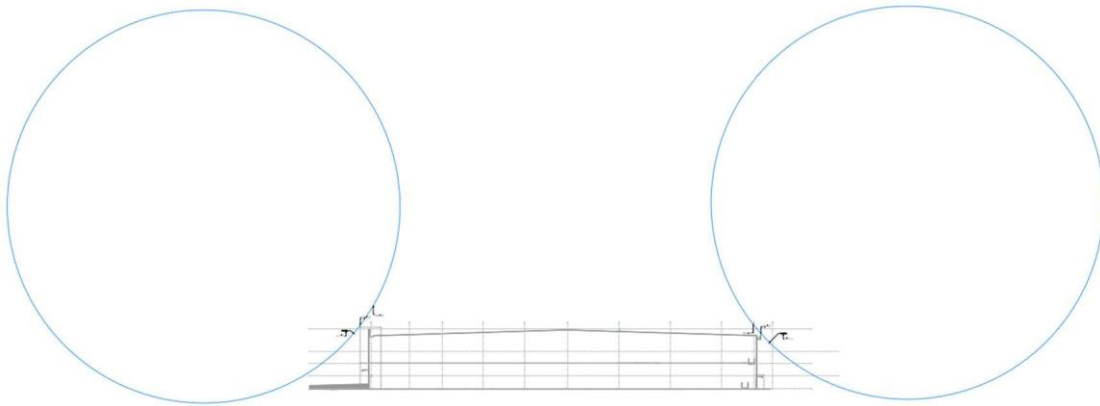
#### **4.3.6 Análisis de Radios de Protección de Pararrayos Mediante el Uso del Software AutoCAD**

De acuerdo con lo mencionado previamente, es posible proteger una edificación contra descargas atmosféricas mediante diversos métodos. No obstante, en esta investigación se ha optado por utilizar el método de la esfera rodante, el cual se ilustrará posteriormente con un ejemplo de diseño.

En esta sección, los radios de protección serán determinados por las terminales o puntas captadoras perimetrales, las cuales deberán cumplir con los preceptos previamente establecidos en este estudio, basados en la NFPA 780. Estos radios son cruciales para garantizar que todas las áreas de la edificación estén adecuadamente protegidas contra descargas atmosféricas.

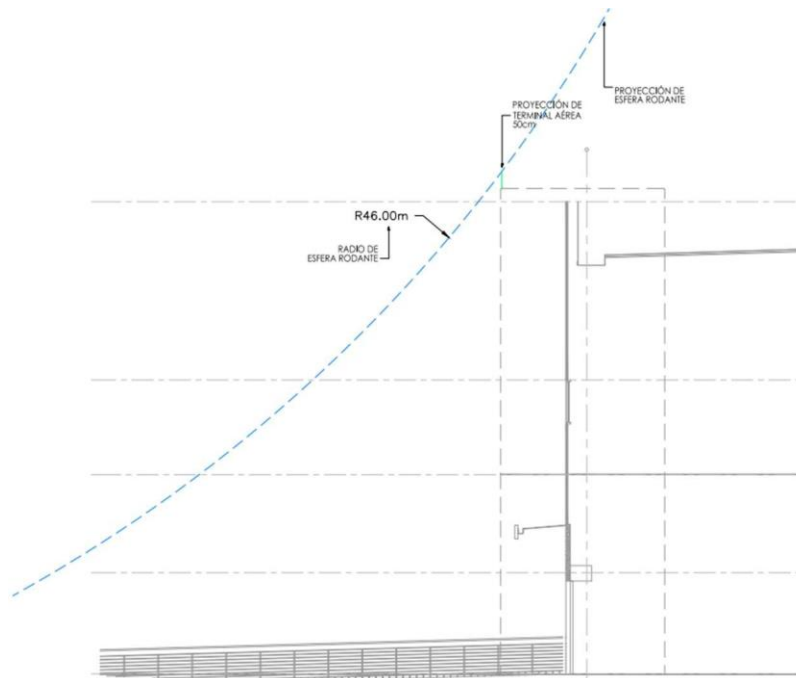
Para el ejemplo, se continuará con el caso previamente mencionado de estudio. Se proyectan las puntas captadoras en los extremos de la edificación para determinar si los radios de protección cubren todas las áreas hasta tocar el suelo sin comprometer ningún sector de la estructura. Este análisis permitirá verificar la eficacia del diseño y asegurar que no haya zonas desprotegidas dentro de su perímetro.

**Figura 4.30** Ejemplo de radios de cobertura con respecto a terminales perimetrales



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

**Figura 4.31** Ampliación del ejemplo de radios de cobertura con respecto a las terminales perimetrales.



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Como se puede visualizar en las figuras 4.30 y 4.31, la esfera rodante, partiendo de la terminal aérea perimetral, no colisiona con ninguna parte de la estructura, incluyendo aleros, cuartos o elementos similares. Esto indica que la ubicación de dichas terminales está correctamente diseñada y posicionada para garantizar una protección óptima.

#### **4.3.7 Análisis de Distancias, Distribución de Puntas, Bajantes y Diseño de un Sistema de Pararrayos Mediante el Uso del Software AutoCAD**

Siguiendo el enfoque de la sección anterior, se realizará un análisis preliminar de la posible ubicación de las terminales aéreas. Se recomienda iniciar el diseño con base en las terminales perimetrales, ya que estas no deben sobrepasar las distancias delimitadas.

Específicamente, las terminales perimetrales no deben estar a más de 60 cm del borde de la estructura y la distancia entre ellas no debe exceder los 6 m, esto aplica únicamente a nivel perimetral y para terminales con una altura no superior a 50 cm. Si la terminal supera los 50 cm de altura, la distancia máxima entre terminales aéreas en el perímetro puede ser de hasta 7.6 m.

En este caso de estudio, se utilizará una terminal de 50 cm de largo con el fin de analizar un escenario crítico. Sin embargo, el lector de esta investigación podrá utilizar terminales de mayor altura, lo que resultará en un mayor distanciamiento entre las terminales, una menor cantidad de dispositivos necesarios y, por ende, una mayor economía para el proyecto.

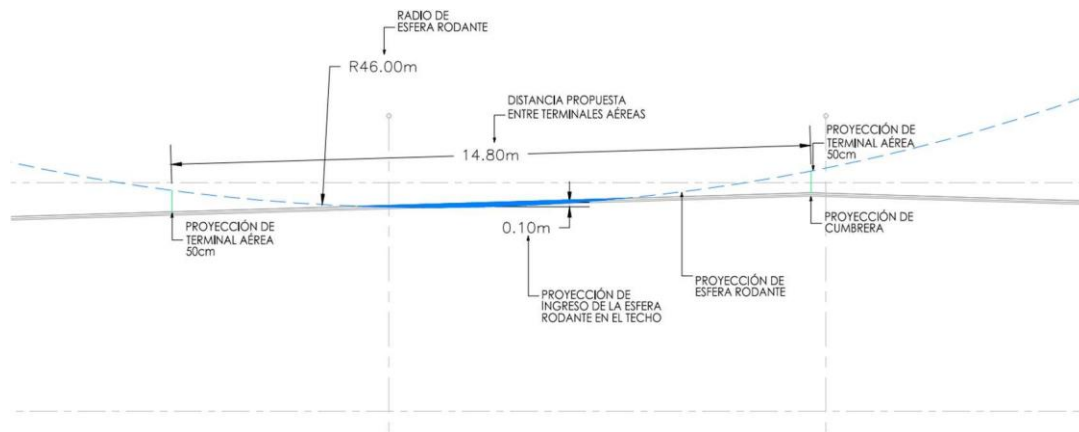
En cuanto a la implementación del método de la esfera rodante, es necesario llevar a cabo un análisis detallado en el que se haga rodar una esfera sobre el techo y los elementos de la estructura, con el objetivo de determinar las posiciones óptimas para las puntas captadoras o terminales. Durante este proceso, la esfera no debe en ningún momento tocar o coincidir con ningún elemento que no sea una terminal. Si la esfera llegase a tocar algún elemento, será necesario incorporar una punta captadora en esa posición para asegurar la protección de todas las áreas, aristas, caras y elementos de la nave industrial o estructura.

Se recomienda realizar este análisis en tres dimensiones utilizando software de diseño, como por ejemplo Revit. No obstante, dado que esta investigación se basa en la

normativa del año 2014 y que Revit no ha ganado popularidad sino hasta en años recientes, así como considerando a los profesionales que pueden no estar familiarizados con dicho software, se optó por realizar el análisis con AutoCAD, un software más accesible y conocido. Mediante AutoCAD, se generaron secciones que permiten visualizar de manera sencilla la esfera rodante y los puntos en los cuales es necesaria la colocación de las terminales.

En este documento se analizará una nave industrial previamente estudiada utilizando el método de mallas. Sin embargo, al validar la información de radios de cobertura mediante el método de la esfera rodante y utilizando una punta captadora de 50cm, se concluyó que el método de mallas era insuficiente para el tipo de techo y su pendiente particular. Como se muestra en la Figura 4.32, el radio de cobertura de la esfera rodante interceptaba parte del techo antes de alcanzar la siguiente terminal, lo que llevó a la decisión de colocar las terminales más cerca unas de otras.

**Figura 4.32 Ejemplo de método de la esfera rodante tocando el techo**



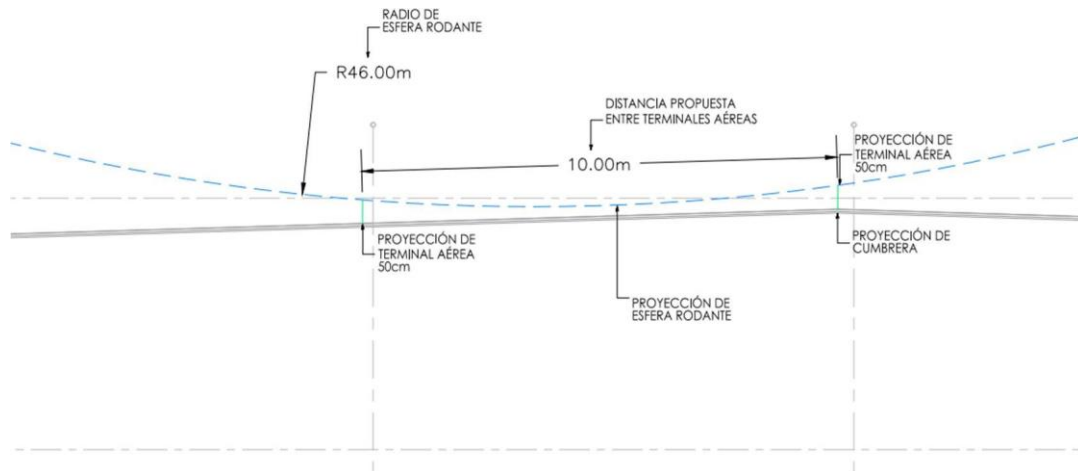
Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Como se muestra en la Figura 4.32, al aplicar el método de la esfera rodante, se observa claramente una colisión con el techo antes de alcanzar la siguiente terminal. Por esta razón, es necesario colocar las terminales aéreas a una distancia menor entre ellas. La intromisión de la esfera rodante en el techo antes de tocar la próxima terminal está

representada con un sombreado azul en la figura mencionada. Aunque esta penetración no es muy notoria, se ha acortado, resultando en una medida de 10 cm.

Al reducir la distancia entre las terminales a un máximo de 10 metros, se obtiene un resultado óptimo en el que la esfera rodante no toca el techo antes de alcanzar otra terminal, como se puede visualizar en la Figura 4.33.

**Figura 4.33** Ejemplo del método de la esfera rodante sin tocar el techo



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Este ejercicio debe realizarse para cada punto, elevación o elemento que sobresalga y forme parte de la estructura, como se estará realizando en la imagen de la sección 4.3.8.

De acuerdo con el ejercicio anterior, se determina que la distancia entre terminales aéreas no debe superar los 10 metros, tanto a nivel horizontal como vertical, para este caso de estudio. Esto asegura una cobertura adecuada y una protección óptima contra descargas atmosféricas.

Seguidamente, y siguiendo el mismo enfoque, se determina la cantidad de bajantes que deberá tener la edificación. Como se indicó previamente, la distancia promedio entre bajantes no debe exceder los 30 metros. Para calcular la cantidad de bajantes

necesarias, se toma el perímetro de la estructura y se divide entre 30. Este cálculo permite asegurar que todas las áreas de la nave industrial están protegidas de manera efectiva.

Se toma como ejemplo una nave industrial con un perímetro de 341 metros. Al dividir 341 m entre 30, se obtiene un resultado de 11.36 bajantes. Dado que no se puede tener fracciones de bajantes, se redondea este número a 12 bajantes. Esto indica que hay que considerar 12 bajantes distribuidos de la mejor forma posible alrededor de la estructura. De esta manera, se facilita un camino efectivo hacia tierra para las descargas atmosféricas que puedan ocurrir, asegurando así la protección integral de la edificación.

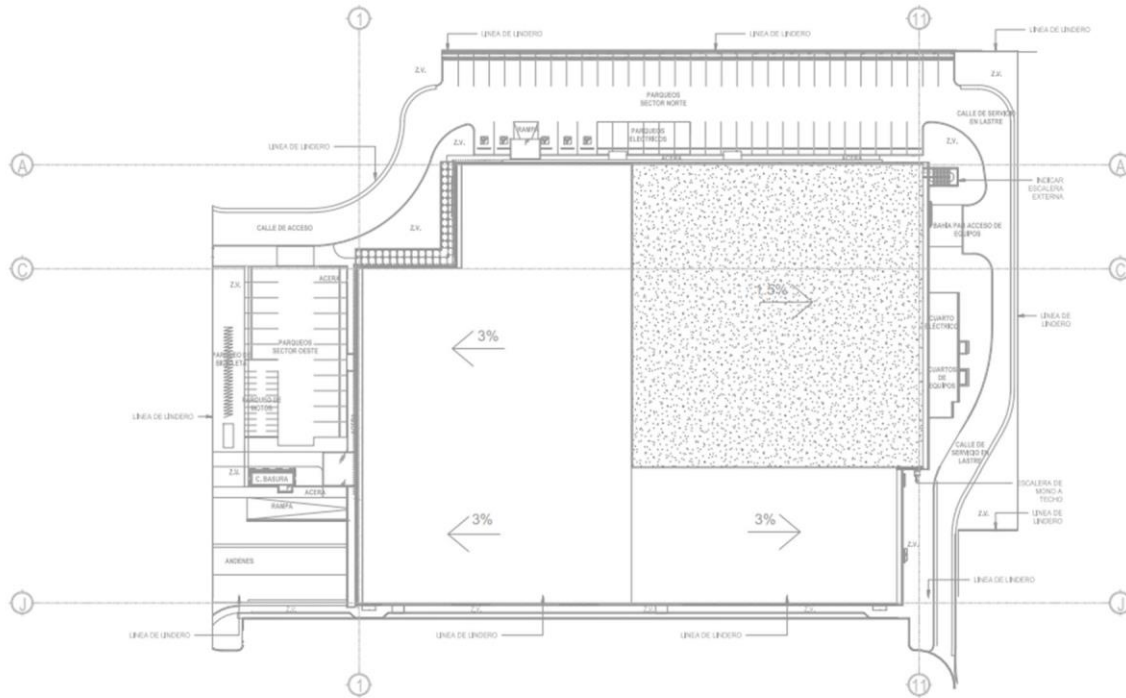
#### **4.3.8 Propuesta de Diseño de un Sistema de Pararrayos**

Conforme a los lineamientos expuestos, se desarrollará una propuesta de diseño para un sistema de protección contra descargas atmosféricas. Este diseño seguirá la normativa detallada anteriormente, con el objetivo de proporcionar una imagen práctica de los procedimientos descritos en otras partes de esta investigación. La finalidad de esta propuesta es no solo cumplir con los estándares establecidos, sino también facilitar el comprender su aplicación a través de un ejemplo concreto.

Para este ejemplo ilustrativo, se toma como referencia una nave industrial en construcción ubicada en el parque industrial "Zona Franca La Lima de Cartago", en el sector de Cartago. Esta nave industrial incluye diversas características, tales como áreas de estacionamiento, elementos de vidrio en las fachadas, y varias estructuras salientes, como la casa de máquinas de equipos mecánicos, el cuarto eléctrico, andenes de carga y descarga, y escaleras de acceso al techo. Los techos de la nave son a dos aguas con una pendiente del 3% y un techo de 1.5%, y están recubiertos con material TPO (poliolefina termoplástica), una membrana de una sola capa que se suelda por calor y es ampliamente utilizada en este tipo de construcciones a excepción del techo que posee una pendiente del 1.5%, el cual será en concreto y se tiene previsto para la colocación de futuros equipos.

La descripción anterior se puede visualizar de manera más clara en la figura 4.34, presentada a continuación:

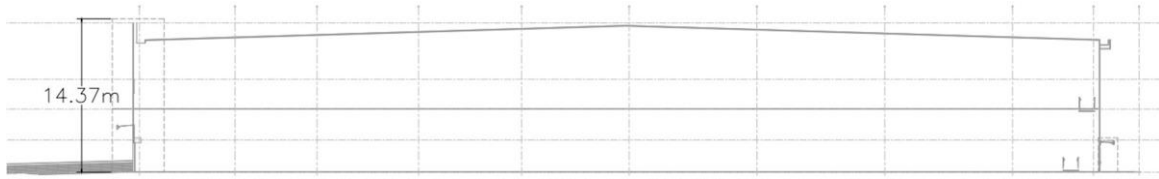
**Figura 4.34 Vista en planta de la nave industrial de caso de estudio**



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Como primer paso, es necesario definir la altura de la estructura para determinar la clase de material que se utilizará, conforme a la normativa NFPA 780. Al realizar un corte transversal de la estructura, se puede identificar su altura máxima, lo cual se ilustra con mayor claridad en la figura 4.35.

**Figura 4.35 Vista en corte de la nave industrial, altura más alta 14.37 m.**



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Como se muestra en la figura 4.35, el corte del edificio revela que la parte más alta de la estructura tiene una altura de 14.37 metros desde el piso hasta el punto más alto. Siguiendo la normativa y los pasos previamente mencionados, se determina que, para una estructura con una altura final menor a 23 metros, se deben emplear materiales de clase I. Estos materiales están detallados en la tabla 4.1.

Como segundo paso y posteriormente a la definición de la estructura y su altura, así como los calibres y materiales por utilizar de acuerdo con el punto más alto de la edificación, se procede a definir el tipo de techo de la estructura.

Para ello, es necesario dimensionar la estructura, el techo y el vano antes de realizar los cálculos correspondientes. De acuerdo con la figura 4.36, se calcula la inclinación del techo. Como se puede observar en la figura 4.36, el techo no es simétrico; una de las pendientes tiene una longitud horizontal de 45.16 metros, mientras que la otra mide 44.54 metros. Se calculará el declive de cada pendiente.

Según los cálculos mencionados en la sección anterior, la desviación del techo se define como el cociente entre la subida del techo y el tendido. Teniendo en cuenta que la subida del techo es de 1.66 metros, los resultados para la inclinación de ambas pendientes son los siguientes:

**Figura 4.36 Vista en corte de la nave industrial, subida y tendido**



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Inclinación 1 para techo de agua de 45.16 m

$$\text{Inclinación 1} = \frac{1.66\text{m}}{45.16\text{m}} = 0.037$$

Inclinación 2 para techo de agua de 44.54m

$$\text{Inclinación 1} = \frac{1.66\text{m}}{44.54\text{m}} = 0.037$$

Como se expuso previamente en la teoría, un techo con un vano superior a los 12 metros, como es el caso de esta nave industrial que cuenta con un vano de 89.70 metros, y con una pendiente menor a 1/4 (0.25), se considerará un techo plano o ligeramente inclinado. Por lo tanto, para el caso del ejemplo que se analizó, se deben seguir las indicaciones específicas para este tipo de techo.

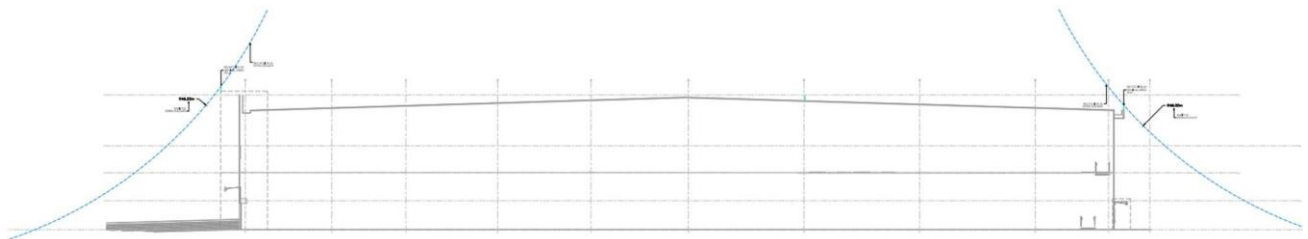
Tercer paso, definición de los métodos de protección. En esta etapa, es crucial seleccionar los métodos de protección que se van a emplear. En el contexto de este estudio, se han utilizado el método de la esfera rodante y el método de mallas. Para evaluar la efectividad de estos métodos, se realizaron cortes o secciones específicas de la nave industrial con el objetivo de verificar si la ubicación de las terminales aéreas cumple con los radios de cobertura establecidos por la esfera rodante.

Tal como se ilustra en las figuras 4.37, 4.38, 4.39, 4.40, 4.41 y 4.42, se determinó que, en todas las caras de la estructura, la esfera rodante no interseca con ninguna parte de la nave. Esto confirma que la colocación de las terminales aéreas en las ubicaciones indicadas por la normativa NFPA 780 es adecuada. Específicamente, el radio de 46 metros de la esfera rodante no colisiona con ningún componente de la edificación antes de llegar al suelo, asegurando así la protección de áreas como el cuarto eléctrico, el cuarto de entrada de servicios de telecomunicaciones, la casa de máquinas, los aleros de puertas, los aleros de fachada y otros elementos salientes, tales como barandas en el sector de los andenes.

Debido a esta configuración, no es necesario instalar puntas o terminales adicionales en estas estructuras, ya que están completamente cubiertas por la zona de protección conforme a los estándares de la normativa. Esta estrategia no solo garantiza la seguridad de la infraestructura, sino que también optimiza los recursos al evitar la sobre instalación de terminales.

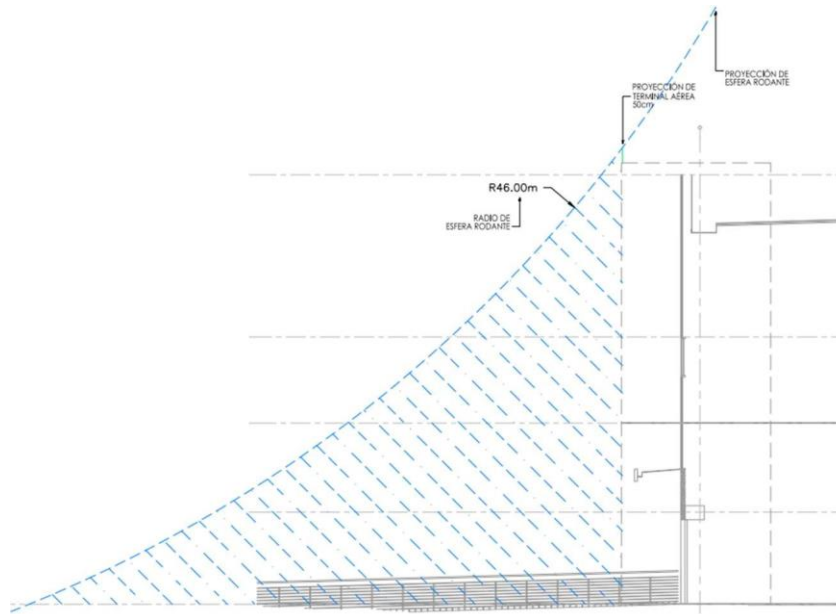
La correcta implementación y verificación de estos métodos de protección son fundamentales para asegurar que todas las áreas de la nave industrial estén adecuadamente protegidas contra descargas atmosféricas, cumpliendo así con los requisitos de seguridad establecidos. Este análisis detallado y riguroso proporciona una base sólida para implementar sistemas de protección eficientes y normativos.

**Figura 4.37 Vista en corte de la nave industrial, radios de cobertura con esfera rodante**



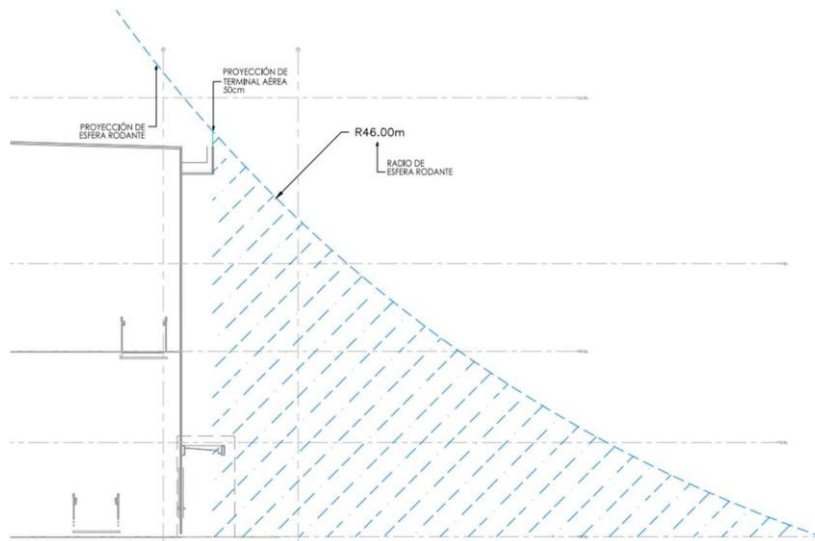
Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

**Figura 4.38 Ampliación del corte, cobertura bajo la esfera rodante**



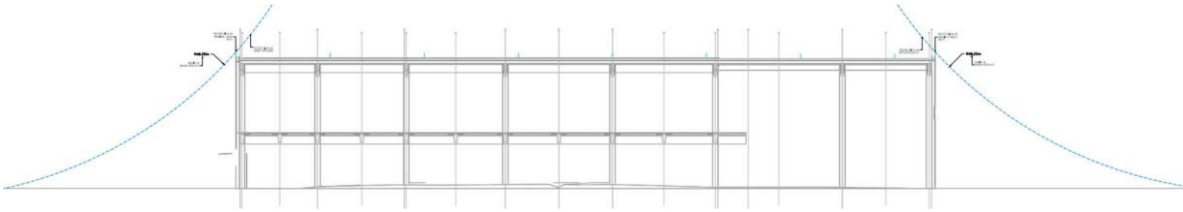
Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

**Figura 4.39 Ampliación del corte, cobertura bajo la esfera rodante.**



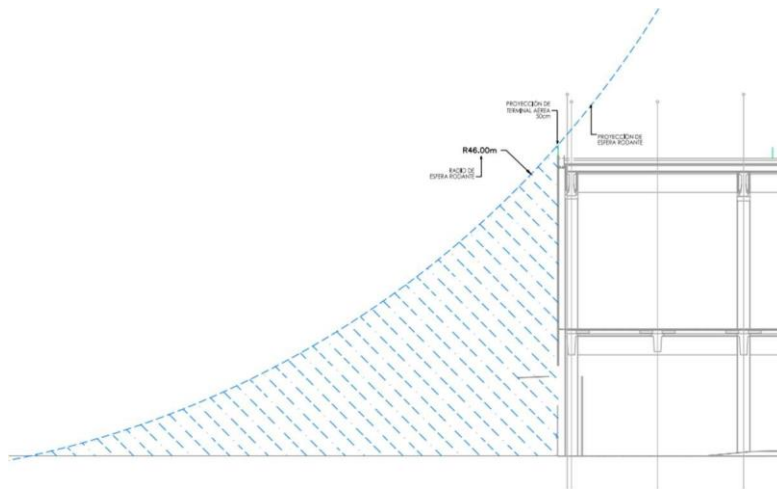
Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

**Figura 4.40** Vista en corte de la nave industrial, radios de cobertura con esfera rodante.



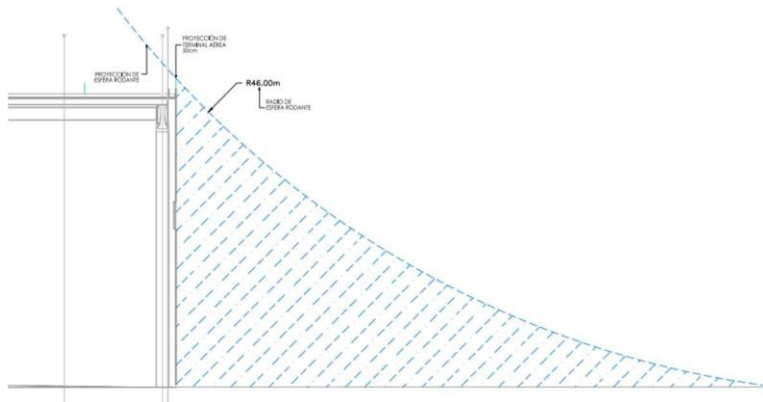
Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

**Figura 4.41** Ampliación del corte, cobertura bajo la esfera rodante.



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

**Figura 4.42** Ampliación del corte, cobertura bajo la esfera rodante.

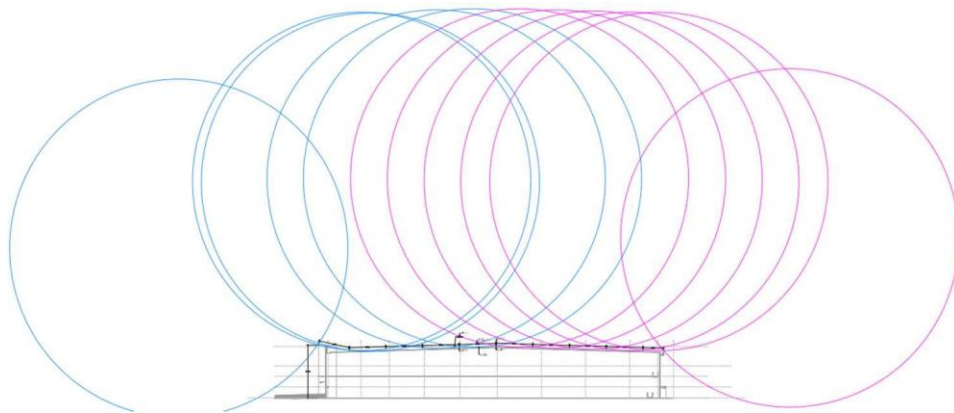


Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para el análisis de los sectores de las fachadas de la estructura y empleando el mismo método, se procede con el análisis de las áreas de los techos. Se representan las esferas rodantes con colores azul y magenta para distinguir con mayor facilidad cada agua del techo.

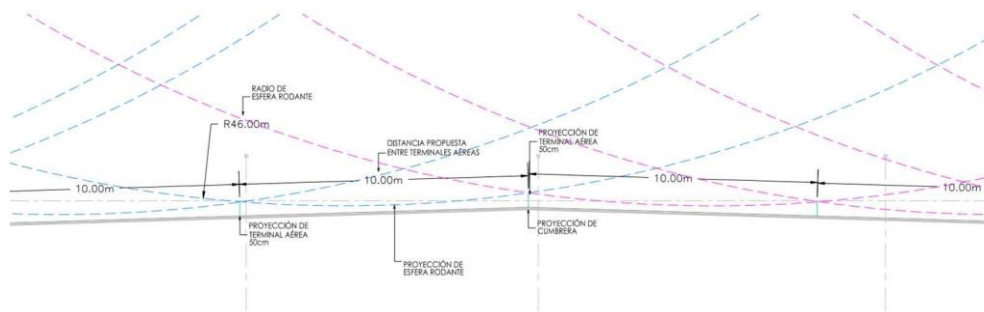
Como se detalló en la sección anterior, las terminales aéreas para un techo con características similares no deberían estar separadas por más de 10 metros entre ellas. Por lo tanto, se ha configurado la disposición de las terminales aéreas, como se muestra en las figuras 4.43 y 4.44.

**Figura 4.43** Representación gráfica del método de la esfera rodante en la nave industrial.



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

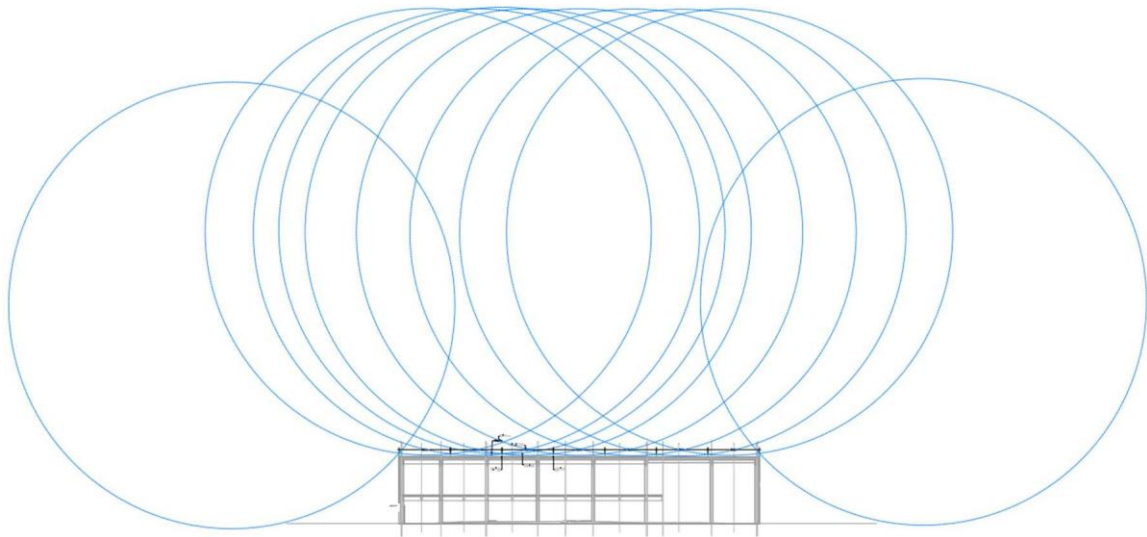
**Figura 4.44** Ampliación de la representación gráfica del método de la esfera rodante en la nave industrial.



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Esta configuración asegura que el techo esté completamente protegido, respetando la normativa vigente y asegurando una cobertura adecuada para prevenir cualquier posible punto de impacto de descargas atmosféricas. La disposición y el espaciamiento de las terminales aéreas se han planificado meticulosamente para cumplir con los estándares de seguridad, garantizando así una protección eficiente y efectiva.

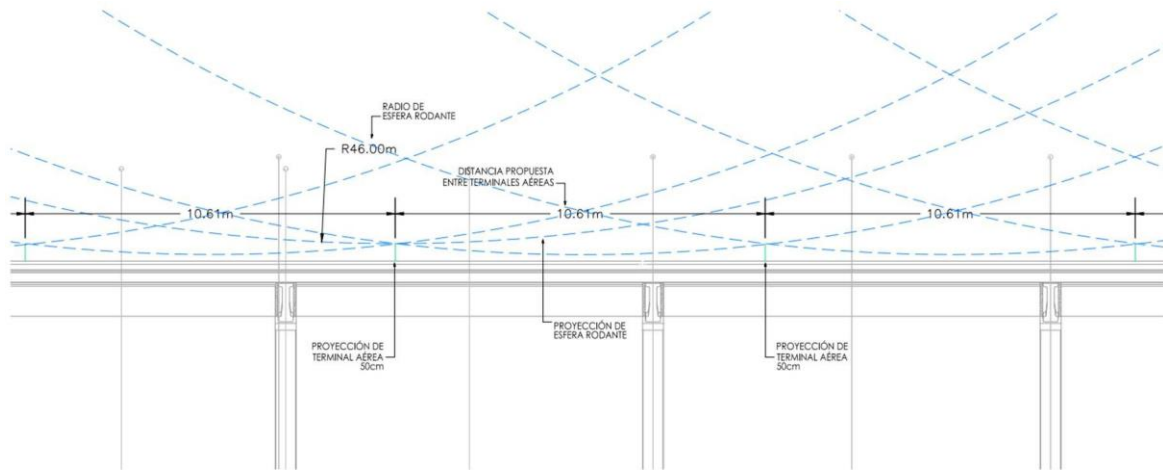
**Figura 4.45** Representación gráfica del método de la esfera rodante en la nave industrial.



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

De acuerdo con la normativa vigente, el análisis de la esfera rodante debe llevarse a cabo en todas las direcciones para asegurar que la esfera no toque el techo ni ningún otro elemento antes de interceptar otra terminal aérea. En las figuras 4.45 y 4.46 se observa que la distancia de 10.65 metros, medida a lo largo del techo donde la pendiente es constante, es adecuada. Este corte transversal del edificio, visto desde el sector oeste, demuestra que este espaciamiento es suficiente para garantizar que la esfera rodante no entre en contacto con el techo antes de alcanzar otra terminal aérea.

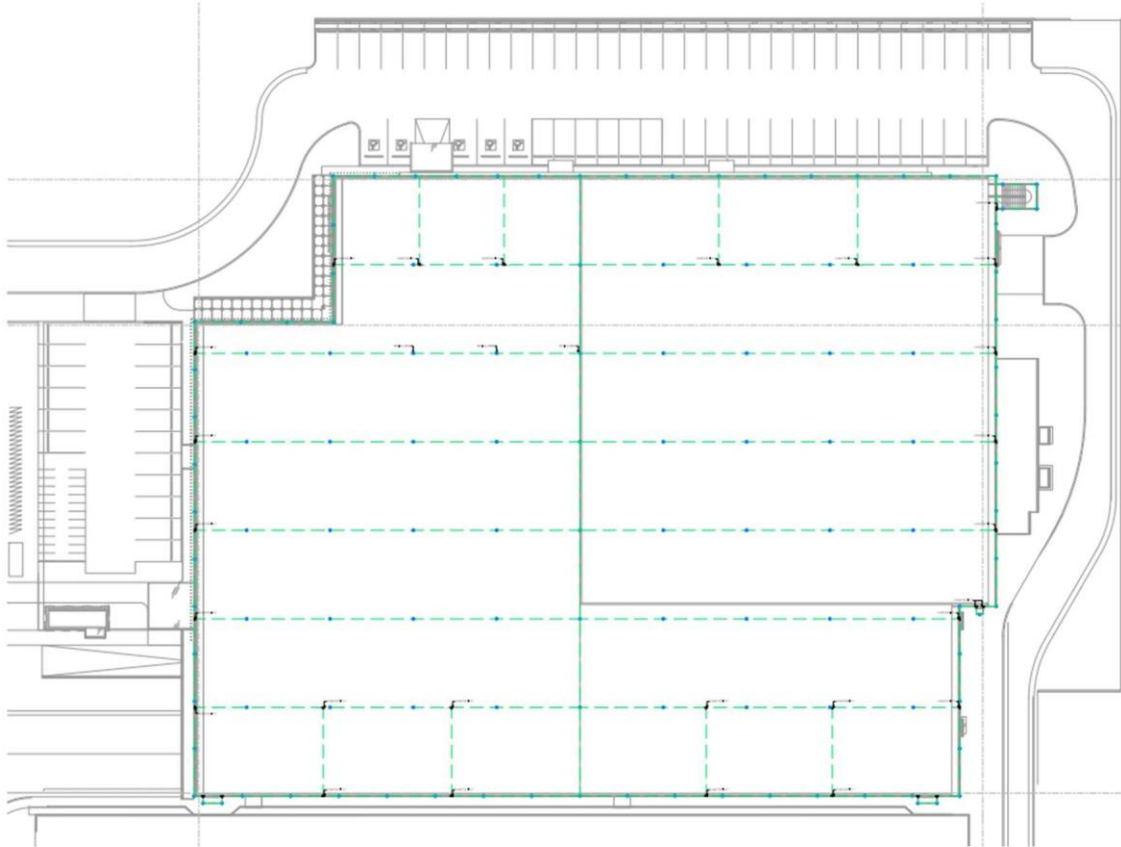
**Figura 4.46** Ampliación de la representación gráfica del método de la esfera rodante en la nave industrial.



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Cabe resaltar que el método de mallas permite una separación de 15 m entre terminales aéreas para un techo plano o ligeramente inclinado, como es el caso descrito. No obstante, se emplea una combinación del método de mallas y método de la esfera rodante para cubrir y proteger adecuadamente todas las áreas de la edificación. De acuerdo con el análisis realizado anteriormente, se puede definir la distribución de las terminales aéreas en vista de planta, la cual se muestra en la figura 4.47, con su respectiva ampliación en la figura 4.48.

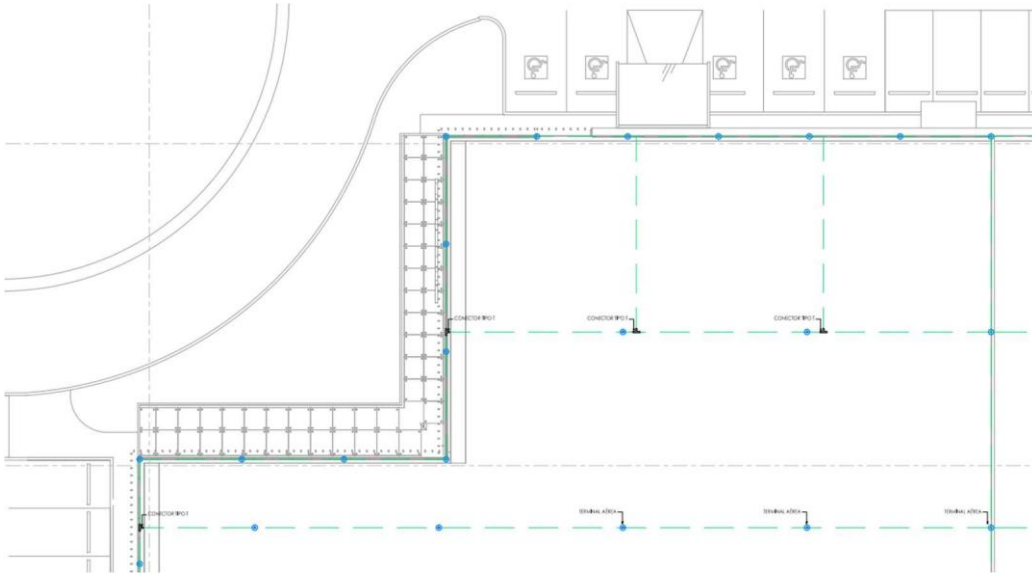
**Figura 4.47 Distribución de terminales aéreas vista en planta**



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

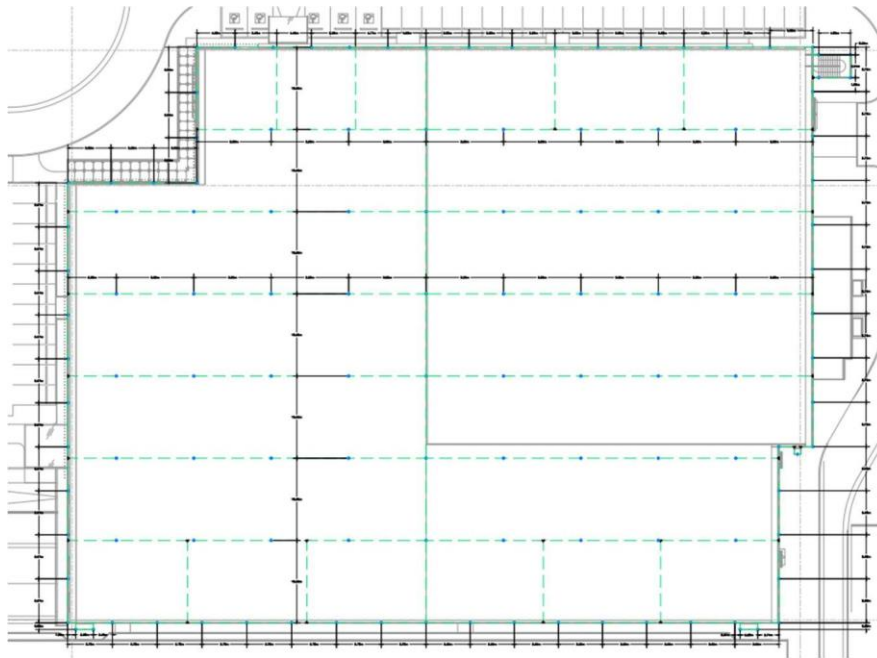
De acuerdo con lo indicado en la normativa NFPA 780, se colocan terminales aéreas alrededor del perímetro de la estructura. Considerando que el ejemplo proporcionado contempla terminales aéreas de 50 cm de altura, la distancia entre las terminales perimetrales no puede superar los 6 m. Además, se instalan terminales aéreas en las escaleras del sector este y en dos estructuras metálicas que sobresalen de la nave en el sector sur. Aunque este elemento sobresaliente es meramente decorativo, no se exime de la responsabilidad de proteger todos los componentes, por lo que es necesario incluirlas.

**Figura 4.48 Ampliación de distribución de terminales aéreas vista en planta.**



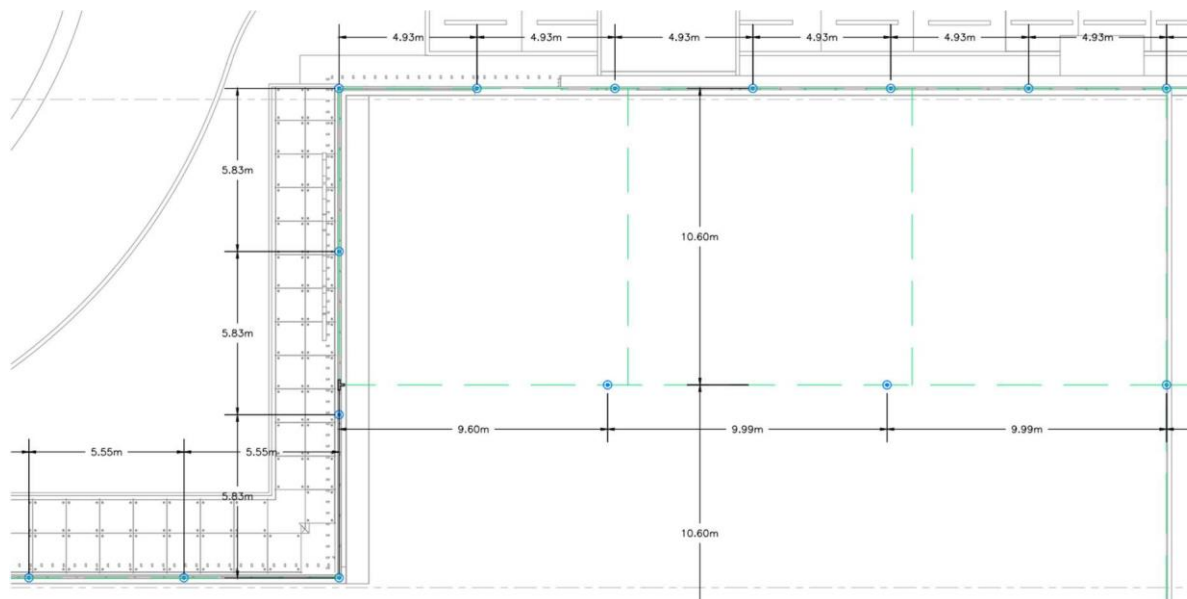
Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

**Figura 4.49 Distribución de terminales aéreas vista en planta y acotada.**



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

**Figura 4.50** Ampliación de distribución de terminales aéreas vista en planta y acotada.



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Como se mencionó al inicio de esta sección, el techo de esta estructura estará cubierto con TPO, un material común en este tipo de edificaciones. Para instalar las bases de las terminales aéreas, se debe utilizar un sellador adhesivo de poliuretano. Aunque la instalación del sistema no forma parte de este estudio, se recomienda este adhesivo para evitar perforaciones con tornillos que puedan causar filtraciones de humedad o agua en el interior de la estructura. Se podrán utilizar otras fijaciones al techo según sea requerido.

El parapeto de la edificación será de concreto, el cual también es frecuente en estas estructuras. Por lo tanto, se recomienda el uso de bases universales y pivotes para asegurar una colocación efectiva y con el ángulo correcto de las terminales aéreas.

Estas recomendaciones de instalación se mencionan para proporcionar al lector el comprender mejor el sistema, permitiéndole diseñar de manera eficaz y cumpliendo con la normativa. Las figuras 4.51, 4.52 y 4.53 muestran ejemplos de los elementos por utilizar. La figura 4.51 presenta la terminal aérea, comúnmente llamada *Punta Franklin*, la cual se recomienda que tenga una punta redondeada para evitar accidentes. La figura

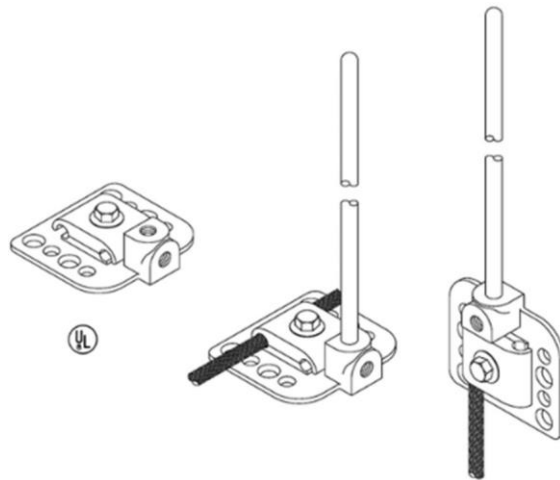
4.52 muestra una base universal que puede ser utilizada de manera vertical, como para la colocación de las terminales en el parapeto, o de manera horizontal para la instalación en el techo. Por otro lado, la figura 4.53 muestra un adaptador pivote, un elemento que permite al instalador ajustar el ángulo de la terminal según la pendiente del techo, lo que facilita una cobertura de protección más efectiva.

**Figura 4.51 Terminal aérea con punta redondeada.**



Tomada de Eproteca, (2024).

**Figura 4.52 Base universal para colocación vertical u horizontal**



Tomada de Eproteca, (2024).

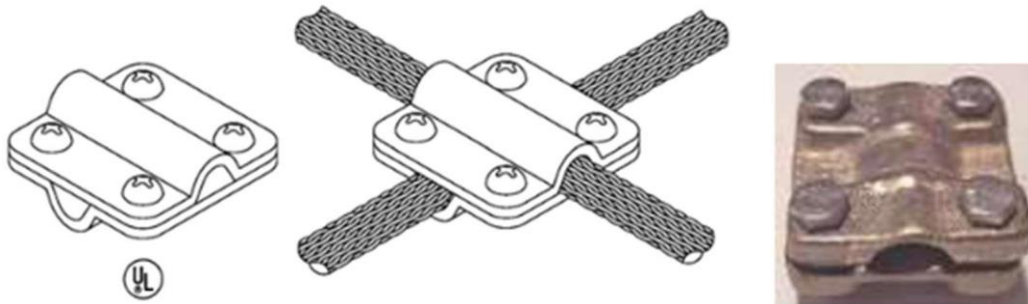
**Figura 4.53 Adaptador pivote para regular el ángulo de colocación de la terminal aérea**



Tomada de Eproteca, (2024).

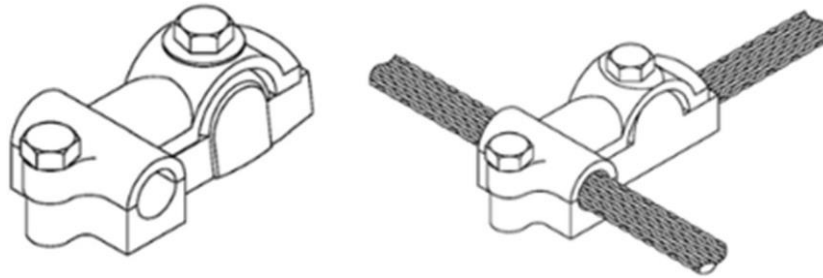
Otros elementos que el lector puede encontrar útiles para la comprensión de la normativa son los conectores en cruz, que se muestran en la figura 4.54, los conectores en “T”, que se ilustran en la figura 4.55, y los soportes adhesivos, que se pueden ver en la figura 4.56. Estos componentes proporcionan al lector una mayor claridad sobre la instalación de los elementos del sistema, lo que, a su vez, mejora su capacidad de análisis al momento de diseñar un sistema de protección contra descargas atmosféricas.

**Figura 4.54 Conector en cruz**



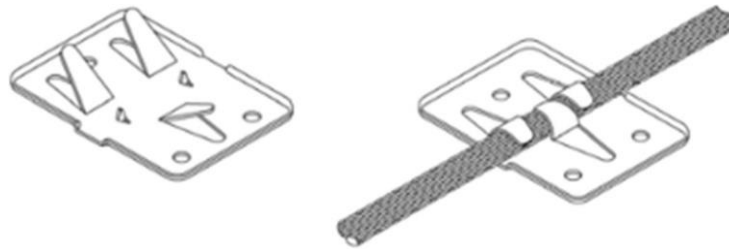
Tomada de Eproteca, (2024).

**Figura 4.55 Conector en “T”**



Tomada de Eproteca, (2024).

**Figura 4.56 Soporte adhesivo**



Tomada de Eproteca, (2024).

En el cuarto paso, y continuando con el ejemplo, se debe calcular la cantidad de bajantes que tendrá el sistema de protección contra descargas atmosféricas. Para ello, se define el perímetro de la nave industrial. En el caso de estudio, el perímetro de la estructura es de 341 m. Según la normativa, una estructura con un perímetro superior a 76 m no puede tener únicamente dos bajantes. Por lo tanto, el cálculo debe realizarse de manera que la distancia entre los bajantes no supere, en promedio, los 30 m o fracción.

Con base en lo anterior, se procede a realizar un cociente entre el perímetro de la nave y la distancia promedio máxima permitido de 30 m, lo que lleva a la siguiente ecuación:

$$\text{Cantidad de bajantes} = \frac{341}{30} = 11.36 \text{ bajantes}$$

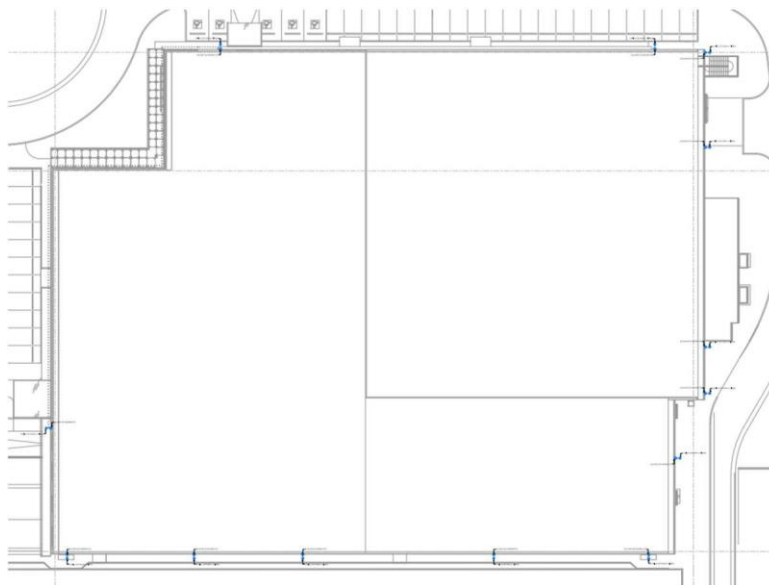
El resultado obtenido indica que se deben colocar al menos 12 bajantes alrededor de la nave para cumplir con el promedio de no más de 30 m entre bajantes. Al dividir los 341 m del perímetro de la nave entre los 12 bajantes, hay un promedio de 28.41 m entre ellos, cumpliendo así con la normativa.

Como se explicó en la sección anterior y tomando como referencia el ejemplo del artículo 4.9.9 de la normativa NFPA 780, *los bajantes pueden estar a más de 30 m entre ellos, siempre y cuando el promedio total no los exceda.*

La ubicación de estos elementos debe ser tal que estén distribuidos en todas las caras o fachadas de la estructura. La idea principal es que dichos elementos se ubiquen a distancias simétricas; sin embargo, debido a la variabilidad de las estructuras por elementos decorativos, salientes, ventanas, puertas, cuartos; la colocación debe realizarse con el mejor criterio posible y respetando la normativa.

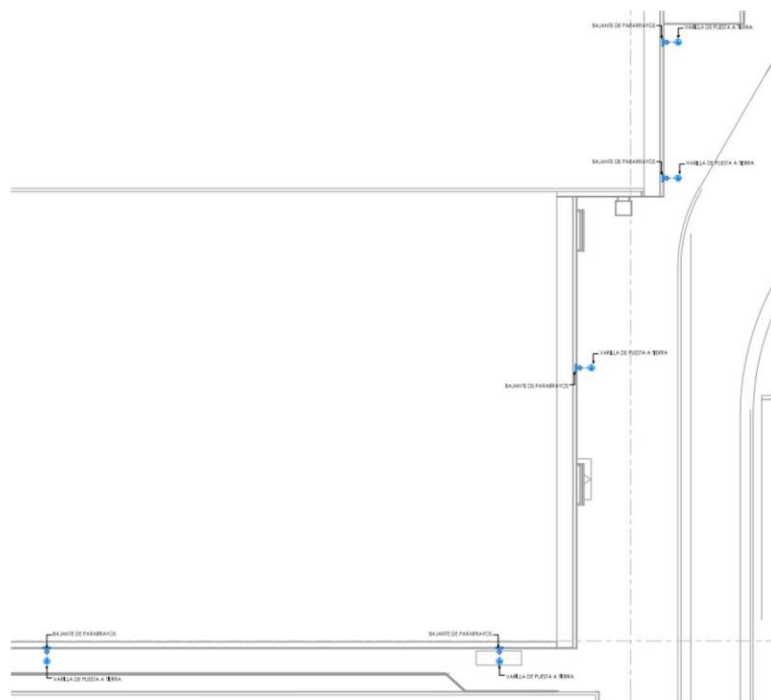
Para el ejemplo de esta investigación, los bajantes se ubican según la distribución mostrada en la figura 4.57 y su respectiva ampliación en la figura 4.58.

**Figura 4.57** Distribución de bajantes, vista en planta



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

**Figura 4.58 Distribución de bajantes, ampliación de vista en planta**

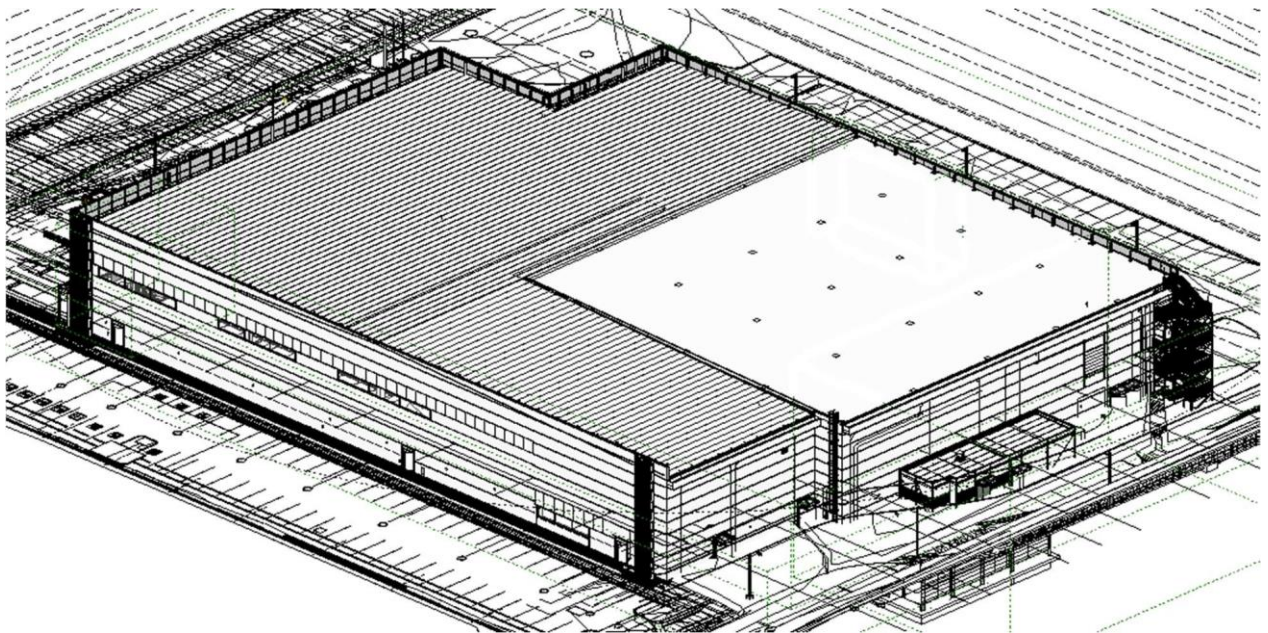


Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

La ubicación de estos elementos para el ejemplo de este trabajo toma en cuenta la localización de ventanas, elementos decorativos, aleros y demás elementos para la conciliación de los bajantes. Cada bajante debe contar con un protector de PVC para el cable de manera tal, que no puedan ser manipulados por personas sin conocimientos o que no sean del área de mantenimiento del local.

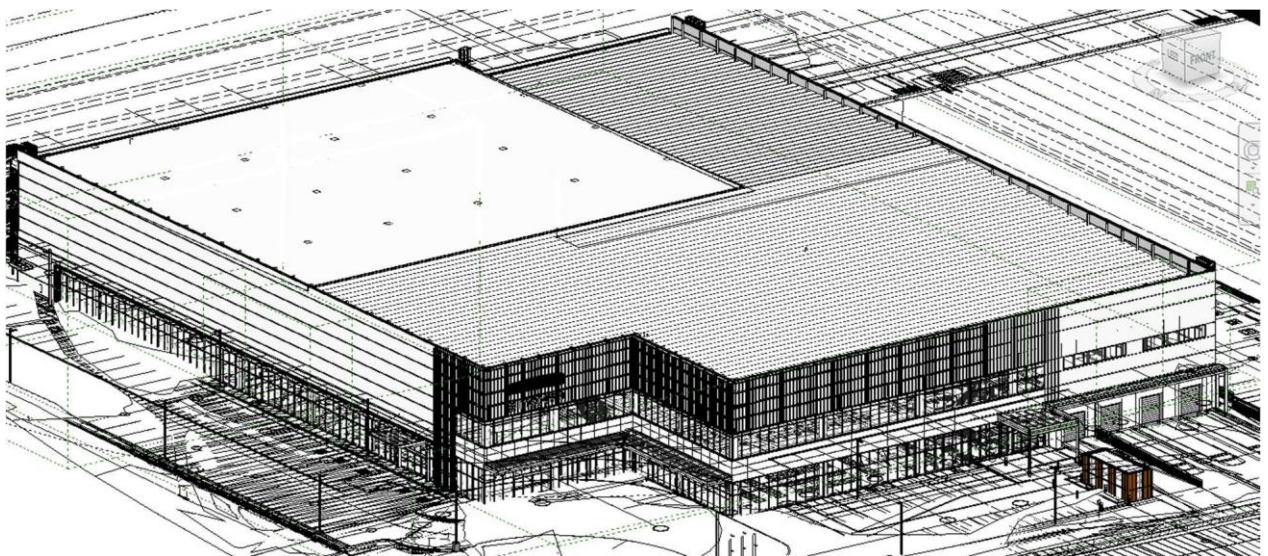
En la figura 4.59 y 4.60 se visualiza de manera esquemática la estructura de la nave industrial, esto con el fin de que el lector tenga una comprensión más clara del porqué de la ubicación de los bajantes en los sitios seleccionados.

**Figura 4.59** Ilustración esquemática de la nave industrial en 3D



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

**Figura 4.60** Ilustración esquemática de la nave industrial en 3D



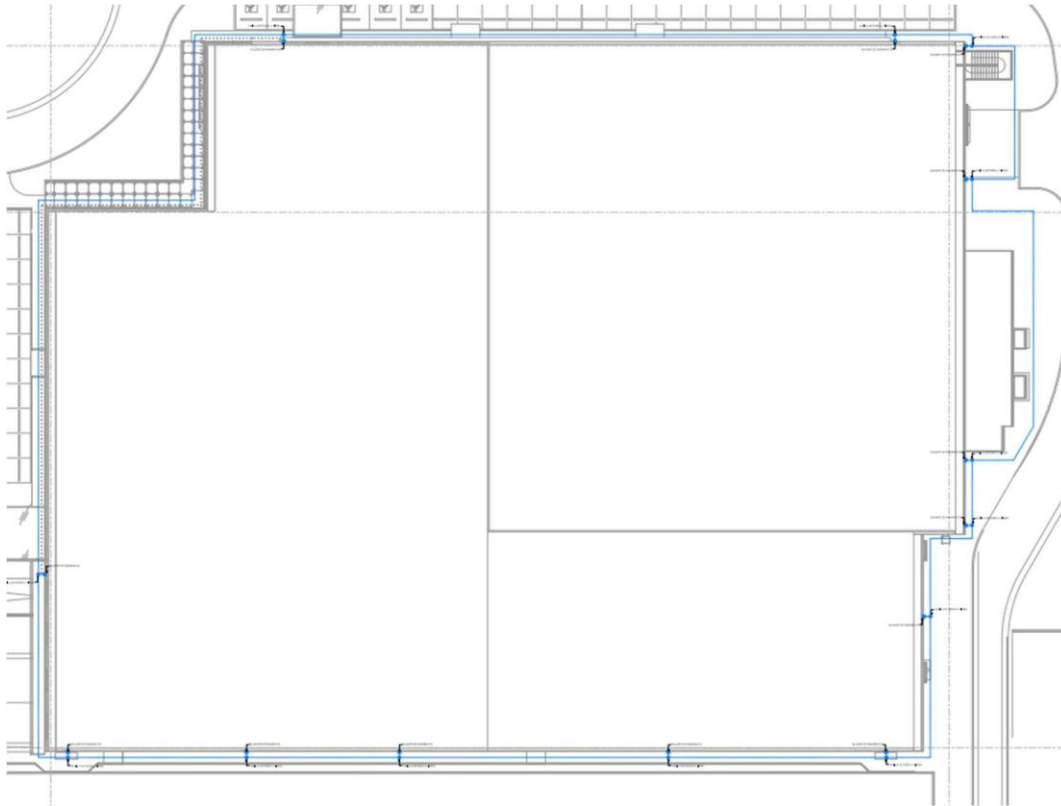
Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Como se muestra en las figuras presentadas anteriormente, la edificación que se toma como ejemplo, cuenta con diversos elementos de vidrio, cuartos y componentes arquitectónicos salientes. Debido a esto, se realiza la distribución de los bajantes considerando dichos factores. Para el caso de estudio, algunos de los bajantes tienen un distanciamiento menor a los 30 m, como lo requiere la norma, y en otros casos, el distanciamiento es mayor. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, el promedio de distancias entre los bajantes se respeta y sigue siendo menor a 30 metros.

El quinto paso se refiere a la colocación de electrodos de puesta a tierra, comúnmente conocidos como *varillas de tierra*. Estos electrodos deben instalarse en cada uno de los bajantes mencionados en el paso anterior. Adicionalmente, se debe colocar un desconectador entre el electrodo de puesta a tierra, el sistema de puesta a tierra y el sistema de pararrayos, con el fin de desacoplar el sistema para realizar mediciones pertinentes de resistividad.

Cada electrodo de puesta a tierra debe contar con un registro necesario para el mantenimiento y para la realización de las mediciones correspondientes. La ubicación de los electrodos de puesta a tierra se determina de manera que sean accesibles y registrables. Según el plano del caso de estudio, estos se ubican estratégicamente lo más cercano posible a los bajantes. En la figura 4.60 se puede observar la ubicación de dichos electrodos, y en la figura 4.61 se presenta una ampliación del mismo sector.

**Figura 4.61 Planta de distribución de electrodos de puesta a tierra y bajantes**

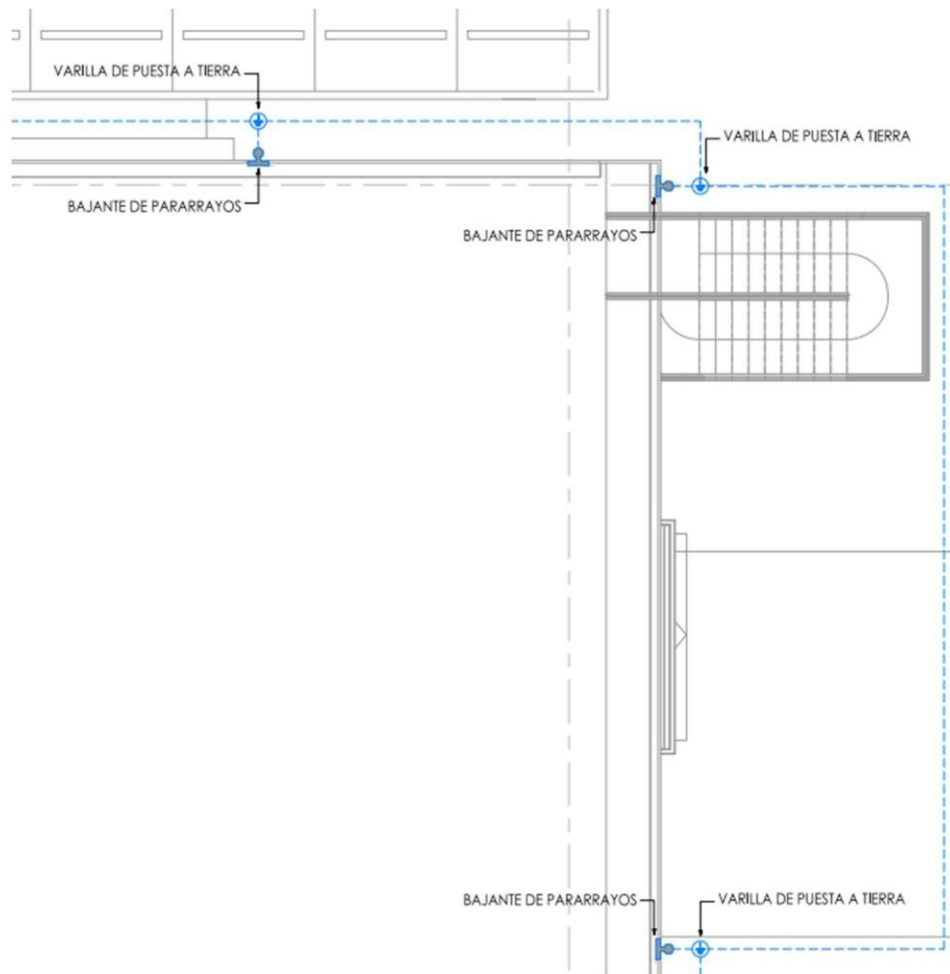


Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

Aunque no es el enfoque principal de este estudio, es importante resaltar que las naves industriales, debido a su gran tamaño, cuentan con un anillo perimetral de tierras. Este anillo conecta diversos puntos de la estructura, así como los sistemas de puesta a tierra del sistema eléctrico, como la malla principal de tierras, la malla del transformador eléctrico, el generador eléctrico y el sistema de telecomunicaciones.

El anillo perimetral permite la equipotencialidad en toda la estructura, facilitando así la reducción de la resistencia hacia el punto de tierra. Los bajantes de los pararrayos deben conectarse a este anillo perimetral.

**Figura 4.62 Ampliación de distribución de bajantes y registros de puesta a tierra**



Adaptada de planos de casa de arquitectura Garnier Arquitectos, (2024).

De acuerdo con los cálculos realizados en la sección 4.3.4, se determinó que la resistividad del suelo es sumamente baja para una malla de tierra estándar. Por lo tanto, el anillo equipotencial, junto con la cantidad de electrodos de puesta a tierra y una malla de tierras típica para el sistema, cumplen adecuadamente con los niveles de resistividad recomendados por normativas como la Comisión Electrotécnica Internacional 62305 (de ahora en adelante IEC 62305) y la normativa francesa de la serie C (de ahora en adelante NF C 17-102), los cuales son menores a  $10 \Omega m$ .

Se realizaron los cálculos de la sección 4.3.4, incorporando las nuevas condiciones de diseño. Ahora se consideran doce conductores adicionales de varilla a tierra, sumados a las cuatro varillas previamente contabilizadas en el ejercicio, así como el anillo perimetral de tierras.

Es importante señalar que, al momento de realizar este estudio, se desconocía la capacidad del transformador a ser utilizado y el consumo eléctrico potencial de esta nave industrial. Por lo tanto, se asumió un escenario en el cual se requiriera instalar el cableado de puesta a tierra con un calibre de 3/0 AWG, conforme con la tabla 250.66 del Código eléctrico nacional NFPA 70. El lector debe considerar que este es un ejemplo y validar los valores específicos según cada caso particular y conforme a la normativa vigente.

Utilizando los datos de resistividad eléctrica del estudio de suelos mencionado en la sección 4.3.4, que indican un valor crítico de  $40 \Omega \cdot m$ , se procedió a realizar los cálculos de resistencia, comenzando por la  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \ln \left( \frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{K_1 * L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

Sustituyendo los datos, se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_1 = \frac{40}{\pi * 378.64} \left[ \ln \left( \frac{2 * 378.64}{0.077} \right) + \frac{1.16 * 378.64}{\sqrt{7243}} - 4.75 \right]$$

$$R_1 = 0.32 \Omega$$

Para la  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi * n_R * L_R} * \left[ \ln \left( \frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 * L_R}{\sqrt{A}} * (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right]$$

$$R_2 = \frac{40}{2\pi * 16 * 2.44} * \left[ \ln \left( \frac{4 * 2.44}{0.0095} \right) - 1 + \frac{2 * 1.16 * 2.44}{\sqrt{7243}} * (\sqrt{16} - 1)^2 \right]$$

$$R_2 = 1.07 \Omega$$

Posterior a ello, se calcula la resistencia media  $R_m$ :

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \ln \left( \frac{2L_C}{L_R} \right) + \frac{K_1 * L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$R_m = \frac{40}{\pi * 378.64} \left[ \ln \left( \frac{2 * 378.64}{2.44} \right) + \frac{1.16 * 378.64}{\sqrt{7243}} - 4.75 + 1 \right]$$

$$R_m = 0.24 \Omega$$

Por último, la resistencia general  $R_g$ :

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

$$R_g = \frac{0.32 * 1.07 - 0.24^2}{0.32 + 1.07 - 2 * 0.24}$$

$$R_g = 0.32 \Omega$$

Como se tenía previsto, la resistencia general del sistema es sumamente baja, arrojando en este caso un valor de  $0.32 \Omega$ . Dado el ejercicio en la sección anterior, donde se consideraba una malla de tierras de 3 m de ancho por 3 m de largo, era de esperar que el resultado en este ejercicio, tomando en cuenta las varillas de puesta a tierra adicionales para cada bajante, así como el anillo perimetral indicado en la NFPA 780, y sumando todo esto al sistema ejemplificado; resultara en una resistencia extremadamente baja.

Como se indicó y de acuerdo con las recomendaciones de las normativas, contar con una resistencia menor a  $10 \Omega$  para un sistema de protección contra descargas atmosféricas

es ideal para disipar adecuadamente la descarga. En este caso y gracias a la baja resistividad del suelo, se supera con creces este valor.

El lector debe comprender que todos los terrenos poseen propiedades muy distintas entre sí, por lo que siempre es necesario solicitar el estudio de suelos que incluya su resistividad. Esto es fundamental para realizar los cálculos de manera precisa y no de forma aleatoria.

Como consideraciones adicionales respecto al ejemplo presentado en este caso de estudio, es importante aclarar que la nave industrial cuenta con tuberías metálicas para incendios, las cuales deben estar adecuadamente aterrizadas de manera equipotencial con el sistema. Las tuberías eléctricas que alimentan el transformador y el ingreso de energía al cuarto eléctrico dentro de la nave serán de PVC, por lo que no requieren consideraciones adicionales. Lo mismo aplica para las tuberías que facilitan el ingreso de los sistemas de telecomunicaciones.

Como paso final y adicional a la propuesta del sistema contra descargas atmosféricas, se realizó un presupuesto aproximado utilizando valores de referencia de distintos proveedores del mercado. A continuación, se presenta la siguiente tabla de costos aproximados, realizando la sumatoria de elementos como terminales aéreas, adaptadores tipo pivote, bases de montaje, conectores de cable, sellador adhesivo de poliuretano, tornillos, anclajes de expansión, conectores de cable en cruz y conectores de cable tipo T, varillas de tierra, soportes, cajas de registros de sistemas de puesta a tierra y cableado tanto de bajantes como del sistema de pararrayos:

**Tabla 4.3 Tabla de costos aproximados**

TABLA DE COSTOS APROXIMADOS			
DESCRIPCIÓN	PRECIO/U	CANTIDAD	PRECIOS
Punta Franklin 1/2 in x 24 in UL c/punta. PLP.	\$ 40.00	122	\$ 4880.00
Base Montaje Horizontal Punta Franklin 1/2 in	\$ 27.00	122	\$ 3294.00
Adaptador pivote bronce hembra/macho 3/8" UL.	\$ 25.00	52	\$ 1300.00
Conector Cable en T Bronce. IPC. 304.	\$ 25.00	101	\$ 2525.00
Sellador Adhesivo Poliuretano 3M 550 300 ml.	\$ 12.00	58	\$ 696.00
Tornillo Metal Cilindrico #12 X 3/4" Inoxidable.	\$ 0.43	1344	\$ 577.92
Expander Plástico S-7 (tornillo #12)	\$ 0.03	1344	\$ 40.32
Desconector recto de latón c/4 tornillos. PLP.	\$ 24.00	12	\$ 288.00
Protector PVC Cable Bajante. IPC. 349P	\$ 28.00	12	\$ 336.00
Abrazadera galvanizada 1.5mm (1 oreja) 3/4".	\$ 0.88	336	\$ 295.68
Cable cobre desnudo # 1/0 AWG 19 hilos, 53.48	\$ 10.31	367	\$ 3780.06
Conector Cable en cruz Bronce. IPC. 304.	\$ 34.00	31	\$ 1054.00
Soporte PoliPlastico p/Cable IP21 y IP40 6cm x	\$ 4.00	1450	\$ 5800.00
Caja de registro de inspección cilíndrica (6"x8")	\$ 12.00	12	\$ 144.00
Varilla Cooperweld de 19mm (3/4) x 3m UL 13	\$ 33.00	12	\$ 396.00
Cable trenzado de cobre desnudo 1/0 28 hilos	\$ 20.00	1247	\$ 24949.00
<b>SUBTOTAL</b>			<b>\$ 50355.98</b>
<b>IMPUESTO DE VENTAS</b>			<b>\$ 0.13</b>
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 56902.26</b>

Tomada de Eproteca, (2024).

#### 4.3.9 Análisis de resultados de la encuesta

En esta sección final del estudio, se procederá a un análisis de las encuestas aplicadas a distintos profesionales especializados en las ramas de ingeniería eléctrica e ingeniería electromecánica, con un enfoque en el diseño. Este apartado se centra en interpretar y discutir las respuestas obtenidas, proporcionando una visión integral sobre las opiniones y conocimientos de los expertos en relación con los temas abordados.

La encuesta ha sido cuidadosamente diseñada para captar las perspectivas de estos profesionales, quienes, por su experiencia y conocimiento en el campo, aportan valiosos comentarios que enriquecen el estudio. A continuación, se presenta un desglose de las preguntas y las respectivas respuestas obtenidas, lo cual permitirá identificar tendencias, patrones y posibles áreas de consenso o divergencia entre los participantes.

### **1. Desde su perspectiva ¿cuál es el propósito principal de la norma NFPA 780?**

Según las respuestas proporcionadas por los profesionales encuestados, el 80% de los participantes reconoce de manera clara que el objetivo principal de la normativa NFPA 780 es la salvaguarda de la vida humana. Este consenso mayoritario refleja una comprensión sólida de la finalidad esencial de la normativa, subrayando la importancia de proteger a las personas en situaciones de riesgo relacionadas con descargas atmosféricas.

Por otro lado, el 20% restante de los encuestados percibe la NFPA 780 más como una guía técnica orientada a asegurar que el diseño e instalación de sistemas de pararrayos se realice de manera correcta. Esta perspectiva destaca un enfoque más práctico y operativo de la normativa, donde la prioridad se centra en la correcta implementación técnica de los sistemas de protección.

Este resultado revela la percepción de la normativa entre los profesionales del campo, donde la mayoría prioriza el propósito de proteger la vida humana, lo cual es coherente con los principios de seguridad que rigen muchas normativas internacionales. También hay un grupo que enfoca la NFPA 780 desde un ángulo técnico, pone de manifiesto la importancia de la normativa como un recurso fundamental no solo para la seguridad, sino también para la precisión en el diseño e instalación de sistemas de protección contra descargas atmosféricas.

Esta diferencia de opiniones muestra la necesidad de una mayor claridad o énfasis en la comunicación de los objetivos de la normativa durante su implementación y capacitación en el sector, para asegurar que todos los profesionales involucrados comprendan tanto la importancia de la protección de vidas como la necesidad de una ejecución técnica rigurosa.

**2. Si usted ha diseñado sistemas de protección contra descargas atmosféricas siguiendo la normativa NFPA 780, ¿podría señalar qué obstáculos o dificultades ha encontrado?**

Los profesionales encuestados identifican varios desafíos en la aplicación de la NFPA 780:

- a) Falta de actualización: La ausencia de actualizaciones regulares limita la disponibilidad de material complementario y las herramientas más recientes.
- b) Complejidad del documento: La extensión y tecnicismo de la NFPA 780 permiten interpretaciones diversas, creando incertidumbre en su aplicación.
- c) Coexistencia de normativas locales: La mezcla de diferentes normativas locales puede complicar la aplicación uniforme de la NFPA 780.
- d) Costos elevados: Los altos costos de los materiales necesarios pueden ser una barrera para algunos proyectos.
- e) Requerimientos del cliente: Las demandas específicas de los clientes pueden no coincidir con las directrices de la NFPA 780, generando desafíos adicionales.
- f) Selección del método adecuado: Elegir el método correcto para cumplir con la normativa puede ser difícil debido a la variedad de enfoques disponibles.
- g) Cantidad de aguas en los techos: La cantidad de aguas afecta el diseño del sistema, complicando la colocación de terminales captadoras.

Los principales desafíos incluyen la falta de actualizaciones y la complejidad de la normativa, que podrían mejorarse con simplificación y modernización. La coexistencia de normativas locales y los costos elevados de los dispositivos y equipos a instalar destacan la necesidad de armonización y viabilidad económica. Las demandas específicas del cliente, lo complejo en la selección de métodos y en la gestión de aguas en los techos, resaltan la importancia de una planificación detallada y experta.

**3. En el diseño de sistemas de protección contra descargas atmosféricas, ¿considera que la norma NFPA780 es suficientemente clara, o podría dar pie a interpretaciones diferentes?**

Según los participantes:

- a) 40% considera que, aunque la normativa es generalmente clara, permite interpretaciones variables según el criterio de cada profesional, lo que podría generar inconsistencias en su aplicación.
- b) 40% cree que la normativa no es lo suficientemente clara y sugiere actualizaciones para mejorar su comprensión y aplicación.
- c) 20% opina que la normativa es clara, pero que debe complementarse con otras normativas para evitar posibles interpretaciones erróneas.

Aunque la mayoría de los profesionales reconoce la claridad general de la NFPA 780, existen preocupaciones sobre su variedad interpretativa y la necesidad de que sea actualizada. La percepción de ambigüedad sugiere la importancia de una revisión para estandarizar las directrices y mejorar su aplicación. También se destaca la necesidad de integrar otras normativas para garantizar una implementación precisa y uniforme.

**4. De acuerdo con su experiencia, ¿podría mencionar algunas de las consideraciones que deben tenerse en cuenta al diseñar un sistema de protección contra descargas atmosféricas?**

Según los profesionales encuestados, las principales consideraciones al diseñar un sistema de protección son:

- a) Nivel de riesgo a proteger: Determina la extensión y rigor del sistema de protección.

- b) Tipo de estructura u ocupación: La altura, forma, materiales y uso de la estructura influyen en el diseño del sistema.
- c) Criticidad del servicio eléctrico: La importancia de mantener el servicio eléctrico continuo impacta en las medidas de protección requeridas.
- d) Densidad de rayos y ubicación: La frecuencia de rayos y la ubicación geográfica afectan el diseño, exigiendo soluciones específicas para áreas con alta actividad eléctrica.
- e) Estructuras adyacentes: La proximidad y altura de estructuras cercanas deben ser consideradas para evitar interferencias y optimizar la protección.
- f) Métodos de cálculo: La elección adecuada de métodos de cálculo es esencial para cumplir con los requisitos normativos.
- g) Resistividad del suelo y puesta a tierra: Estos factores afectan la eficiencia del sistema en la disipación de energía.
- h) Distribución de los bajantes: Asegura la efectividad del sistema y minimiza el impacto estético y riesgos para las personas.

Estas consideraciones aseguran un diseño efectivo del sistema de protección, adaptado a las condiciones específicas del entorno y la estructura. Evaluar el nivel de riesgo, la estructura y la ubicación, es fundamental para garantizar la seguridad y funcionalidad del sistema, mientras que la atención a la estética y la correcta distribución de los bajantes equilibran eficiencia y aspecto visual.

5. ¿Qué medidas de seguridad deberían seguirse durante la instalación y mantenimiento de sistemas de protección contra descargas atmosféricas?

De acuerdo con los encuestados, entre los aspectos clave para una instalación segura de sistemas de protección contra descargas atmosféricas, se pueden mencionar como principales puntos:

- a) Programar en condiciones seguras: Realizar la instalación cuando no haya riesgo de tormentas, para evitar descargas eléctricas.

- b) Personal calificado: Asegurar que el equipo de instalación esté capacitado y experimentado.
- c) Verificar el estado del sistema: Confirmar que el sistema esté desenergizado antes de iniciar la instalación.
- d) Uso de equipo de protección personal (EPP): Emplear guantes aislantes, cascos y gafas de seguridad durante la instalación.
- e) Inspeccionar conexiones: Asegurar que las conexiones estén libres de óxido y sean firmes.
- f) Evitar pintura en componentes: No aplicar pintura en los elementos del sistema para prevenir la oxidación.

Estos aspectos aseguran una instalación segura y efectiva del sistema de protección, destacando la importancia de condiciones adecuadas, personal capacitado y el uso de equipo de protección. La verificación del estado del sistema y la inspección de conexiones son esenciales para la funcionalidad y durabilidad del sistema, mientras que evitar la pintura previene daños.

6. ¿Qué pruebas deberían realizarse para verificar la eficacia de un sistema de protección contra descargas atmosféricas?

Según las respuestas facilitadas:

- a. 60% de los encuestados coinciden en que se debe validar el sistema pararrayos mediante pruebas de continuidad para asegurar su correcta conexión y funcionamiento.
- b. 40% no mencionaron pruebas de continuidad, pero sugirieron otros métodos, incluyendo:
  - i. Inspecciones visuales para detectar daños visibles.
  - ii. Verificación de materiales instalados para asegurar el cumplimiento de especificaciones.
  - iii. Medición de puesta a tierra para confirmar el cumplimiento de los estándares de resistencia.

- iv. Monitoreo de contadores de eventos para registrar descargas y evaluar el desempeño.

La mayoría de los profesionales considera crucial la prueba de continuidad para la validación del sistema pararrayos. Sin embargo, otros métodos complementarios también son utilizados para garantizar la efectividad y seguridad del sistema.

**7. ¿Cuáles considera que son los principales errores que se cometen en el diseño de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas?**

Los profesionales identifican los siguientes errores frecuentes en el diseño de sistemas de protección contra descargas atmosféricas:

- a) Selección inadecuada del nivel de riesgo y del sistema de protección.
- b) Cobertura insuficiente del área a proteger.
- c) Combinación incorrecta de normativas (NFPA 780 y NF C).
- d) Uso de tecnologías no validadas por normativas.
- e) Deficiencias en el sistema de puesta a tierra, como resistencia incorrecta.
- f) Aplicación incorrecta de los métodos descritos en la NFPA 780.
- g) Desconsideración de la normativa en el diseño.

Los errores más comunes incluyen selección inadecuada de riesgos y sistemas, cobertura insuficiente, y problemas con normativas y puesta a tierra. Estos errores subrayan la importancia de seguirlas y aplicar correctamente los métodos para asegurar la efectividad del sistema.

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

A continuación, se detallan las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas en el desarrollo del presente estudio.

## **Conclusiones**

- El estudio evidenció que los artículos de la normativa NFPA 780 admiten diversas interpretaciones, esto gracias a las entrevistas realizadas donde se muestran diferentes criterios entre profesionales respecto a los diferentes artículos.
- Se observó que los radios de cobertura para las puntas captadoras varían según el método utilizado, como el método de la esfera rodante y el método de mallas los cuales en la investigación se evidenció que siguiendo las pautas del método de mallas cumplíamos, no obstante, al realizar el cálculo con el método de la esfera rodante se visualizó que la esfera colisionaba la estructura dando como resultado el no cumplimiento del método.
- Se destaca la importancia de utilizar plataformas o software como AutoCAD o Revit para modelar el sistema de pararrayos en detalle. Esto facilita la determinación precisa de las distancias entre elementos y la ubicación óptima de los componentes, ventaja que se obtiene sobre otros métodos como el dibujo a mano alzada o cálculos matemáticos, de manera que se optimiza el diseño y la eficacia del sistema.
- El estudio confirma la robustez del sistema de pararrayos y la suficiencia de la distribución de elementos propuesta por la normativa NFPA 780 para proteger adecuadamente la estructura, esto se evidencia gracias a la cantidad de terminales captadoras y los múltiples bajantes para realizar la descarga hacia tierra de manera efectiva, esto como ventaja sobre otros sistemas que cuentan con una única punta captadora y dos únicos bajantes por sistema de pararrayos.
- Se observa que, a mayor altura de las puntas captadoras, se requiere un menor número de terminales. Esto se debe a que la cobertura de la esfera rodante se mantiene más alejada del techo, reduciendo la necesidad de terminales adicionales y optimizando el costo del sistema.
- El estudio de resistividad del suelo es esencial para asegurar que los niveles de resistencia en la malla de puesta a tierra cumplan con los estándares vigentes.

- Las entrevistas realizadas revelaron que la normativa NFPA 780 no recibe actualizaciones frecuentes, lo que puede generar vacíos de información o interpretaciones erróneas.
- Se concluyó que es necesario actualizar la normativa NFPA 780 con ejemplos de diseño y cálculo, como se realiza en otras normativas de la NFPA esto con el fin de brindar mayor claridad a los lectores de la normativa sobre cómo debe interpretarse los métodos de cálculo y los artículos.

## **Recomendaciones**

- Iniciar el análisis siguiendo el procedimiento descrito en este estudio, comenzando con la definición de las alturas de la estructura.
- La identificación del tipo de techo de la estructura es fundamental para la ejecución del diseño.
- La validación de la geometría y dimensiones de la estructura es esencial para determinar las alturas óptimas de las puntas captadoras, asegurando así un diseño eficiente del sistema.
- Para prevenir accidentes laborales, se recomienda especificar puntas captadoras con extremos redondeados.
- Es importante evitar la colocación de bajantes cerca de tuberías y ventanas metálicas para evitar la necesidad de conectores adicionales, y para reducir costos del sistema.
- Se recomienda validar los materiales por utilizar, así como su calibre y certificación, para evitar la corrosión del sistema y gastos innecesarios.
- La normativa NFPA 780 permite el uso de uno o varios métodos de cálculo de manera complementaria. Se recomienda realizar el análisis utilizando tanto el método de mallas como el método de la esfera rodante para obtener una evaluación completa y precisa del sistema.
- Si los conductores penden más de 90 cm en alguna sección de la estructura, se recomienda identificar estos puntos y proporcionar soporte mecánico adecuado. Esto evitará que los conductores se comben o se dañen.

- Es fundamental revisar el sistema de tierras propuesto para la estructura, asegurando la compatibilidad de calibres y materiales de conductores entre sistemas para evitar problemas de conexión.
- Es esencial el uso de adhesivo de poliuretano para techos donde se implementen sistemas tipo TPO para evitar filtraciones y humedad.
- Se recomienda una ubicación cuidadosa de los bajantes para evitar interferencias con elementos metálicos, ventanas o elementos decorativos de la estructura. La planificación adecuada de la ubicación de los bajantes garantiza la integridad estética y funcional de la estructura.
- Es muy importante revisar el presupuesto del proyecto antes de proponer un sistema de pararrayos basado en la NFPA 780 dado que el mismo supera los montos de costos, comparados con otros sistemas y otras normativas. Dicho lo anterior, se debe validar con el cliente los costos asociados para tener claridad en la inversión.

## REFERENCIAS

Aplicaciones Tecnológicas. (2023). *Cómo se forman los rayos: qué dice la ciencia*.  
<https://acortar.link/pTgwQk>

Acopi Bogotá Cundinamarca. (2019). *Tamaño de empresa ya no se medirá por números de empleados*. <https://shre.ink/DYy0>

Brenes, D. (2019). *Rediseño eléctrico del sistema de potencia y emergencia del edificio la Colmena, San José, Costa Rica* [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://shre.ink/8rvT>

Bomberos Costa Rica. (2013). *Manual de disposiciones técnicas generales sobre seguridad humana y protección contra incendios*. <https://acortar.link/XqZTD4>

Bomberos de Costa Rica. (2023). *Reglamento Nacional de Protección Contra Incendios*.  
<https://shre.ink/DYis>

Electro Persa. (2022). *Cable para Pararrayos*. <https://feji.us/qhfbda>

Cenergía. (2021). *Pararrayos Franklin*. <https://feji.us/zbth2>

Corpelima. (2023). *Contador de Rayos Ionicount*. <https://feji.us/vh7uql>

DesignsCad. (2016). *Lightning Arrester – Details DWG Detail for AutoCAD*.  
<https://feji.us/uijt02>

Donaire, A. y Gago, M. (2018). *Diseño de un sistema de protección de descarga atmosférica y sobre tensiones para un edificio de apartamentos* [Tesis de licenciatura en ingeniería, Universidad Nacional de Ingeniería].  
<https://shre.ink/Du3G>

Dos Santos, M. (2022). *Cotización Pararrayos*. <https://shre.ink/DYij>

EMC. (s.f.) *Pararrayos*. <https://feji.us/v0xsgt>

Eproteca. (2024). *Protección preventiva contra las descargas atmosféricas “rayos”*.  
<https://shre.ink/re6L>

Fidalgo, C. (2014). *Diseño de una hija de cálculo para el estudio de instalaciones eléctricas* [Tesis de licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica]. <https://shre.ink/8rvl>

GAL Electric. (2020). *Diferencias entre pararrayos Franklin y pararrayos con dispositivo de cebado (PDC)*. <https://shre.ink/re4s>

Infobae. (2024). *Qué es graupel que podría caer en Buenos Aires el fin de semana y cuál es la diferencia con la nieve*. <https://feji.us/olgy6h>

- Instituto Costarricense de Electricidad. (2020). *Costa Rica registra 500.000 rayos caídos en 2020*. <http://surl.li/knyvvz>
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (2024). *Tormentas*. <https://shre.ink/re0l>
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (2024) *Tormentas Eléctricas*. <https://shre.ink/re4A>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (2005). *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment*. <https://shre.ink/DYyh>
- Juárez, L. (2006). *Introducción y aplicación de un sistema de protección electro-atmosférico tipo pararrayos ionizante Franklin France®*, como el instrumento utilizado para dominar las pérdidas humanas y monetarias ocasionadas por el rayo de la industria [Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://shre.ink/re6k>
- Kaulfus, A. (s.f.). *Using ArcGIS to Convert LIS Very High-Resolution Gridded Lightning Climatology NetCDF Data to GeoTIFF Format*. <https://acortar.link/jvtaVo>
- Kinderson, R. (2017). *Diseño del sistema de seguridad electrónica, sistema de puesta a tierra, pararrayos y su alimentación eléctrica autosustentable para las radio bases de telefonía celular en zonas remotas y conflictivas del Instituto Costarricense de Electricidad* [Tesis de Licenciatura, Universidad Latina de Costa Rica]. <https://shre.ink/re6J>
- López, L. (2020). *Sistema Integral Contra Descargas Atmosféricas-SICDA*. <https://shre.ink/re6K>
- López, L. (2014). *NFPA® 780 Norma para la Instalación de Sistemas de Protección contra Rayos*.
- Mena, B. (2017). *Informe de Práctica de Especialidad para optar por el Título Ingeniero en Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura* [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://shre.ink/re0D>
- Montoya, M. (2019). *Evaluación del riesgo por descargas atmosféricas en espacios deportivos de la Universidad Tecnológica de Pereira* [Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://shre.ink/re44>
- Morgan, J. (s.f.). *Installing & Disconnecting Lightning Protection*. <https://feji.us/rd5uk4>

- Prosegsa. (s.f.). *7 consecuencias de un mal sistema de puesta a tierra*.  
<https://acortar.link/60tiT7>
- Rodríguez, A. (2008). *Pararrayos, su función y posibilidades*. <https://acortar.link/u01GEo>
- Salazar, J. (2018). *Diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas para el Polideportivo y Pabellon 'S' de la U.C.S.M.* [Tesis de Licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. <https://shre.ink/8rvd>
- Sánchez, M. (2007). *Boletín Meteorológico*. <https://shre.ink/8lcE>
- Sistema Costarricense de Información Judicial. (2024). *Artículos 151. Pararrayos*.  
<https://acortar.link/tAeG8v>
- Sistema Costarricense de Información Judicial. (2024). *Reglamento nacional de protección contra incendios Cuerpo de Bomberos de Costa Rica*  
<https://shre.ink/DYiM>
- Sura. (2024). *Seguros, tendencias y riesgo*. <https://shre.ink/8rvj>
- Team Proeléctrica. (s.f.). *¿Qué tan importante es la puesta a tierra?*.  
<https://shre.ink/DYyR>
- Tesercom Comunicaciones. (s.f.). *Conector tipo T de latón para diámetro 50-70 mm<sup>2</sup> cable*. <https://shre.ink/8rvk>
- Torrez, G. (2020) *Descargas Atmosféricas. Best Practices Electrical Engineering*.  
<https://feji.us/s6rsly>
- Universidad Latina de Costa Rica. (2015). *Repositorio Institucional*. <https://shre.ink/8rv5>
- Valverde, M. (2023). *Estudio de Resistividad*.
- Valverde, M., Macías, A y Galbiatti, E. (2014). *Código Eléctrico Nacional Edición 2014*.
- Verdugo, K. (2017). *Contribución para la implementación de una red de detección de rayos en Ecuador* [Tesis de Maestría, Escola Superior de Tecnología e Gestao].  
<https://shre.ink/re6M>

## **APÉNDICES Y ANEXOS**

## APÉNDICE 1:

Se llevó a cabo una encuesta dirigida a varios profesionales especializados en el campo de la ingeniería eléctrica. Estos profesionales están estrechamente relacionados con el proceso de diseño de planos y poseen conocimientos técnicos avanzados sobre sistemas de pararrayos. La finalidad de la encuesta fue recopilar información relevante y obtener diversas perspectivas sobre la implementación de la normativa NFPA 780 en el país.

Encuesta:

1. Desde su perspectiva ¿cuál es el propósito principal de la norma NFPA780?
2. Si usted ha diseñado sistemas de protección contra descargas atmosféricas siguiendo la normativa NFPA 780, ¿podría señalar qué obstáculos o dificultades ha encontrado?
3. En el diseño de sistemas de protección contra descargas atmosféricas, ¿considera que la norma NFPA780 es suficientemente clara, o podría dar pie a interpretaciones diferentes?
4. De acuerdo con su experiencia, ¿podría mencionar algunas de las consideraciones que deben tenerse en cuenta al diseñar un sistema de protección contra descargas atmosféricas?
5. ¿Qué medidas de seguridad deberían seguirse durante la instalación y mantenimiento de sistemas de protección contra descargas atmosféricas?
6. ¿Qué pruebas deberían realizarse para verificar la eficacia de un sistema de protección contra descargas atmosféricas?
7. ¿Cuáles considera son los principales errores que se cometen en el diseño de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas?

Las respuestas de los profesionales fueron las siguientes:

Ingeniero A - Ingeniero Electromecánico

1. El propósito principal es la protección de la vida humana, secundario la protección de sistemas y protección de estructuras de los peligros generados por las descargas atmosféricas.
2. Obstáculos, no existen guías más actualizadas, la norma desde sus primeras versiones ha cambiado muy poco y no ha generado más material complementario.
3. La norma podría complementarse con anexos de ejemplos de diseño.
4. Consideraciones:
  - a. Nivel de riesgo a proteger.
  - b. Tipo de estructura u ocupación.
  - c. Criticidad de la continuidad de servicio del sistema eléctrico.
  - d. Densidad de rayos en el área.
  - e. Estructuras adyacentes.
5. Labores de instalación deben realizarse donde no exista riesgo de tormenta, o donde por medio de sistemas de detección de tormenta se garantice labores de trabajo seguras. Mantenimiento, las recomendadas por la norma y el fabricante. El sistema debería ser inspeccionado posterior a la evidencia de una descarga o en su caso al menos una vez al año.
6. Verificar los materiales instalados, continuidad de los conductores de bajada y puntas captadoras, mediciones de la puesta a tierra para garantizar el camino de menos impedancia a tierra.
7. No se selecciona el nivel de riesgo correcto ni el tipo de sistema, falta más información pública de la densidad de descargas por zona en el país, no se selecciona el sistema con la cobertura adecuada, se da la combinación de sistemas que no cumplen en su totalidad con NFPA 780 ni con NFC y existe desinformación de sistemas con tecnologías propias no validadas por una normativa.

## Ingeniero B - Ingeniero Electromecánico

1. Propósito principal de la norma NFPA 780. El propósito principal de la norma NFPA 780 es establecer los requisitos mínimos para la instalación de sistemas de protección contra descargas atmosféricas (SPDA) con el fin de proteger a las personas y propiedades de los peligros asociados a los rayos. La norma busca:
  - a. Prevenir incendios y explosiones: Los rayos pueden provocar incendios al encender materiales combustibles o generar chispas que inicien un fuego. El SPDA desvía la corriente del rayo a tierra, evitando que pase por la estructura y cause daños.
  - b. Proteger vidas: Los rayos pueden ser mortales para las personas que se encuentran cerca o dentro de una estructura alcanzada por un rayo. El SPDA crea un camino seguro para la corriente del rayo, alejándola de las personas.
  - c. Proteger equipos electrónicos: Los rayos pueden dañar o destruir equipos electrónicos sensibles, causando pérdidas económicas significativas. El SPDA ayuda a proteger estos equipos al desviar la corriente del rayo a tierra.
2. Obstáculos o dificultades encontrados al diseñar sistemas de protección contra descargas atmosféricas siguiendo la normativa NFPA 780. Los profesionales que diseñan sistemas de protección contra descargas atmosféricas según la norma NFPA 780 pueden encontrar algunos obstáculos o dificultades, como:
  - a. Complejidad de la norma: La norma NFPA 780 es un documento extenso y técnico que requiere un conocimiento profundo de los principios de protección contra rayos y las características de las instalaciones.
  - b. Interpretación de requisitos: Algunos aspectos de la norma pueden ser abiertos a interpretación, lo que puede generar dudas en el diseño del sistema.
  - c. Consideraciones del sitio: Cada sitio tiene características únicas que deben considerarse al diseñar el SPDA, como la altura de la estructura, el tipo de construcción, el entorno circundante y la presencia de otros elementos.

- d. Coordinación con otras disciplinas: El diseño del SPDA debe coordinarse con otras disciplinas, como la arquitectura, la ingeniería eléctrica y la construcción, para garantizar una instalación adecuada y segura.
3. Claridad y ambigüedad de la norma NFPA 780. En general, la norma NFPA 780 se considera un documento claro y completo que proporciona una guía adecuada para el diseño de sistemas de protección contra descargas atmosféricas. Sin embargo, algunos aspectos de la norma pueden ser abiertos a interpretación, lo que puede generar dudas en el diseño del sistema. Es importante que los diseñadores tengan un conocimiento profundo de la norma y consideren las características específicas del sitio para garantizar un diseño adecuado.
  4. Consideraciones para el diseño de un sistema de protección contra descargas atmosféricas. Al diseñar un sistema de protección contra descargas atmosféricas según la norma NFPA 780, es fundamental considerar varios aspectos, como:
    - a. Tipo de estructura: La altura, la forma y el material de la estructura influyen en el diseño del SPDA.
    - b. Uso de la estructura: El tipo de ocupación y las actividades que se realizan en la estructura pueden afectar los requisitos de protección.
    - c. Entorno circundante: La presencia de otros edificios altos, árboles o líneas eléctricas puede influir en la ubicación de los componentes del SPDA.
    - d. Materiales del SPDA: Los materiales utilizados para los componentes del SPDA deben ser resistentes a la corrosión y tener la capacidad de conducir la corriente del rayo de manera segura.
    - e. Conexión a tierra: El sistema de tierra del SPDA debe ser adecuado para disipar la corriente del rayo de manera segura en el suelo.
  5. Medidas de seguridad durante la instalación y mantenimiento de sistemas de protección contra descargas atmosféricas. La instalación y el mantenimiento de sistemas de protección contra descargas atmosféricas deben realizarse por personal calificado y siguiendo las normas de seguridad adecuadas. Algunas medidas de seguridad importantes incluyen:
    - a. Desenergización de la estructura: Antes de trabajar en el SPDA, la estructura debe estar desenergizada para evitar riesgos eléctricos.

- b. Uso de equipos de protección personal: Los trabajadores deben utilizar equipos de protección personal adecuados, como guantes aislantes, casco y gafas de seguridad.
  - c. Señalización del área de trabajo: El área de trabajo debe estar señalizada adecuadamente para evitar el acceso de personas no autorizadas.
  - d. Inspección y mantenimiento regulares: El SPDA debe inspeccionarse y mantenerse regularmente para garantizar su correcto funcionamiento.
6. Pruebas para verificar la eficacia de un sistema de protección contra descargas atmosféricas. Existen diferentes pruebas que pueden realizarse para verificar la eficacia de un sistema de protección contra descargas atmosféricas, como:
- a. Inspección visual: Se realiza una revisión visual de los componentes del SPDA para detectar daños o corrosión.
7. No se obtuvo respuesta.

#### Ingeniero C - Ingeniero Electromecánico

- 1- La NFPA 780 busca salvaguardar la vida humana y protección física de elementos.
- 2- Correcto, normativas locales, costos de materiales, requerimientos de clientes, información accesible de incidencias en regiones, cambios en geometrías de edificios, necesidades de clientes.
- 3- En algunos casos no es clara y da pie a interpretaciones.
- 4- Ubicación geográfica del proyecto, restricciones del entorno, necesidad del cliente final.
- 5- No se obtuvo respuesta.
- 6- Incluir contadores de eventos, monitoreo de contadores de eventos, mediciones de resistividad, estado de sistema de tierras.
- 7- Puntos de instalación de dispositivo según el inmueble a ser instalado, resistividad necesaria según tipo de inmueble, aterrizamiento de elementos cercado al sistema de pararrayos, registros de tierras, otros.

## Ingeniero D - Ingeniero Electromecánico

1. Me parece que el propósito de la NFPA 780 es poder definir cuáles son las reglas para poder implementar de forma adecuada un sistema de pararrayos.
2. No he diseñado ningún sistema de protección basado en la NFPA 780 pero de lo que he podido ver, el principal obstáculo o dificultad sería poder definir cual método usar y cuando uno define el método como aplicarlo de forma correcta.
3. Si es clara pero tal vez por desconocimiento de como leerla ahí es donde uno se puede perder, si uno sabe específicamente que buscar si es clara en cuales son los requisitos.
4. Consideraciones sería para mí de primero definir el tipo de método que se va a usar, saber el alto de las puntas que se van a tener, si se va a usar la esfera rodante saber el alto de los mástiles, la cantidad de bajantes y el tipo de edificación que estamos protegiendo.
5. A nivel de protección puede ser, usar el equipo adecuado, guantes, no hacerlo un día que esté con lluvia, poder desconectar los bajantes para poder dar mantenimiento a las tierras y básicamente.
6. Creo que las pruebas deberían ser, una prueba de continuidad del anillo que está en el techo y de los bajantes y la otra puede ser de puesta a tierra, medir ohnmeaje.
7. No definir o no aplicar correctamente la NFPA 780, porque tal vez uno se va por un método que no es el adecuado que al final se convierte en un error porque es mucho más costoso para el cliente una instalación más robusta que tal vez no era necesaria, o si se aplica correctamente el método tal vez se define mal el tipo de techo, la cantidad de bajantes, etc. Entonces tal vez el principal error podría ser aplicar mal la normativa.

## Ingeniero E - Ingeniero Electromecánico

1. Propósito principal de la norma NFPA 780 sería la protección de la vida humana, de los inmuebles y los contenidos de esos inmuebles, por eso hay una parte al final que se dedica a evaluar si es histórico, si hay cuidados de la salud, antigüedades etc. Y eso le da puntos para que finalmente diga que, si debe existir un sistema atmosférico, es una evaluación que se hace.
2. En el diseño si he encontrado obstáculos, por ejemplo, cuando los techos tienen muchas aguas entonces el sistema se complica a nivel de cableado porque hay que poner muchas varillas, cuando tenemos objetos muy altos cercanos al edificio a donde se va a proteger también porque entonces hay que proteger ese objeto o cuando tenemos árboles cercanos porque los árboles también estarían atrayendo los rayos. Los costos son mucho más caros con la NFPA 780 por tanto cable de cobre que con la norma IEC-62305, en los bajantes, como los bajantes son cada cierta distancia entonces no siempre existe esa disponibilidad para bajarlos por edificios sobre todo existentes, entonces en edificios existentes es todo un reto por donde los bajo para que finalmente no queden cerca de personas que puedan pasar y electrocutarse cuando hay una descarga.
3. La norma es bastante clara, da pautas de diseño, da pautas de instalación. Hay otra norma que es la UL-92 que es para instalación, los libros de la NFPA siempre les van a faltar cosas entonces si podría, de hecho hay algunas cosas que uno tiene que interpretar, si faltan cosas.
4. Consideraciones sobre el sistema de protección, bueno primero la puesta a tierra, como podemos hacer los anillos perimetrales o cómo podemos unir diferentes electrodos, después eso del asunto de los bajantes, como distribuir los bajantes de forma que no afecten la estética y el riesgo a las personas; como interconectar eso del sistema contra el sistema de potencia, el sistema de comunicaciones y después como hacer una instalación encima de los techos de modo que se proteja y que físicamente se pueda instalar.
5. Bueno no he instalado sistemas ni le he dado mantenimiento, pero uno de los aspectos importantes es el revisar las conexiones que estén libres de óxido,

socarlas, que las varillas que estén quebradas o dañadas se vuelvan a instalar, que no se hayan pintado, que no se hayan pintado los cables, que más, que no se hayan puestos objetos encima del techo que no hayan sido cubiertos por el estudio inicial de diseño que varíen la protección, que no se hayan puesto cámaras, luminarias, escaleras, porque esto habría que incluirlo dentro del diseño inicial.

6. Las pruebas podrían ser de continuidad entre los cables, entre las varillas, la prueba de la malla de tierra por eso necesitamos un desconectador para cada malla para medirla por aparte. La continuidad porque de ahí en adelante no conozco otras.
7. Principales errores en el diseño, pues sería no usar la norma o usarla mal o que me da pereza porque es, o que es muy caro entonces voy a hacer una mezcla entre esa norma y la IEC-62305, la internacional o hacer planos muy escuetos, no hacer el estudio de la esfera rodante en 3 dimensiones que hay que hacer un Revit y por ejemplo no hacer estudio de tierras, de resistividad o no hacer el diseño de la malla de tierras o hacer esos triángulos de 3 por 3 que son prohibidos en la NFPA 780, algo así más o menos. Agregar que aun siendo un sistema muy invasivo a nivel de instalación y estética se hizo el diseño para el teatro nacional que es un lugar histórico y complejo verdad por los acabados y sin embargo se hizo todo un diseño para ese teatro nacional y ahora para una clínica de 10 000 m<sup>2</sup> se está haciendo, se hizo ya el diseño, los cuales son lugares críticos y por otro lado UL también hablaba de que ellos podían certificar tanto el diseño y la instalación lo cual incluye un monto aparte.