



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

DISEÑO DE PROTECCIONES ATMOSFÉRICAS EXTERNAS SEGÚN NORMAS NFPA 780 - CASO EDIFICIO "E" - UDEP

Rolando Flores-Guerrero

Piura, febrero de 2019

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Flores, R. (2019). *Diseño de protecciones atmosféricas externas según normas NFPA 780 - caso Edificio "E" - UDEP* (Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**Diseño de protecciones atmosféricas externas según norma NFPA 780 – Caso
Edificio “E” – UDEP.**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico Eléctrico

Rolando Flores Guerrero

Asesor: Mg. Ing. Hugo Fiestas Chévez

Piura, Febrero 2019

A Wilson y Gloria, para su orgullo y difusión. A la comunidad Salesiana, El Sentimiento Guinda y al Coro UPB, quienes cambiaron mi vida.

Prólogo

Los rayos y las protecciones atmosféricas son temas que, en la ciudad de Piura, se han tratado poco durante mucho tiempo. En parte porque no es usual que acontezcan numerosas descargas atmosféricas al año, parte por la cultura correctiva que se tiene frente a una problemática y no preventiva como son los sistemas de pararrayos

El fenómeno del niño, sea global o costero, se desarrolla aproximadamente cada 15 años trayendo consigo tormentas que han modificado el modo de construir de la zona norte del Perú. Los diseños de edificaciones, carreteras y viviendas ahora consideran sistemas de drenaje, los cuales se volvieron muy importantes y populares dentro de la sociedad piurana, sin embargo, el otro gran problema que se menciona en el primer párrafo, aún no está en los trabajos de prevención desarrollados por el común popular.

En el presente trabajo se muestra por qué es necesario proteger los edificios y estructuras, cuándo es recomendable y cuándo es necesaria esta protección, las herramientas que se tienen para que el diseño sea seguro y su ejecución mediante un ejemplo aplicativo.

Se ha desarrollado pensando como un aporte a la ciudad, para crear consciencia preventiva frente a los años venideros y se eviten desgracias mayores a las sucedidas en los años 1983, 1998 y 2017.

El autor queda infinitamente agradecido con sus educadores a lo largo de su vida universitaria, los cuales desarrollaron su sentido de pertenencia para con la ciudad y la universidad, tomando a ambos como familia. De manera especial, una mención para el ingeniero Hugo Fiestas Chévez, asesor del trabajo, cuyo sentido de investigador y capacidad de educador hicieron posible tal logro.

Resumen

El objetivo principal del estudio es proponer una metodología didáctica para proteger de descargas atmosféricas la estructura de una edificación y las personas dentro de ella. Se ha tomado como núcleo la normativa internacional NFPA 780.

Primero, se realiza el estudio de los conceptos del rayo y el pararrayo, tipos y fundamentos teóricos que generan las descargas y cómo históricamente se controlaron hasta la actualidad.

Posteriormente, utilizando como base total la normativa mencionada en el párrafo uno, se desarrolló un diagrama de flujo de trabajo, identificando los datos requeridos para poder hacer el estudio de recomendación del sistema de pararrayos. De salir necesaria la protección de la estructura, se ha formulado otro diagrama de bloques que permite elegir el material, las posiciones de las puntas captadoras y su forma de llevarlo hacia una malla a tierra, y así completar el diseño de un sistema de protecciones atmosféricas.

Posteriormente, como ejemplo aplicativo, se evalúa el edificio “E” de la Universidad de Piura, comprobando si es recomendable o no el poner pararrayos en él, para finalmente llegar a seleccionar el material a utilizar, la posición de sus puntas captadoras y su malla a tierra. Se culmina con un metrado y presupuesto base del proyecto.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1	3
Marco Teórico	3
1.1 Historia	3
1.1.1 Evolución histórica del rayo	3
1.1.2 Benjamín Franklin: el inventor del pararrayos	4
1.1.2.1 El experimento de la cometa	4
1.1.3 Evolución histórica del pararrayos	5
1.1.4 Estado actual de las normativas	6
1.1.4.1 La Asociación Nacional de Protección contra el Fuego	6
1.1.4.1.1 Origen y desarrollo de NFPA 780	7
1.2 Rayos	8
1.2.1 Parámetros y valores del rayo	8
1.2.1.1 Descargas de rayo y secuencia de corriente del rayo	8
1.2.1.1.1 Teoría de precipitación	8
1.2.1.1.2 Teoría de convección	8
1.2.1.1.3 Descargas de rayo descendentes	9
1.2.1.1.4 Descargas de rayo ascendentes	10
1.2.1.2 Valor cresta de la corriente del rayo	11
1.2.1.3 Pendiente de la corriente de rayo	11
1.2.1.4 Carga de la corriente del rayo	12
1.2.1.5 Energía específica	12

1.2.2	Coordinación de los parámetros de la corriente de rayo con los niveles de protección.	13
1.2.2.1	Valores máximos de los parámetros de corriente de rayo	13
1.2.2.2	Valores mínimos de los parámetros de corriente de rayo	14
1.2.3	Efectos sobre las personas.....	14
1.2.4	Efecto sobre los bienes.....	17
1.2.4.1	Daños sobre instalaciones, edificios e industrias	17
1.2.4.2	Daños en las líneas de transmisión	18
1.3	Protección externa contra los rayos	18
1.3.1	Concepto	18
1.3.1.1	Sistema de protección integral contra rayos.....	19
1.3.2	Sistemas de protección externa	19
1.3.2.1	Funciones	19
1.3.2.2	Instalación captadora	19
1.3.2.2.1	Instalación captadora para edificios con cubierta plana	21
1.3.2.2.2	Cubiertas transitables por personas	22
1.3.2.2.3	Efectos por acción del viento en puntas captadoras	23
1.3.2.3	Instalación derivadora.....	26
1.3.2.3.1	Puntos de medida	27
1.3.2.4	Instalaciones de toma de tierra	28
1.3.2.4.1	Terminología.....	28
1.3.2.4.2	Tipos de puesta a tierra	29
1.3.2.4.3	Corrosión de las tomas de tierra.....	31
1.4	Pararrayos.....	31
1.4.1	Código nacional de electricidad	31
1.4.2	Definición.....	34
1.4.3	El modelo electrogeométrico.....	35
1.4.3.1	Aplicación del modelo electrogeométrico en el caso de un pararrayos Franklin.....	36
1.4.3.2	Aplicación del modelo electrogeométrico según las normas de aplicación correspondientes: el método de la esfera rodante	38
1.4.3.3	Profundidad de penetración de la esfera rodante.....	42
1.4.3.4	Cálculo del área protegida.....	43
1.4.3.5	Comportamiento de las funciones respecto a la distancia de impacto.....	45

1.4.4	Tipos de pararrayos.....	49
1.4.4.1	Puntas Captadoras.....	50
1.4.5	Materiales	51
1.4.6	Inspección y mantenimiento.....	53
1.4.6.1	Tipos de inspección y cualificación de los inspectores	53
1.4.6.2	Medidas de inspección	53
1.4.6.3	Mantenimiento.....	54
Capítulo 2		55
	Procedimiento de diseño de un sistema de protecciones atmosféricas externo bajo la norma NFPA 780	55
2.1	General.....	55
2.2	Recopilación de datos	55
2.3	Estudio de riesgo de descarga	56
2.3.1	Potenciales descargas sobre el edificio en un año.....	56
2.3.1.1	Número de descargas por año en la ubicación geográfica del edificio	57
2.3.1.2	Área colectiva equivalente del edificio	59
2.3.1.3	Factor de locación.....	60
2.3.2	Densidad de descargas en un año toleradas	61
2.3.2.1	Coeficiente de construcción	62
2.3.2.2	Coeficiente de contenido de la estructura	62
2.3.2.3	Coeficiente de ocupación de la estructura.....	63
2.3.2.4	Coeficiente de consecuencia de descargas sobre la estructura.....	63
2.3.3	Recomendación de incluir el sistema de protección contra descargas atmosféricas.....	63
2.4	Diseño	63
2.4.1	Elección de material según la altura del edificio	65
2.4.2	Puntas captadoras	65
2.4.2.1	Distribución en tipos de techo	65
2.4.2.2	El método de la esfera rodante	68
2.4.2.3	Distancias mínimas.....	69
2.4.3	Conductores, conectores y sujetadores	70
2.4.3.1	Tipos de conductores	70
2.4.3.2	Tipos de conectores	71
2.4.3.3	Distancia entre sujetadores.....	71

2.4.4	Puesta a tierra	72
2.4.4.1	Número de pozos a tierra	72
2.4.4.2	Dimensiones de la varilla	72
2.4.4.3	Posición y distancias mínimas del pozo a tierra	72
2.4.4.4	Configuraciones de mallas a tierra recomendadas	72
Capítulo 3		73
Análisis de riesgo y factibilidad		73
3.1	General.....	73
3.1.1	El método de evaluación de riesgo.....	73
3.2	Mapa isoceráunico	74
3.3	Promedio de descargas al año	75
3.3.1	Área colectiva equivalente.....	75
3.3.2	Coeficiente del ambiente	76
3.4	Medida del riesgo o daño a la estructura	77
3.4.1	Coeficiente de construcción C2	78
3.4.2	Coeficiente de contenido de la estructura C3	78
3.4.3	Coeficiente de ocupación de la estructura C4	78
3.4.4	Coeficiente de consecuencia de una descarga C5	79
3.5	Cálculo del riesgo	79
Capítulo 4		81
Estructura a proteger		81
4.1	Ubicación geográfica	81
4.1.1	Región Piura	81
4.1.1.1	El fenómeno del niño	82
4.1.1.1.1	El Niño costero en Piura	84
4.2	Universidad de Piura.....	86
4.2.1	El campus universitario	86
4.2.1.1	El edificio “E”	88
4.2.1.1.1	Arquitectura del edificio “E”	89
Capítulo 5		93
Propuesta del sistema de pararrayos		93
5.1	Materiales	93
5.2	Puntas captadoras.....	93
5.3	Techo.....	95
5.4	Aplicación del método de la esfera rodante y de las distancias mínimas	96

5.5	Conductores.....	120
5.5.1	Cables de bajada.....	121
5.6	Pernos y elementos de sujeción	123
5.7	Conectores	125
5.8	Puesta a tierra	126
5.9	Metrado	130
5.10	Valorización del diseño.....	131
	Conclusiones y recomendaciones.....	133
	Bibliografía.....	135

Introducción

La costa continental que limita con el océano Pacífico sufre, aproximadamente cada 15 años, el denominado “Fenómeno del niño”. En el 2017 se le denominó “Niño costero” por tener características particulares de aumento de temperatura en el mar y condiciones de tormenta no iguales a las de los años 1998 y 1983. Entre las consecuencias de estas condiciones se puede encontrar tormentas eléctricas e inundaciones por lluvias o por desbordes de ríos, viéndose afectada la urbe de las ciudades, no solo con daños materiales sino también con pérdidas de vidas humanas.

La opinión pública, los esfuerzos del estado y la población se enfocaron en salvaguardar los peligros ocasionados por el agua, en solicitar una reestructuración de la ciudad respecto a drenajes, puntos de evacuación de agua en las cuencas ciegas, descolmatación y limpieza del río y sus quebradas y reubicación de poblaciones vulnerables. El presente estudio surge como una alternativa que permita trabajar de igual forma sobre las consecuencias de un enemigo que ha pasado desapercibido por ser menos frecuente, sin embargo, con un poder destructivo mayor y más eficaz: el rayo.

A pesar de que la mayoría de personas ha oído alguna vez sobre pararrayos, muy pocos reconocen su importancia ni están enterados del procedimiento de diseño doméstico o industrial. Este estudio busca mostrar al lector una herramienta didáctica y técnicamente completa para poder identificar si es recomendable o no el uso de sistemas de protección atmosférica en una estructura específica, cómo diseñar todo lo involucrado a ellas y las consideraciones a tener.

Es de gran interés del autor que pueda ser difundido e implementado para evitar daños materiales y personales cuando el fenómeno se repita, para evitar que vuelva a suceder lo acontecido en los años 1983, 1998 y 2017.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1 Historia

1.1.1 Evolución histórica del rayo

Desde los inicios de la historia de la humanidad, el desconocimiento de la ciencia ha impulsado la imaginación del hombre. El rayo, el relámpago y el trueno, desde siempre, fueron fenómenos misteriosos, por lo que nacieron numerosos mitos, leyendas y dioses en entorno a ellos.

Por ejemplo, en el antiguo Egipto, el dios “Seth” lanzaba rayos como parte de sus poderes especiales. En la cultura helénica, Zeus era el encargado de castigar a quien lo merecía enviándoles rayos. A partir de esto, los romanos consideraron que Júpiter, jefe de todos los dioses, se manifestaba utilizando rayos sobre los actos malos del pueblo, incluso existía un “Consejo de los Augurios” formado por sacerdotes e importantes ciudadanos romanos llamados “Augur”, para poder traducir e interpretar los deseos del Dios. (García Galindo, 2012).

Una anécdota interesante es la relacionada al dios nórdico “Thor”, el cual se dice que con su martillo golpeaba un yunque al cruzar las nubes en un carro con forma de rayo. Tal importancia tuvo este dios, que el día jueves (“Thursday” en inglés) saca su nombre por “Thur’s Day”. En la Dinamarca actual, jueves es escrito como “Turs day”. En castellano, jueves significa “día de Júpiter”. (Kisielewsky, 2000)

Muchas iglesias medievales hacían sonar sus campanas con la intención de dispersar las nubes de tormenta o alejar los rayos. Sin embargo, esto no les ha servido

de mucho pues son varios los reportes históricos de daños recibidos como consecuencia de la caída de rayos sobre ellas. (Kisielevsky, 2000, pág. 3)

Según Kisielevsky(2000), recién en los inicios del siglo XVIII los fenómenos del rayo se relacionaron conchispas eléctricas, teniendo como punto de partida al profesor Johann Heinrich Winkler, quien se preguntaba si los efectos producidos en la botella de Leyden debían tratarse como una clase de relámpago.

En la actualidad, ya se conoce que el rayo es un flujo de electrones que van de un mayor a un menor potencial. En pocas palabras, que es una descarga eléctrica, que tiene una fuente y un receptor, un medio y una intensidad definidas dependiendo de sus variables.

1.1.2 Benjamín Franklin: el inventor del pararrayos

Nacido en Boston el 17 de enero de 1706. Fue político, científico e inventor. En el año 1752 llevó a cabo su experimento de la cometa, conocido actualmente como “La cometa de Franklin”. Conocido como el inventor de los pararrayos, de los lentes bifocales y del horno de Franklin. Fallece en Filadelfia a los 84 años de edad. (Hernández Laguna, 2016)

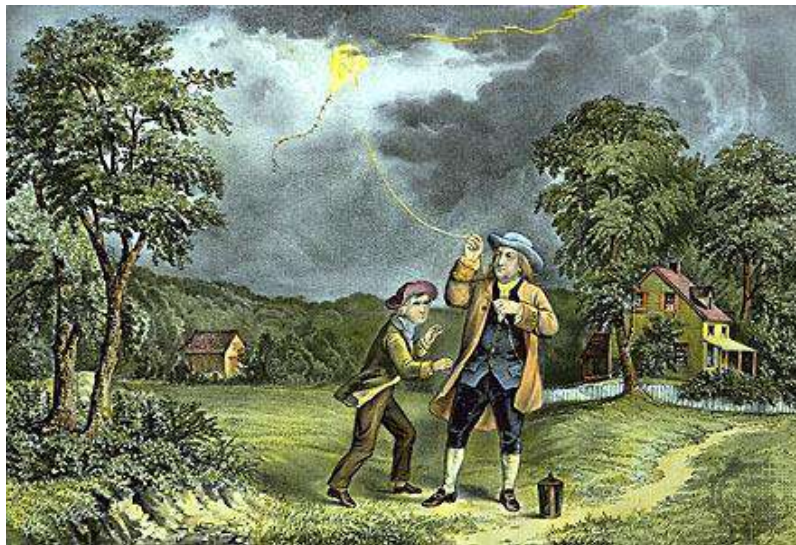


Imagen 1: Benjamín Franklin y el experimento de la cometa.

Fuente: (López, 20 minutos, 2012)

1.1.2.1 El experimento de la cometa

El 15 de junio de 1752, amaneció tormentoso en Filadelfia, ciudad en la que vivía Benjamín Franklin, por lo cual decidió llevar a cabo su experimento. Él había construido una cometa cuya estructura estaba construida con varillas de metal, sujeta por un hilo de seda y sujeta por una llave de metal.

Al volar la cometa, comprobó que al poco rato un rayo impactaba contra las varillas metálicas y cuya descarga eléctrica bajaba hasta la llave. Al acercar la mano a la llave, observó que saltaban chispas, tal cual como sucede con la botella de Leyden.

Todo esto le sirvió para comprobar que los rayos eran erróneamente atribuidos a poderes divinos, y que eran fenómenos eléctricos. (López, 20 minutos blog, 2012)

1.1.3 Evolución histórica del pararrayos

Según Kisielewsky (2000), la primera vez que se utilizó un pararrayos para que una estructura se proteja fue en 1752, en Francia y luego en Estados Unidos. En éste último país, al haber mucha influencia de tormentas, se hizo popular su instalación en casas, iglesias y edificios. En Europa se protegieron importantes edificios como el St. Paul's y el Queen's Palace de Inglaterra.

En Italia surgió un incidente con el edificio Brescia en 1772, ya que un rayo destruyó el edificio. A partir de aquí, la Real Sociedad Inglesa forma un comité técnico, comenzando una discusión acerca de la conveniencia de las puntas del pararrayos, si debían ser agudas o redondeadas. (Moore, 1983)

Durante los doscientos años posteriores a que Franklin hablara del "Lightning Conductor" para referirse al pararrayos, no hubo mucho progreso en el campo de la protección. Se emprendieron caminos equivocados como las investigaciones sobre los efectos de las diversas conductividades del material del pararrayos en su efectividad, que luego se probó que eran creencias infundadas, mientras que la importancia de factores determinantes en un sistema de protección, como el aseguramiento de una buena tierra y una excelente bajada, fue reconocida solo tardíamente. (Kisielewsky, 2000, pág. 4)

Según Golde (1977), hubo un punto de vista que atrajo a los principales investigadores, el cual es la existencia de una determinada zona de protección limitada y la manera de cuantificarla.

Se comenzó a hablar sobre una relación de protección entre el ancho de la estructura y la altura del pararrayos, entre otras opciones como la de Franklin, que enfocó el problema desde un punto de vista geométrico cuyo fin era encontrar una distancia mínima, a la que llamó "distancia de impacto" o "Striking distance", entre la punta del asta conductora y el extremo inferior del rayo. Este último concepto sigue siendo base para las normativas de interés como la NFPA 780 o la IEC 61024. (Kisielewsky, 2000)

1.1.4 Estado actual de las normativas

A medida que se fundamentó mejor las teorías y con la experimentación de los distintos profesionales, muchos países empezaron a normalizar la utilización de pararrayos.

Desde 1905, existe en Estados Unidos de América la norma NFPA denominada “Standard for The Installation of Lightning Protection Systems”, la cual utiliza el método de la “Esfera Rodante”, al igual que la norma británica BS 6651. En Alemania se utiliza la VDE 185, basada en determinar el área mediante un cono con vértice en el extremo superior de la varilla conductora con un ángulo de 45 grados. La norma IEC 61024 propone una combinación de los dos métodos antes mencionados dependiendo de la estructura a proteger, con la salvedad de que el cono tiene ángulos de entre 20 y 60 grados. (Kisielesky, 2000)

1.1.4.1 La Asociación Nacional de Protección contra el Fuego

Las siglas NFPA significan “National Fire Protection Association”, la cual es una asociación, fundada en 1896, no gubernamental cuya orientación es el estudio y la normatividad de la prevención y protección contra incendios. Su influencia intelectual y técnica les ha dado un lugar importante en los diversos países de américa. Su misión es reducir el riesgo sobre la calidad de vida promoviendo y suministrando de manera consensuada códigos de construcción e instalación y desarrollo de tecnologías y políticas sobre el problema del incendio y sus peligros asociados. (Villa., 2009)



Imagen 2: Logo de la NFPA.

Fuente: (NFPA 780, 2014)

1.1.4.1.1 Origen y desarrollo de NFPA 780

La National Fire Protection Association primero formuló las especificaciones para protección de edificios contra descargas atmosféricas en 1904. Se revisaron estas normas en 1905, 1906, 1925, 1932 y 1937. En 1945, el comité de la NFPA junto al comité de ASA en protección contra descargas atmosféricas, se reorganizó y se combinó bajo el patrocinio de la NFPA, del Escritorio Nacional de Normas, y del Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos (ahora IEEE). En 1946, la NFPA actuó para escribir la Parte III y en 1947 se publicó una edición revisada que incorpora esta parte. Más tarde se hicieron las revisiones recomendadas por el comité y fueron adoptadas por la NFPA en 1949, 1950, 1951, 1952, 1957, 1959, 1963, 1965, 1968, 1975, 1977, 1980, 1983, 186, 1989 y 1992. (NFPA 780, 2014, pág. 1)

Comenzando con la edición de 1992, edición del Código de la Protección contra descargas atmosféricas, la NFPA cambió la designación numérica del documento que pasó de NFPA 78 a NFPA 780. (NFPA 780, 2014, pág. 1)

Con la emisión de la edición de 1995, el nombre del documento se cambió de “Código de Protección contra descargas atmosféricas” a la” Norma para la Instalación de los Sistemas de Protección contra descargas atmosféricas”. Este cambio fue dirigido por el concilio de las normas para hacer el título más preciso y claro, reflejado en el título del volumen del documento. Además, el concilio dirigió ciertos cambios sobre el alcance del documento para clarificar que el documento no cubre los requisitos de la instalación de protecciones contra descargas atmosféricas para sistemas con dispositivos de cebado o de sistemas de disipadores de rayo. (NFPA 780, 2014, pág. 1)

La edición de 1997 incorporó cambios en el documentos para hacerlo más amigable a la lectura. Al emitirla, el consejo de la norma señaló que el rayo es un proceso natural caprichoso, sin el comportamiento entendido exactamente, por lo que aclara que la norma NFPA 780 está destinada a proporcionar requisitos dentro de los conocimientos y experimentos actuales. (NFPA 780, 2014)

La edición del año 2000 fue arreglada para que sean consideradas las estructuras en ambientes abiertos, como por ejemplo, en campos de golf. También, se actualizó el mapa isocerámico de 1972 a uno de 1998. La del año 2004 incluyó la adición de tres capítulos administrativos al principio de la norma: “Administración”, “Publicaciones referentes” y “Definiciones”; también unas revisiones técnicas, como la permisión de utilizar dispositivos de terminación de titanio, adición de un conductor principal de alma sólida para las estructuras de más de 75 pies de altura, entre otras. La del año 2008 proporcionó requisitos para que las protecciones contra sobretensiones sean incluidas en todas las entradas de potencia, comunicación y antenas; también incluyó que todos los medios de conexión a tierra deben estar interconectados para proporcionar un potencial de tierra común. (NFPA 780, 2014)

En la edición del 2011, se adicionaron dos capítulos importantes para el presente de la norma. El primero abordó la protección sobre estructuras con municiones o explosivos, mientras que el segundo proporciona los requisitos para proteger las turbinas eólicas de generación eléctrica. También se adicionaron los requerimientos para proteger estructuras conteniendo vapores y gases inflamables, así como tanques de hidrocarburo con techo flotante. (NFPA 780, 2014)

En la edición 2014, se incluyeron edificios que tienen objetos de metal, como observatorios, grúas de construcción, platos de radar, paneles solares, etc. (NFPA 780, 2014)

1.2 Rayos

1.2.1 Parámetros y valores del rayo

1.2.1.1 Descargas de rayo y secuencia de corriente del rayo

Si las masas de aire son húmedas y calientes, es muy probable que vaya a acontecer una tormenta, ya que al moverse y chocar entre ellas, por procesos electrostáticos, las nubes se cargarán eléctricamente. En la parte superior de una nube cargada irán las cargas positivas y las negativas al inferior. Se conoce también que en la zona inferior existe una pequeña zona con cargas positivas, debido al efecto corona¹ producido desde los puntos situados en tierra por debajo de la nube cargada. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

Se sabe que el campo eléctrico dentro de una nube es de cerca de 400 kV/m, y existen dos teorías para que en la nube se genere el dipolo principal

1.2.1.1.1 Teoría de precipitación

Las partículas pesadas que caen por precipitación, hacen interacción con las livianas, las cuales se cargan negativa y positiva respectivamente. Después, la gravedad y los vientos hacia arriba separarán las cargas opuestas y se agruparán en dipolos. (Kisielewsky, 2000)

1.2.1.1.2 Teoría de convección

Se acumula carga eléctrica en la superficie de la tierra o en las regiones de movimiento de aire y conductibilidad variable dentro de la nube. La carga es trasladada

¹ El efecto corona consiste en la ionización del aire que rodea a los conductores de alta tensión cuando el gradiente eléctrico supera la rigidez dieléctrica del aire. Se manifiesta en pequeñas chispas o descargas. (Centro de Estudios de Aparejadores por Correspondencia, 2013)

en bloque por el flujo de aire de las tormentas que termina formando dipolos. (Kisielewsky, 2000, pág. 33)

Las alturas a las cuales se ubica el inicio de la descarga varía respecto a los científicos que estudiaron el fenómeno. Por ejemplo, Clarence y Malan en 1957 determinaron que la ruptura inicial se lleva a cabo en el centro de la principal zona de carga negativa y la más pequeña de carga positiva (la que es causada por el efecto corona mencionada anteriormente). Según Krehbiel en 1979, la altura a la cual la ruptura inicia es de 6 a 8 km sobre el suelo, aunque para Proctor (1983) es de aproximadamente 5.8 km. (Kisielewsky, 2000)

Debido a las densidades de carga, pueden originarse campos de varios cientos de kiloVoltios por metro, lo que producirá el llamado “líder” o “guía escalonada”, el cual es el inicio de la descarga. Las descargas entre nubes producen equilibrio de carga entre ellas y no afectan elementos situados sobre la superficie de la tierra. A pesar de esto, las descargas entre nubes son esenciales y cumplen un importante rol en lo que a la creación de campos electromagnéticos se refiere. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

Se puede afirmar que una descarga atmosférica hacia tierra busca compensar las cargas de la nube con las de la tierra. Existen dos tipos de estos fenómenos: descargas de rayo descendentes (nube a tierra) y ascendentes (tierra a nube). (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

1.2.1.1.3 Descargas de rayo descendentes

Estos rayos se producen generalmente en terrenos planos y edificios bajos. Pueden ser reconocidos por las ramificaciones dirigidas hacia abajo con una gran troncal desde arriba. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007). Pueden ser de dos clases, llámesen positivos o negativos.

Los rayos más comunes son los descendentes negativos. La guía escalonada avanza con velocidad aproximada de 300km/h siguiendo tramos de 10 metros en promedio. Las pausas entre el arranque y parada son de algunas decenas de micro segundos. Al acercarse el líder a la tierra, se eleva la intensidad de campo eléctrico de elementos situados en la superficie terrestre que se encuentran próximos, como árboles o techos de edificios. Como se habla de una intensidad de campo muy alta, se sobrepasa la resistencia dieléctrica del aire. Las zonas de acumulación de cargas positivas son las primeras que conectan con el líder, con lo cual se tendría cerrado el circuito. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

La corriente promedio del líder es de entre 100 Amperios y 1000 Amperios, y la corriente pico de cada uno de los escalones es de por lo menos 1000 A. (Kisielewsky, 2000).

También existen los rayos descendentes positivos, pero la proporcionalidad de las polaridades es de aproximadamente 90% para los rayos negativos y un 10% para los rayos positivos, dependiendo exclusivamente de la situación geográfica. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

Éstos, a diferencia de los ascendentes, representan un mayor riesgo, por lo que los pararrayos se diseñan tomando como base los parámetros de los rayos descendentes. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

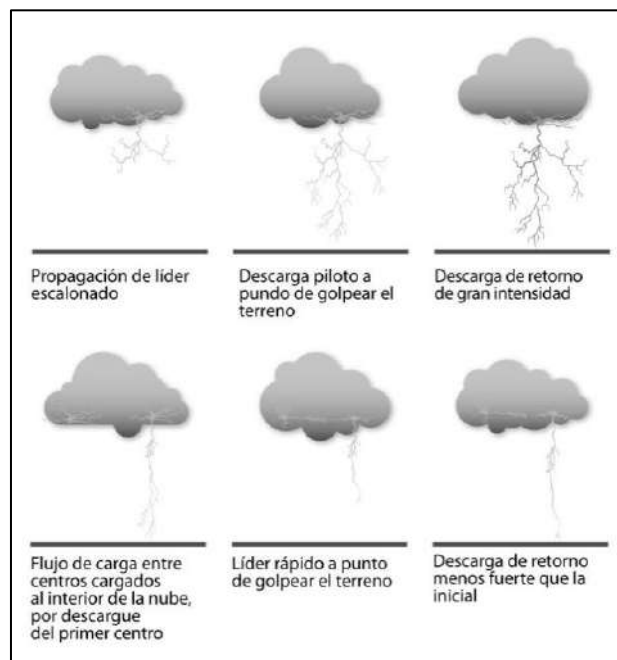


Imagen 3: Evolución de la descarga atmosférica.

Fuente: (GAMMA - Aisladores Corona, 2011)

1.2.1.1.4 Descargas de rayo ascendentes

Se originan cuando los objetos expuestos están muy elevados, como torres de telecomunicaciones, campanarios de iglesias, entre otros. Se reconocen por las ramificaciones hacia arriba. Para que se produzcan estos, la intensidad de campo eléctrico no se alcanza en la nube como en el ejemplo anterior, sino que se origina por dispersión del campo en el objeto expuesto y la intensidad del campo de sus alrededores más cercanos. Entonces, se puede concluir que el líder camina su trayectoria hasta la nube rodeado de carga. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

La corriente de un rayo se desarrolla de una manera particular, desde la cual se pueden deducir cuatro parámetros:

- el valor pico de la corriente
- la carga del impacto corto y la del impacto largo, que juntas componen la carga de la corriente total del rayo
- la energía específica de la corriente
- la pendiente media de la corriente

1.2.1.2 Valor cresta de la corriente del rayo

Las corrientes de rayo son independientes de la carga, y por tanto se dice que se considera una fuente ideal de corriente. Si una carga activa una corriente eléctrica que fluye a través de un conductor cualquiera, la caída de tensión se determina sobre la base de la amplitud de corriente y la impedancia de los elementos conductores por las que está atravesando. Si fuera un caso sencillo, se puede aplicar la ley de Ohm². De ser una corriente que penetra por un solo punto a una superficie, se genera el efecto cónico con área conocida como gradiente de potencial. En el área del gradiente de potencial se origina una tensión de paso si es que existen seres vivos en él (personas o animales), fenómeno que tiene consecuencias peligrosas debido a que circulará corriente por el cuerpo del ser vivo. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

Cuando un rayo cae sobre un pararrayos, la corriente fluye por los conductores instalados en la toma de tierra del edificio dando lugar a una caída de tensión en la resistencia de la puesta a tierra, por lo tanto, todas las partes conductoras eléctricas deben estar elevadas al mismo potencial para que las personas que entren en contacto con ellas no tengan riesgo de sufrir físicamente, ya sea de los elementos conductores existentes en el edificio o que acceden a él. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

1.2.1.3 Pendiente de la corriente de rayo

La pendiente de la corriente del rayo, que se determina en un intervalo de tiempo específico, nos dará el nivel de tensiones electromagnéticas inducidas en todos los bucles de conductor, abiertos o cerrados, que estén en el entorno del conductor de bajada. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Como se mencionó antes en el presente trabajo, las descargas de rayo se componen de una serie de impactos parciales. Podemos diferenciar entre el impacto que se da primero y los siguientes, ambos en un intervalo de tiempo muy pequeño, que en el primero existe una incitación menos acusada de la pendiente de la corriente del rayo, a diferencia de los siguientes, que encuentran ya un canal de rayo definido. Se podría

² La ley de Ohm establece las relaciones que existen entre potencial eléctrico (voltaje), corriente eléctrica y la resistencia. $I = \frac{V}{R}$ donde I es corriente en amperios, V es voltaje en voltios y R es resistencia en ohmios. (García González, 2013)

decir entonces que, a medida que el rayo va avanzando en el tiempo, tiene una mejor estructura de su canal de conducción. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

1.2.1.4 Carga de la corriente del rayo

La carga total del rayo, a la cual llamaremos Q_{TOTAL} , se compone de las cargas del impacto corto (Q_{corto}), y del impacto largo (Q_{largo}). La carga total determina la energía producida en el punto de impacto del rayo y en los puntos de propagación en forma de arco eléctrico. De este modo, la carga puede volatilizar o fundir componentes del sistema de protección externa. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

1.2.1.5 Energía específica

La energía específica de una corriente de impulso es la energía generada por la corriente de impulso en una resistencia de 1Ω , es determinante para el calentamiento de conductores por los que fluye la corriente de impulso de rayo, así como los efectos mecánicos de las fuerzas magnéticas entre conductores recorridos por corriente de impulso de rayo. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

Para calcular el calentamiento de los conductores que atraviesa la corriente de impulso de rayo hay que partir del supuesto de que toda la energía térmica se genera por la resistencia óhmica de los componentes del pararrayo, también se idealiza que por ser un proceso muy veloz, no se tienen intercambios de calor con el entorno. A continuación en la figura se exponen los materiales con sus distintas elevaciones de temperatura, y sus secciones en función de la energía específica. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Tabla 1. Materiales con elevaciones de temperatura y sus secciones, respecto a la energía específica.

Sección [mm ²]			4	10	16	25	50	100
Material	Aluminio W/R [MJ/ Ω]	2.5	-	564	146	52	12	3
		5.6	-	-	454	132	28	7
		10	-	-	-	283	52	12
	Hierro W/R [MJ/ Ω]	2.5	-	-	1120	211	37	9
		5.6	-	-	-	913	96	20
		10	-	-	-	-	211	37
	Cobre W/R [MJ/ Ω]	2.5	-	169	56	22	5	1
		5.6	-	542	143	51	12	3
		10	-	-	309	98	22	5
	Acero inoxidable W/R [MJ/ Ω]	2.5	-	-	-	940	190	45
		5.6	-	-	-	-	460	100
		10	-	-	-	-	940	190

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Las fuerzas electrodinámicas originadas por una corriente que circula por un conductor formado por dos ramas largas en paralelo separados tienen distintos efectos según la dirección del flujo de corriente. Si en los dos conductores fluye en el mismo sentido, ambos se atraerán, si la corriente fluye en sentidos contrarios, se repelerán. También en el caso de un conductor único que presente un doblez, se produce un efecto de la fuerza sobre el mismo, los cuales son tomados en consideración en los protocolos de prueba de las normas de producto referidas a las exigencias que se plantean a los componentes de unión para sistemas de protección contra rayos. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

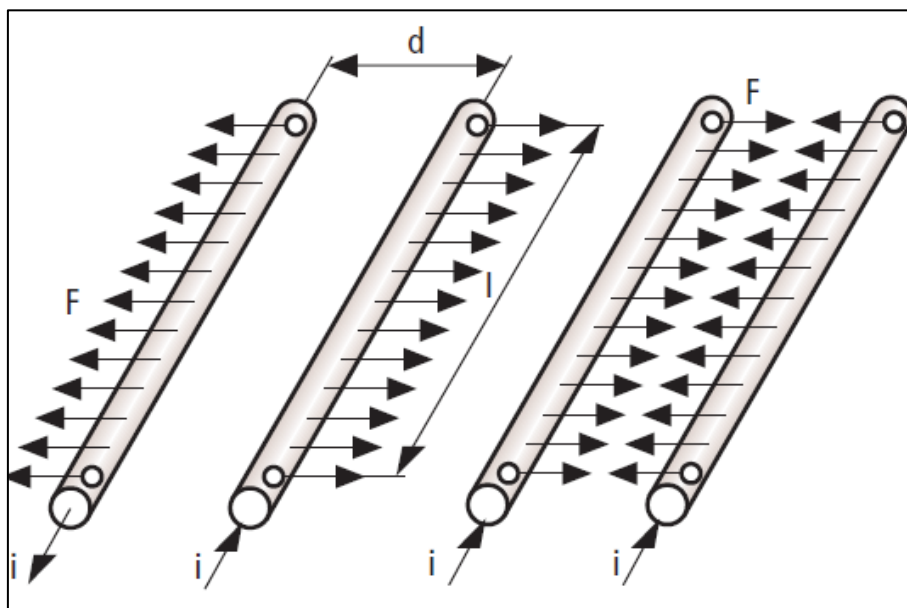


Imagen 4: Dirección y sentido de los campos magnéticos en un conductor

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

1.2.2 Coordinación de los parámetros de la corriente de rayo con los niveles de protección.

Si se busca definir el rayo como una magnitud de perturbación, se han fijado internacionalmente cuatro niveles de protección, diferenciando los valores máximos y los mínimos. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

1.2.2.1 Valores máximos de los parámetros de corriente de rayo

Es el criterio de dimensionamiento o de diseño para los componentes de protección contra rayos. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Tabla 2. Valores máximos de corriente de cresta de rayo y el nivel de protección que se le asigna.

Nivel de Protección	Valores máximos (Criterios de dimensionado)	
	Valor cresta máximo de la corriente de rayo	Probabilidad de que la efectivamente ocasionada sea inferior al valor de cresta máximo de la misma
I	200 kA	99%
II	150 kA	98%
III	100 kA	97%
IV	100 kA	97%

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

1.2.2.2 Valores mínimos de los parámetros de corriente de rayo

Es el criterio de interceptación, necesarios para determinar las zonas protegidas contra descargas de rayo (aquí se utiliza el radio de la esfera rodante). (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Tabla 3. Valores mínimos de corriente de cresta de rayo y el nivel de protección que se le asigna.

Nivel de Protección	Niveles mínimos (Criterios de dimensionado)		
	Valor cresta mínimo de la corriente de rayo	Probabilidad de que la corriente de rayo ocasionada efectivamente sea superior al valor cresta mínimo de la corriente de rayo.	Radio de la esfera rodante
I	200 kA	99%	20 m
II	150 kA	98%	30 m
III	100 kA	97%	45 m
IV	100 kA	97%	60 m

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

1.2.3 Efectos sobre las personas

Cuando un ser humano es alcanzado por un rayo, hay dos caminos causantes de muerte:

- **Fibrilación ventricular:** La corriente que pasa por el corazón descordina las fibras y los tejidos musculares, por lo que la circulación

de la sangre se detiene, y en un promedio de 4 minutos la persona fallece. A pesar de esto, según investigaciones médicas, en los casos de altas cargas se observa que lo que causa la muerte es el detenimiento del corazón más que la fibrilación ventricular. (Kisielewsky, 2000)

- **Paro respiratorio:** La corriente debe pasar a través del centro respiratorio del cerebro, en su parte inferior, y allí haber un paro respiratorio que continúa a pesar de que la corriente haya cesado. (Kisielewsky, 2000)

Los efectos que tiene la electricidad en la persona dependen de la intensidad de la corriente y del tiempo de contacto que se tenga. A continuación, se muestra en la figura cuatro zonas que implican distintos efectos:

- **Zona 1:** Limitada por la recta A, llamada “Umbral de Percepción”. No se produce habitualmente ninguna reacción. Podemos ver que se podría aplicar 1mA al cuerpo incluso durante 5000 ms y no tendríamos sensación alguna de que la corriente está pasando por nuestro cuerpo. (Schneider Electric España S.A., 2008)
- **Zona 2:** Limitada entre la recta A y la curva B. En estos puntos, la corriente ya se percibe en el cuerpo, pero no se produce ningún efecto fisiológico que afecte nuestra salud. (Schneider Electric España S.A., 2008)
- **Zona 3:** Limitada entre las curvas B (Umbral de no soltar) y C (Umbral de probabilidad de fibrilación), aquí se puede apreciar que si se aplican 200 mA en un tiempo de 500 ms, es probable la aparición de contracciones musculares y dificultades respiratorias, así como efectos reversibles en el corazón. (Schneider Electric España S.A., 2008)
- **Zona 4:** Limitada por la curva C. Sumando a los efectos de la zona 3, la posibilidad de fibrilación ventricular existe, así como paro cardíaco y quemaduras graves, aumentando en importancia con la intensidad y el tiempo. (Schneider Electric España S.A., 2008)

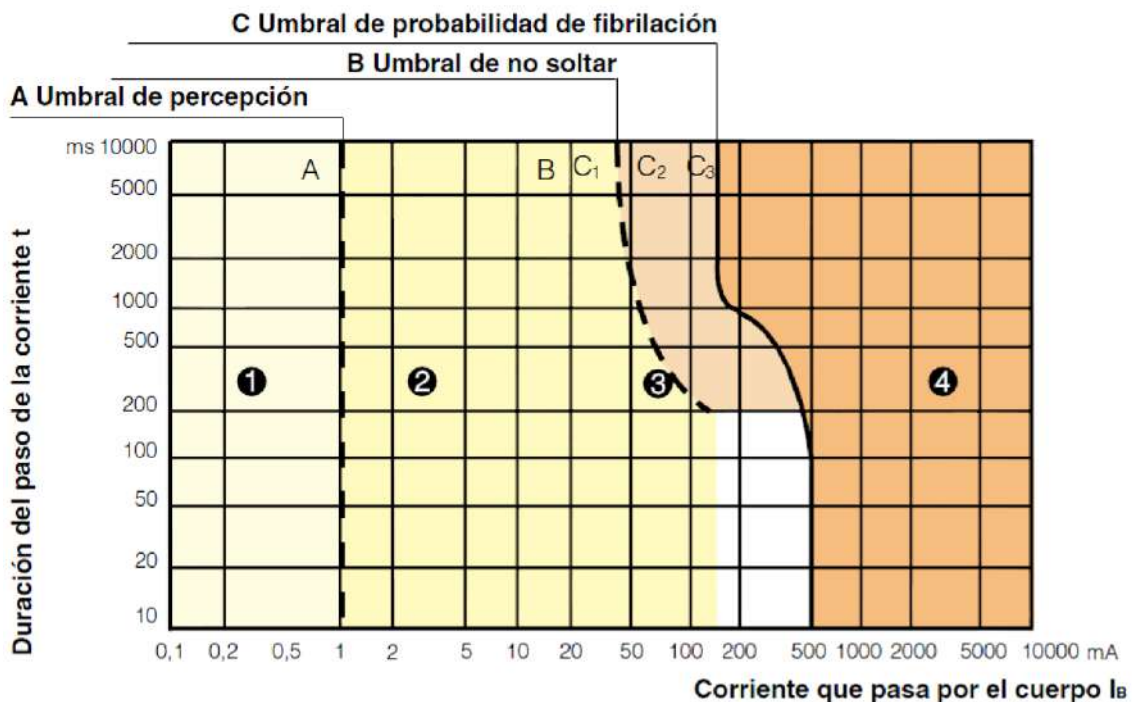


Imagen 5: Zonas tiempo vs corriente de los efectos de la corriente continua sobre las personas.

Fuente: (Schneider Electric España S.A., 2008)

Existen 4 maneras en las que un rayo puede afectar a una persona:

- **Impacto directo:** la persona afectada hace de conector entre el rayo y el suelo, pasando por su cuerpo toda la corriente, desde su cabeza hasta sus pies. Se podría decir que actúa como un pararrayos, atrayendo el rayo y distribuyéndolo a tierra. (Kisielewsky, 2000)
- **Tensión de contacto:** es producida cuando el rayo impacta un elemento conductor que está siendo sujetado o tocado por una persona. El sujeto está entonces entre la diferencia de potencial del suelo y del punto en contacto, por lo cual hace la vez de conductor a tierra. (Kisielewsky, 2000)
- **Impacto lateral:** si una persona se encuentra cerca de un objeto en donde impacta el rayo o de un objeto conductor impactado por el rayo, puede ser que la energía rompa la rigidez dieléctrica del aire, utilizando el cuerpo de la persona para descargarse a tierra. (Kisielewsky, 2000)
- **Tensión de paso:** Cuando un rayo hace contacto con la tierra, se crea un perfil de potencial en la tierra, dando diferentes voltajes en cada punto del suelo (esto dependerá de qué tan conductor sea el suelo, debido a que si es muy conductor favorece a que el voltaje sea el mismo en toda la superficie), por lo tanto el pie izquierdo del afectado, al estar en un

potencial distinto al del pie derecho, originará una corriente entre sus piernas. Es muy raro que este efecto cause la muerte del sujeto, debido a las bajas corrientes. (Kisielewsky, 2000).

1.2.4 Efecto sobre los bienes

1.2.4.1 Daños sobre instalaciones, edificios e industrias

Para clasificar las causas de los daños, se dividirá en 3 categorías:

- **Descarga atmosférica lejana:** se generan sobretensiones a 1.5 km a la redonda del punto de impacto, ya sea en edificios o residencias. (Kisielewsky, 2000)
- **Descarga directa:** Se producen incendios o daños estructurales por la onda de choque del rayo. (Kisielewsky, 2000)
- **Descarga en línea de acometida:** se crean picos de voltaje anómalos por el ingreso de la corriente usando como conductor la alimentación eléctrica, telefónica o cableado de televisión, luego de que el rayo caiga sobre estas líneas. (Kisielewsky, 2000)

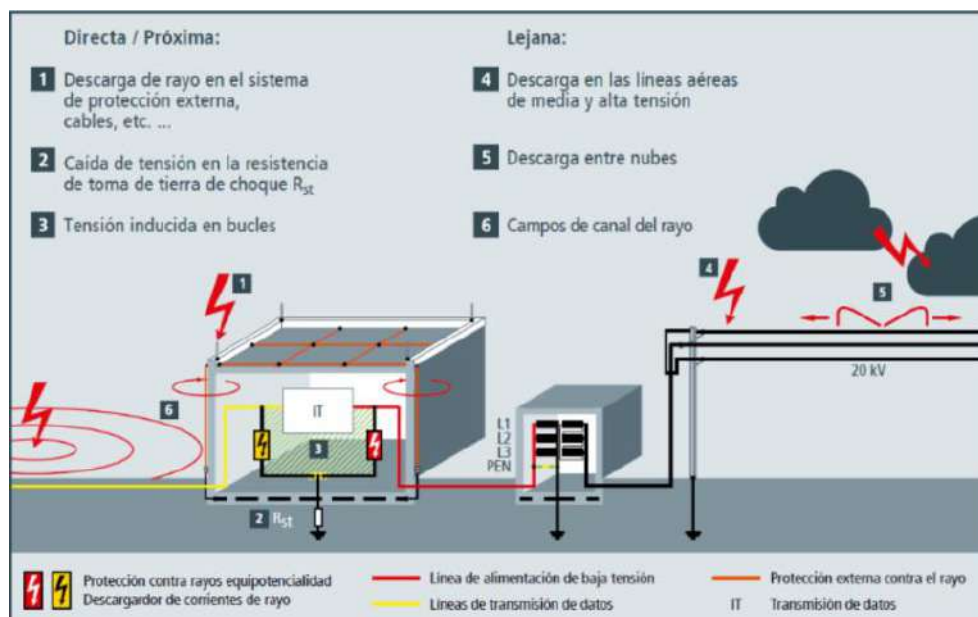


Imagen 6: Formas de cómo se afecta una edificación luego de la caída de un rayo.

Fuente: (Suárez Martínez, 2016)

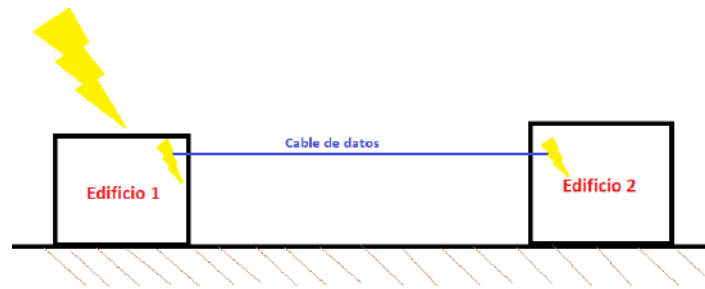


Imagen 7: Las sobretensiones se producen en el edificio 1 y luego se afecta al edificio 2.

Fuente: (Kisielewsky, 2000)

También cabe mencionar y separar de las demás, los efectos cuando acontece una descarga eléctrica en estaciones transformadoras. Existe en la historia un caso como el de Neumark en 1983, en una estación de 110/20kV, en el cual después de una descarga los descargadores de sobretensión de 20 kV se destruyeron, los paneles fueron afectados por arcos voltaicos que pasaron la barra colectora. Se produjeron oscilaciones en el tendido aéreo, produciendo roturas en algunos cables y el transformador explotó, quedando la ciudad a oscuras por un lapso de 6 horas. (Kisielewsky, 2000).

1.2.4.2 Daños en las líneas de transmisión

Se pueden evidenciar fallas de dos tipos:

- **Por apantallamiento o blindaje del cable de guardia insuficiente:** el blindaje que brinda un cable de guardia no es nada barato, ya que a más alta es la torre, se debe considerar más cables de guardia. Por lo tanto, muchos lo omiten del diseño, a pesar de ser algo necesario. (Kisielewsky, 2000)
- **Fallas por cebado inverso:** si un rayo impacta sobre la torre o cable de guardia, y la resistencia de la toma de tierra de las torres es muy alta, se origina un arco eléctrico desde la torre hacia el conductor. (Kisielewsky, 2000)

1.3 Protección externa contra los rayos

1.3.1 Concepto

La protección externa protege personas y estructuras contra el impacto directo de un rayo, son las responsables de atraer y derivar a tierra la corriente del rayo de una manera controlada. Se debe aclarar que no protege equipos existentes dentro del área protegida de los daños causados por sobretensiones. (CIRPROTEC, 2007)

1.3.1.1 Sistema de protección integral contra rayos

Se debe recordar que la protección integral de rayos va mucho más allá que la protección externa, como dicta la imagen 8:

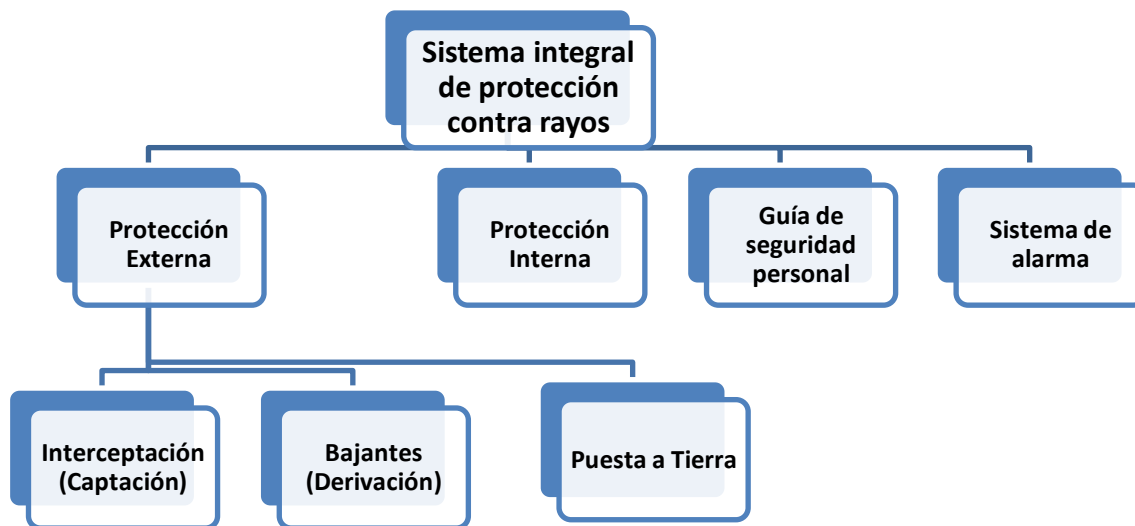


Imagen 8: Elementos del sistema de protección contra rayos.

Fuente: (Torres-Sánchez)

Se debe acotar que únicamente la protección externa es tratada dentro del presente trabajo y no los demás puntos del sistema de protección.

1.3.2 Sistemas de protección externa

1.3.2.1 Funciones

Las funciones de un sistema de protección externa son:

- Recibir el impacto del rayo (captadora).
- Conducir con seguridad, la corriente de rayo a tierra (derivadora).
- Dispersar la corriente de rayo en el terreno (puesta a tierra).

1.3.2.2 Instalación captadora

Se tiene la misión de impedir las descargas directas de rayos sobre el volumen a proteger.

En la actualidad, existen dos sistemas de instalaciones captadoras:

- **Protección mediante mallas o puntas captadoras:** Basado en la norma internacional IEC 61024-1. (CIRPROTEC, 2007)

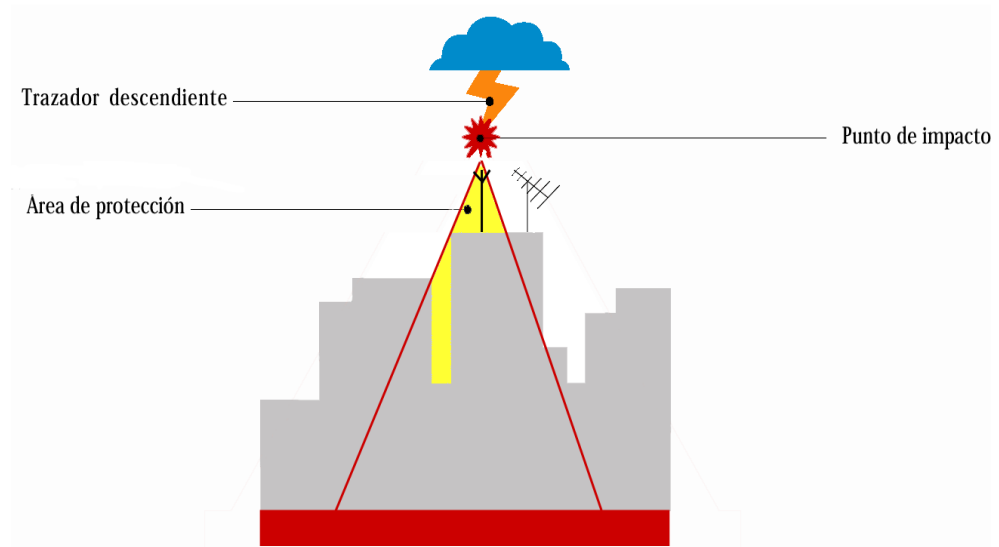


Imagen 9: Protección exterior mediante mallas o puntas captadoras.

Fuente: (CIRPROTEC, 2007, pág. 9)

A este sistema se le conoce como faradización. Es un sistema eficiente para la protección, pero implica que su instalación deba ser en la fase de construcción de la estructura a proteger. (CIRPROTEC, 2007)

- **Protección exterior mediante pararrayos con Dispositivo de Cebado:** Basado en la norma NFC 17102. (CIRPROTEC, 2007)

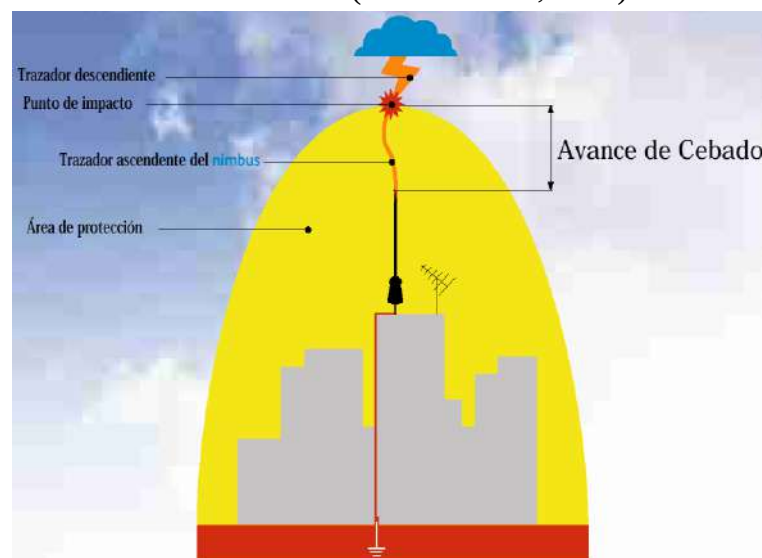


Imagen 10: Protección externa a través de pararrayos con dispositivo de cebado.

Fuente: (CIRPROTEC, 2007, pág. 14)

Utiliza un elemento básico como el pararrayos. En este sistema, la puesta a tierra y el mantenimiento son elementos claves como el propio pararrayos.

Al realizar la protección externa contra rayos de un edificio, las instalaciones pueden ser aisladas o no aisladas, y pueden combinarse entre sí en un solo proyecto.

- **No aisladas:** Si el techo está realizado de material no combustible, se pueden tender los conductores de la instalación conductora sobre la cubierta. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)
- **Aisladas:** Si el tejado es de material altamente inflamable, deben tener una separación no menor a 40 cm entre el tejado y los elementos de la instalación como puntas, conductores o mallas. Otra opción de aislarlo en situaciones en que la distancia es muy complicada de respetar, se utilizan fijadores con plástico reforzado con fibra de vidrio. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Como se encuentran todos tipos de techos en el mercado, sean de dos aguas, de paja, con tránsito de vehículos, con jardines, campanarios de iglesias, entre otras, en la bibliografía se muestran ejemplos y consideraciones para todas estas clases, sin embargo, nos interesa para este trabajo, profundizar en los edificios de cubierta plana.

1.3.2.2.1 Instalación captadora para edificios con cubierta plana

Se coloca una instalación captadora sobre la cubierta formando una malla, con un reticulado definido por la normativa a seguir. Los soportes de conductor para techados planos se colocan dejando aproximadamente 1 metros entre sí. Al cambiar la temperatura, también lo hace la longitud de los materiales utilizados, por lo que los distintos segmentos se equipan con piezas de dilatación. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).



Imagen 11: Uso de puntas captadoras.

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 61)

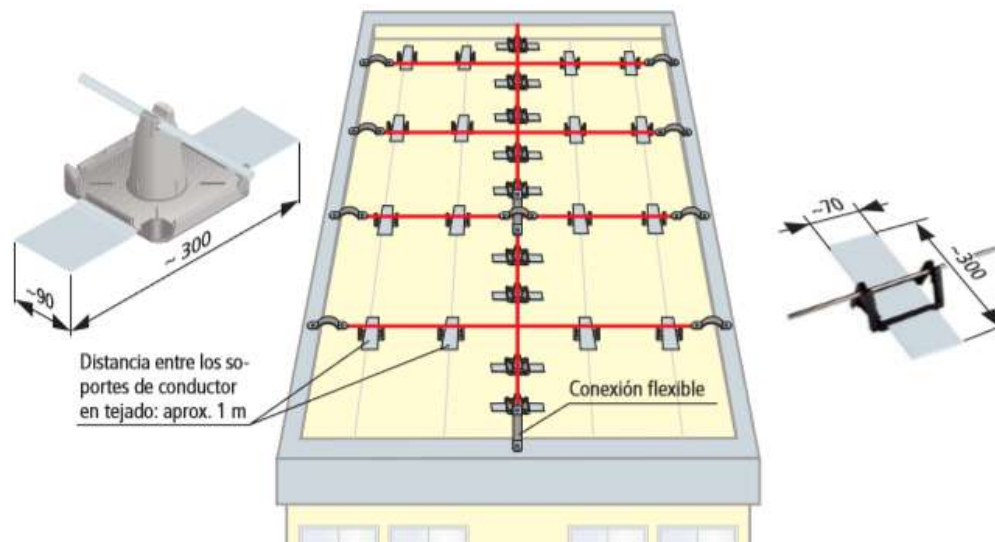


Imagen 12: Bandas para tejado plano. Soporte de conductor de tejado tipo KF/KF2.

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 62)

1.3.2.2.2 Cubiertas transitables por personas

Se debe informar a las personas que accedan a la superficie durante una tormenta, que debe ser desalojada de inmediato en este fenómeno. Los dispositivos captadores deben proyectarse a una altura de 2.5 m aproximadamente, que es la altura de una persona con los brazos extendidos, de tal manera que queden protegidas contra descargas directas. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Por otra parte, para la protección de personas, se pueden utilizar algunos elementos como postes de alumbrado, aunque deben tenerse en cuenta el acceso que puedan tener a la estructura mediante cables de energía. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

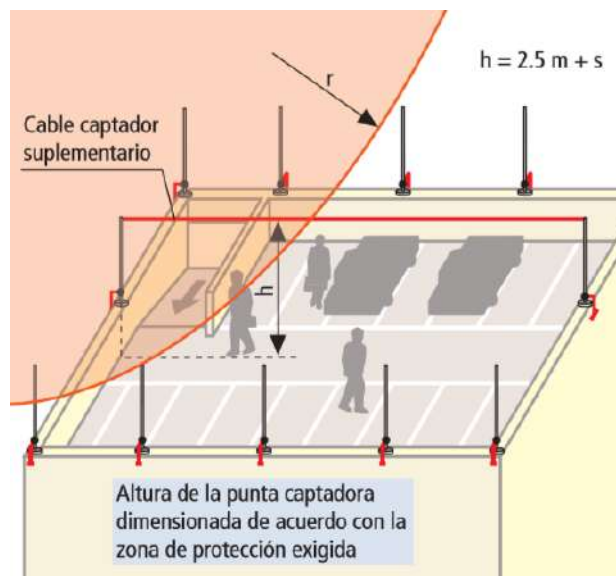


Imagen 13 : Protección contra rayos de aparcamientos en cubierta.

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 69)

1.3.2.2.3 Efectos por acción del viento en puntas captadoras

Para obtener un volumen protegido grande y poder proteger estructuras de mayor tamaño contra descargas directas, se utilizan puntas captadoras con altura suficiente. Las que son auto soportadas se aseguran contra roturas y vuelcos mediante una elaboración del soporte que sirve de base y mediante elementos suplementarios. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Sin embargo, a mayor altura, más influye el viento con su velocidad, incrementándose el riesgo de caídas o roturas. Desde el punto de vista de la instalación, los usuarios demandan construcciones ligeras para facilitar el montaje de las mismas, pero al ser muy ligeras, se podría perder estabilidad mecánica. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

En la definición de las puntas captadoras se deben cumplir requisitos, como por ejemplo:

- Resistencia frente al vuelco.
- Resistencia a la rotura de las puntas.
- Garantizar la distancia de separación necesaria hacia el objeto a proteger, incluso bajo la acción del viento.

Todo esto va a depender de factores geográficos y de los alrededores de la estructura a proteger. Se puede conocer a cierta altura la velocidad del viento en cierta ciudad, y si se encuentra en un descampado o rodeado de edificios, influirá para las consideraciones antes mencionadas.

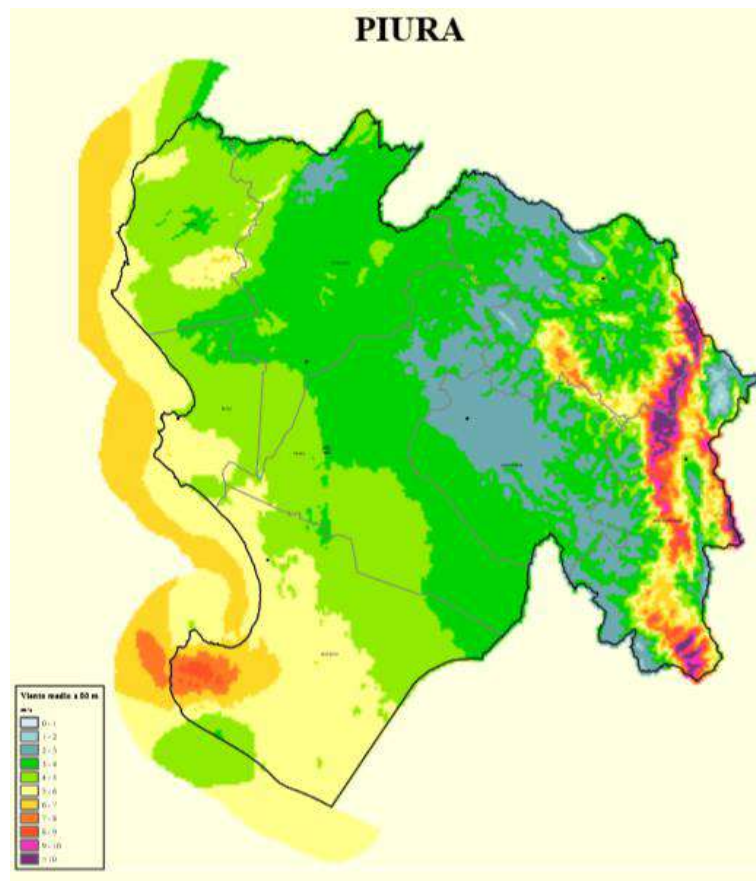


Imagen 14: Velocidad media del viento en la región piura a 80 metros de altura.

Fuente: (Ministerio de energía y minas dirección general de electrificación rural, 2008)

Por acción del viento se genera una carga sobre la superficie de la punta captadora, determinando un momento de vuelco. Para garantizar que la punta autosoportada no sufra de volcadura, se debe oponer otro momento generado por el pie del soporte, el cual dependerá del peso vertical y del radio del propio soporte de pie. La prueba de estabilidad se efectúa mediante cálculos estáticos teniendo los siguientes datos:

- **Superficie expuesta a la acción el viento de la punta captadora:** Definida por la longitud y el diámetro de cada una de las piezas. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)
- **Superficie de los tirantes expuesta a la acción del viento:** Las puntas captadoras de gran altura se sujetan por medio de 3 tirantes equidistantes a la punta. La superficie expuesta corresponde con la superficie de los mismos proyectada sobre un plano situado verticalmente a la acción del viento. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

- **Peso de la punta captadora y de los tirantes:** El peso propio de la punta y de los tirantes de sujeción. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)
- **Peso del soporte de base:** El soporte de base en una construcción en forma de trípode que podría aumentarse poniéndole bloques de hormigón en la base o una base metálica empernada a la superficie. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)
- **Palanca de oscilación:** Distancia entre el punto medio del trípode y la línea o punto de volcadura. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

La estabilidad se alcanza cuando la relación entre el momento soporte y el momento de volcadura es mayor a uno. Cuanto mayor sea la relación entre el soporte y el vuelco será mayor la estabilidad, la cual puede lograrse de distintas maneras:

- Encontrar un equilibrio entre la sección de las puntas captadoras y su rigidez, debido a que si se disminuye el diámetro, tendrá menos área sobre la cual el viento puede aplicar su presión, pero también aumenta el riesgo de fluencia o rotura. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).
- Aumentar peso de la base del soporte y el diámetro de ella, aunque debe verse la disponibilidad del espacio. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

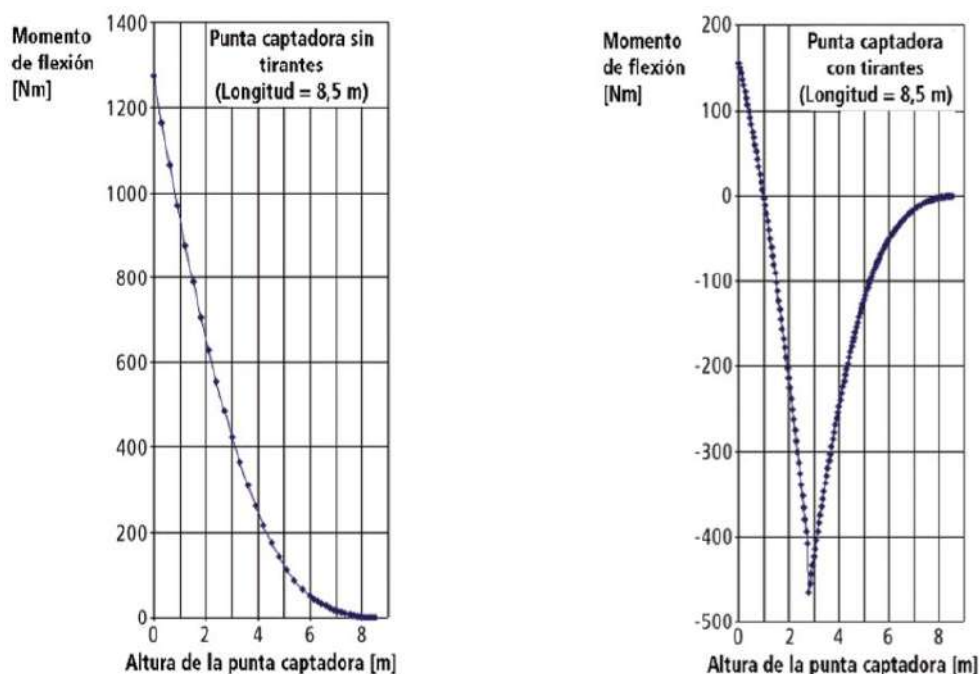


Imagen 15: Comparación entre el desarrollo de los momentos de flexión en puntas captadoras auto soportadas con y sin tirantes. (Se asume una longitud de 8.5m)

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 80)

1.3.2.3 Instalación derivadora

Es la unión eléctrica entre la instalación captadora y el sistema de puesta a tierra. Debe conducir la corriente de rayo al pozo a tierra sin que hayan fenómenos que dañen la estructura, como por ejemplo un aumento de temperatura. Se deben cumplir las siguientes indicaciones:

- Deben existir varias bajantes paralelas. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)
- Las bajantes deben ser rectas, verticales y sin bucles (mínima longitud posible). (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)
- La distancia de separación debe ser siempre respetada entre las partes conductoras de la estructura y las bajantes. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Existen distintas formas de hallar la separación según la norma que se utilice. El encontrar esta distancia permitirá también conocer el número exacto de derivadores. Si no se consigue alcanzar la distancia de separación requerida, se pueden utilizar conductores aislados resistentes a alta tensión. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

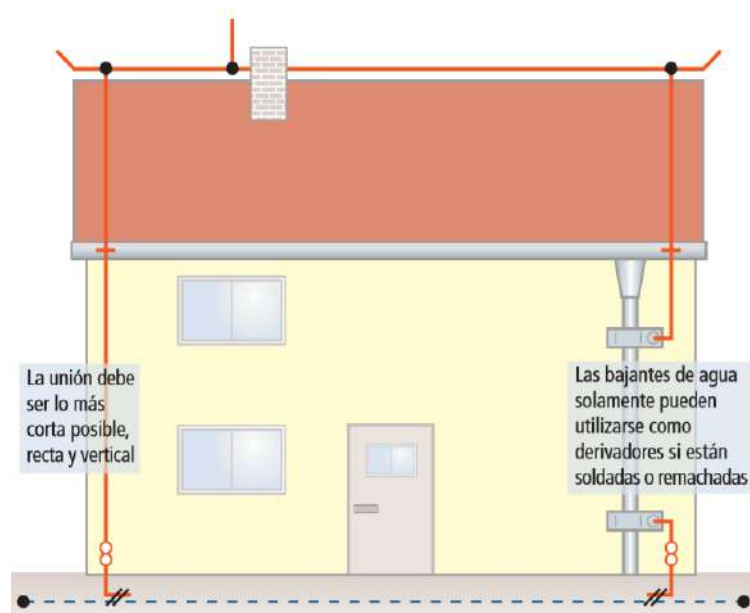


Imagen 16: Instalación derivadora

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 84)

Existen algunos elementos de una edificación que pueden considerarse elementos naturales de una instalación derivadora, como por ejemplo:

- Instalaciones metálicas, cuando la unión de sus partes sea permanente y cumplan con las especificaciones técnicas de la normativa a utilizar. Se debe considerar que se les debe hacer el mismo mantenimiento que a

todo el sistema de protección atmosférica. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

- Tuberías con contenido inflamable, así sean metálicas, no están permitidas. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)
- El esqueleto metálico de la estructura, hormigón armado, etc. Si la construcción ya está hecha, deben utilizarse derivadores externos, ya que no hay forma de asegurar la continuidad y la buena interconexión de las varillas de la armadura. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

1.3.2.3.1 Puntos de medida

Cuando se lleva un derivador al sistema de puesta a tierra, puede ponerse un punto de medida que sirva para poder hacer pruebas de los parámetros requeridos en un sistema de protección atmosférica, como por ejemplo:

- Conexiones entre derivadores a través de la instalación captadora.
- Interconexión de los terminales entre sí a través del sistema de puesta a tierra.
- Resistencia de puesta a tierra.



Imagen 17: Punto de medida enumerado

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 86)

Los puntos de medida deben solo poder abrirse con la ayuda de herramientas, estando señalizado que queda terminantemente prohibido el acceso a él de personal no calificado.

1.3.2.4 Instalaciones de toma de tierra

1.3.2.4.1 Terminología

Se expondrán los diferentes conceptos que se toman en cuenta para hablar de instalaciones de toma de tierra, todos son basados en Dehn + Söhne: Blitzplaner, año 2007.

- **Tierra:** Parte de terreno con potencial eléctrico en cada punto igual a cero.
- **Tierra de referencia:** Parte superficial de la tierra en la que entre dos puntos no se producen tensiones.
- **Toma de tierra:** Componentes conductores que se encuentran en contacto con el terreno.
- **Instalación de toma de tierra:** Conjunto de electrodos de tierra unidos eléctricamente entre sí.
- **Conductor de tierra:** Cable que une la instalación a aterrizar y una toma de tierra.
- **Tierra de protección contra rayos:** Toma de tierra de una instalación de protección contra rayos.
- **Toma de tierra superficial:** Se introduce hasta un metro dentro del terreno, se puede disponer de forma radial, anular o combinación de las mismas.
- **Tomas de tierra de profundidad:** Se introduce verticalmente en tierra con picas o varillas de cobre.
- **Toma de tierra circular:** Por debajo o sobre la superficie de la tierra, tiene la configuración de un anillo encerrando la estructura a proteger.
- **Toma de tierra natural:** Componente metálico que está directamente en contacto con tierra pero que está dentro del hormigón.
- **Tensión de puesta de tierra:** Tensión existente entre una instalación de toma de tierra y la tierra de referencia.
- **Potencial de la superficie de tierra:** Tensión entre un punto de la superficie y la tierra de referencia.
- **Tensión de contacto:** Potencial de la puesta a tierra que se transmite a las personas usando como conductor el cuerpo humano, especialmente a través de las manos.
- **Tensión de paso:** Potencial de la puesta a tierra que puede afectar a las personas entre sus pies al dar un paso de un metro de longitud.
- **Compensación de potencial:** Conexión de instalaciones metálicas y eléctricas con la protección contra rayos.

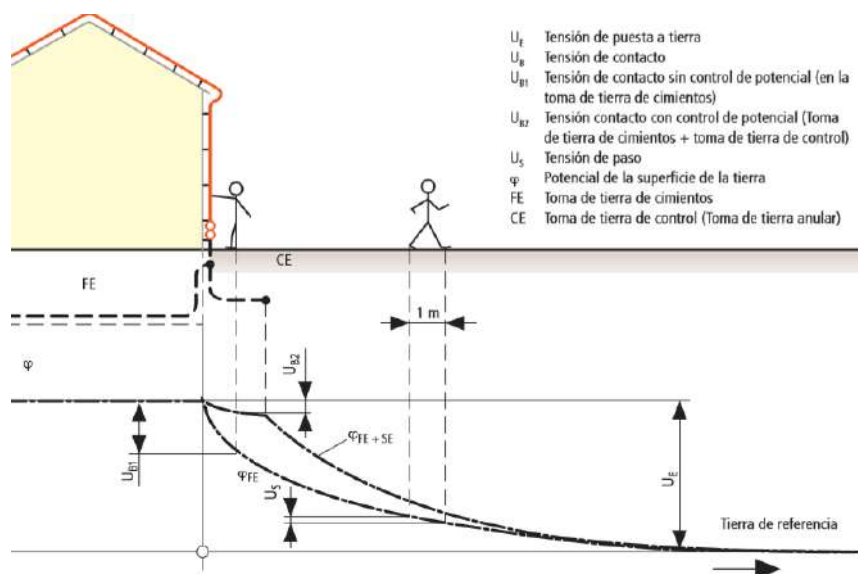


Imagen 18: Potencial de la superficie del terreno y tensiones en la forma de tierra de cimientos y tomas de tierra de control cuando están atravesados por la corriente.

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 105)

1.3.2.4.2 Tipos de puesta a tierra

- **Varilla Cooper Well**

Se ubica una varilla de una longitud de entre 2 y 3 metros, con un espesor comercialmente de 5/8" o 1/2" según especificaciones. Se empalma un conductor en el lado superior de la varilla el cual se dirige hasta todas las instalaciones y estructuras a proteger. (Klever, 2013)

El punto de empalme debe quedar dentro de una caja de inspección, puede ser de concreto o de plástico dependiendo de la ubicación del pozo. Si el terreno no brinda condiciones, se prepara con tierra negra y sal para mejorar la conductividad y mantener la humedad. (Klever, 2013)

- **Sistema de plancha**

Se trata de una plancha de cobre enterrada en el suelo. Se suelda un conductor a la plancha que es el que se deriva a las instalaciones y estructuras a proteger. Se utiliza en terreno en los que, por causa de la profundidad, no puede utilizarse una varilla cooper well. Se puede enterrar desde a 40 centímetros. (Klever, 2013)

- **Sistema de red o malla**

Es la interconexión de 3 o más varillas dependiendo de la carga, ubicándolas en diferentes puntos del terreno. Los empalmes deben ser elaborados con soldadura exotérmica. Se debe preparar el terreno en cada una de las varillas. (Klever, 2013)

- **Sistema anular o malla anular**

Este tipo de tomas de tierra se deben ejecutar como anillo cerrado alrededor del edificio. El 80% del electrodo debe estar en contacto con el terreno, y se debe instalar aproximadamente a 50 centímetros de profundidad y a un metro de separación del edificio. Este método consigue reducir la tensión de paso, y sirve para emplearse como control de potencial alrededor del edificio. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

La corrosión es un aspecto a tener en cuenta, el uso de acero inoxidable sería ideal para esta instalación. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

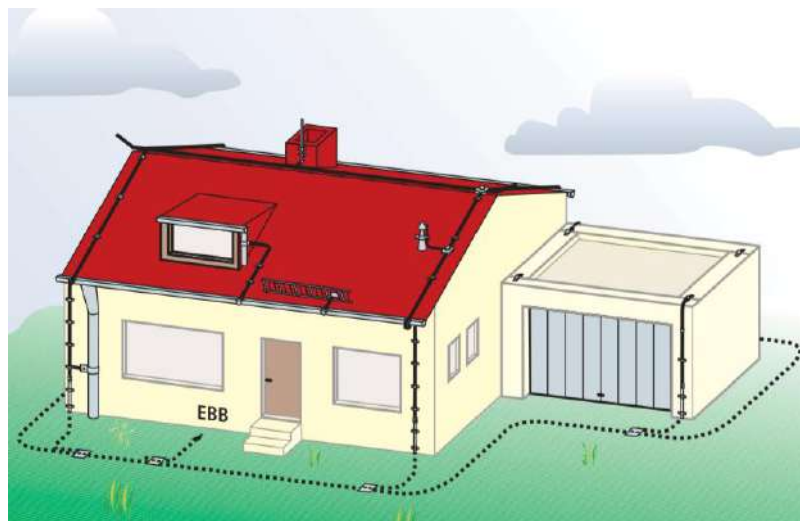


Imagen 19: Anillo perimetral de toma de tierra de un edificio de viviendas.

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 124)

1.3.2.4.3 Corrosión de las tomas de tierra

Como se está hablando de metales en contacto directo con suelo húmedo, puede sufrirse corrosión por corrientes parásitas, suelos corrosivos, formación de celdas voltaicas, entre otras. No se puede aislar el electrodo, ya que perdería su función de conductividad eléctrica con el terreno. Es por esto, que se suele utilizar cobre desnudo o aceros inoxidable.

- **Cobre desnudo:** Es muy resistente debido a su calificación de aislamiento electrolítico, y si se combina con electrodos de puesta a tierra con materiales “menos nobles”, como el acero, posee una protección catódica adicional.
- **Aceros inoxidables:** Este material se encuentra muy próximo al cobre en el nivel de aislamiento electrolítico. Se ha comprobado que un acero inoxidable de alta aleación, por ejemplo el número 1.4571, es suficiente para reducir al mínimo la corrosión en tierra.

1.4 Pararrayos

1.4.1 Código nacional de electricidad

En lo que a descargas atmosféricas se refiere, el CNE menciona lo siguiente:

- La puesta a tierra y el enlace equipotencial deben ser hechos de tal manera que sirvan para el propósito de limitar las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas en aquellos circuitos expuestos a estos fenómenos. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)
- Cada electrodo artificial de puesta a tierra debe estar separado por lo menos 2 metros de cualquier otro electrodo, incluyendo a los que se utilizan para circuitos de señales de radio, pararrayos o cualquier otro propósito. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)
- El espaciamiento entre los sistemas eléctricos y el de captación de rayos, debe ser por seguridad de 2 metros, pero en sitios en los que esto no sea posible, los electrodos de puesta a tierra para los dos sistemas deben conectarse juntos a nivel o hajo el piso, con un conductor de cobre de una sección de 16 milímetros cuadrados. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)
- Los conductores de la varilla o captador de rayos para descargas atmosféricas, varillas y elementos usados como puesta a tierra del captor de rayos, no deben ser usados como puestas a tierra del sistema de alambrado y otros equipos. Se excluye de este punto, los sistemas de

tuberías metálicas de agua. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)

- Si existe una planta expuesta ³, se debe instalar protectores primarios. En circuitos con cables que tienen cubierta o pantalla metálica puesta a tierra que está sujeta a descargas atmosféricas, pero no a condiciones de planta expuesta. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)
- En los sistemas de distribución y de alambrado interior, especialmente si es a la intemperie, en áreas con alta densidad de descargas atmosféricas, también deben considerarse la protección contra descargas atmosféricas. La protección a instalar debe ser concebida, diseñada e implementada, según los principios de ingeniería y normas técnicas adecuadas. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006).
- Los dispositivos conectados a la red primaria y también los conectados a la red secundaria cuando sea aérea y tenga longitud mayor a 90 metros, o si la red secundaria no está conectada a tierra, deben tener dispositivos de protección adecuados contra descargas atmosféricas. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)
- La interconexión de todas las puestas a tierra tiene que incluir las tierras de los dispositivos de protección primarios y secundarios contra descargas atmosféricas. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)
- Cuando se ponen a tierra sistemas de alambrado, circuitos, equipos eléctricos, pararrayos u otros, las tierras deben ser dispuestas de tan manera que no se presenten corrientes permanentes indeseables en los conductores de puesta a tierra. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)
- Si se utilizan conductores aéreos expuestos para alimentar un cable con aislamiento mineral, se deben instalar pararrayos para limitar a 5kV el nivel de la onda de sobretensión del cable. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)
- Los pararrayos deben ser instalados en cada subestación de distribución, en lugares en los que son frecuentes las perturbaciones de tipo atmosférico y no se provee ningún otro tipo de protección. Deben ser aislados mediante elevación, encerrados o inaccesibles a personas no calificadas. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006).

³ Circuito o cualquier porción del mismo que está sujeto a descargas atmosféricas, tensiones de valor eficaz superiores a 300 V, debidas a contacto accidental con conductores eléctricos de iluminación o fuerza, inducción debida a operación desbalanceada de la línea de energía o fallas, y a elevaciones del potencial de tierra. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006, pág. 493)

- Para la instalación de pararrayos interiores deben ser ubicados alejados de los equipos que abarca su protección, de las zonas de tránsito peatonal y partes combustibles del edificio. Si son pararrayos que contienen aceite, debe estar en una habitación especial y propia. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)
- Para la instalación de pararrayos exteriores que contengan aceite, se deben proveer zanjas o sumideros para la descarga o absorción del aceite, así como un recubrimiento del piso donde se ubica el pararrayos mediante material aborvente. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)
- Cuando se utilizan bobinas de choque en conexión con pararrayos, las bobinas deben ser instaladas entre la derivación del pararrayos y el aparato a ser protegido. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006, pág. 303)
- La conexión entre el pararrayo y el conductor de línea debe ser con conductor sólido o cableado de cobre con sección no menor a 16 milímetros cuadrados, tan corto y recto como sea posible y libre de curvas agudas y de espiras. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006).
- El aislamiento contra tierra y contra los electrodos de descarga y las bobinas de choque, debe ser igual al aislamiento requerido en otras partes del circuito. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006).
- En los postes de madera, para los conductores de puesta a tierra de los pararrayos, deben proveerse de una cubiera que les brinde protección mecánica hasta una altura de 3 metros del piso, y de un material aislante. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006).
- Cuando se instalan pararrayos se permite que un mismo conductor de puesta a tierra y un electrodo común puedan ser usados para la puesta a tierra de los neutros primario y secundario de los pararrayos. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006).
- Si lo que se va a proteger es una subestación, los pararrayos deben conectarse a la puesta a tierra de la subestación con conductores de cobre con sección no menor de 70 milímetros cuadrados, deben ser tan cortos y directos como sea posible. Cuando se utilizan para la protección de cables de alta tensión, sus conductores de puesta a tierra deben conectarse a los terminales metálicos. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006).
- Si lo que se va a proteger es una estación receptora, debe proveerse un pararrayos en cada conductor de entrada desde una antena exterior hasta

la estación, a menos que el conductor esté protegido por una pantalla metálica continua. Así también, deben ubicarse entre el punto de entrada del conductor y el equipo de radio o transformador, tan cerca como sea posible del punto de entrada del conductor a la edificación. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)

- Si se va a proteger una estación transmisora, cada conductor de entrada entre la estación y una antena exterior debe estar provisto con pararrayos, a menos que la antena esté puesta a tierra. (Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú, 2006)

1.4.2 Definición

Según la norma IEC 61024, la definición de pararrayos es la siguiente: “Mástil metálico situado en la parte más alta de una construcción que deriva la corriente del rayo a tierra”. Para la NFPA 780 es “el componente de un sistema de protección contra el rayo que está proyectado para interceptar los rayos”. (Kisielewsky, 2000)

Al ver estos dos conceptos se conciben algunas ideas fundamentales para el presente trabajo, la principal de ellas el “poder de atracción” que tiene el pararrayos para con la descarga atmosférica. Este poder de atracción se cuantifica mediante la llamada “zona de protección”, cuya definición ha variado durante el paso de los años, por ejemplo, la de un cono circular de eje vertical con vértice en la punta del pararrayos. (Kisielewsky, 2000)

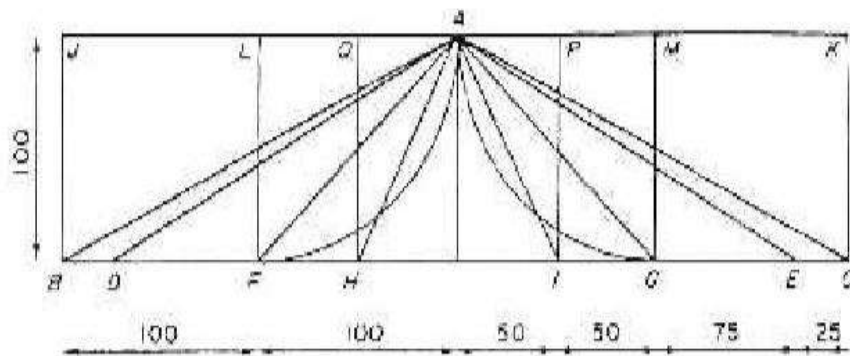


Imagen 20: Distintas zonas de protección utilizadas a través de los años por distintos autores.

Fuente: (Kisielewsky, 2000, pág. 18)

La especificación de la zona de protección depende de la corriente de cresta del primer impulso de retorno⁴, la cual no es unívoca sino que tiene una distribución estadística, deduciendo así que la zona de protección tampoco será unívoca. Es por esta razón, que para el cálculo de la zona de protección, debe tenerse en cuenta el grado de importancia y criticidad de la estructura a proteger, el cual es dado en diferentes métodos por las normativas que rigen el diseño de pararrayos. (Kisielewsky, 2000).

La definición de la zona se basa en el llamado “modelo electrogeométrico”.

1.4.3 El modelo electrogeométrico

Este modelo se hace válido únicamente para descargas descendentes negativas. Este tipo de descargas implican aproximadamente el 90% de ocurrencia a nivel mundial. (Kisielewsky, 2000).

Al iniciar la descarga en la parte baja de la nube, aparece el que se ha denominado “líder descendente” con dirección a la tierra. Ésta descarga forma un canal conductivo en su trayectoria de cargas negativas. (Kisielewsky, 2000)

Pueden distinguir las siguientes fuentes de campo en el desarrollo del proceso:

Tabla 4: fuentes de campo del proceso de descarga del líder descendente.

Fuente	Signo
Carga del líder descendente	Negativo
Carga del canal ionizado	Negativo
Carga inducida en el suelo y en el pararrayos	Positivo
Carga especial en la periferia del pararrayos	Positivo

Fuente: (Kisielewsky, 2000, pág. 19)

Cuando el líder descendente está bajando, el campo en la punta del pararrayos alcanza un valor crítico y se lanza el líder ascendente desde la punta del pararrayos. Por lo tal, es importante definir la distancia entre la punta del líder descendente y la punta del pararrayos, la cual se llamará “Distancia de impacto”. (Kisielewsky, 2000).

La distancia de impacto se define, según la NFPA 780, como: “Distancia sobre la cual ocurre la ruptura final del primer impacto”. Esta distancia es un parámetro clave ya que queda definido dónde impactará el rayo. La idea central es que la punta del líder descendente deberá encontrar al elemento protector a la distancia de impacto antes que la estructura protegida. A pesar de no estar demostrada la relación fundamentada

⁴ El primer impulso de retorno es el que se produce luego de la conexión entre el líder descendente que proviene de la nube y el líder ascendente que viene del pararrayos, el cual sirve para neutralizar la carga negativa contenida en la nube. (Kisielewsky, 2000, pág. 19)

teóricamente, algunos autores se atrevieron a dar una relación experimental (Kisielewsky, 2000):

$$d_s = 9.4 * \left(I_c^{\frac{2}{3}}\right)^5$$

Donde:

- d_s = distancia de impacto en metros
- I_c = corriente de cresta del primer impulso de retorno en kA

1.4.3.1 Aplicación del modelo electrogeométrico en el caso de un pararrayos Franklin.

A continuación se observa la imagen 21:

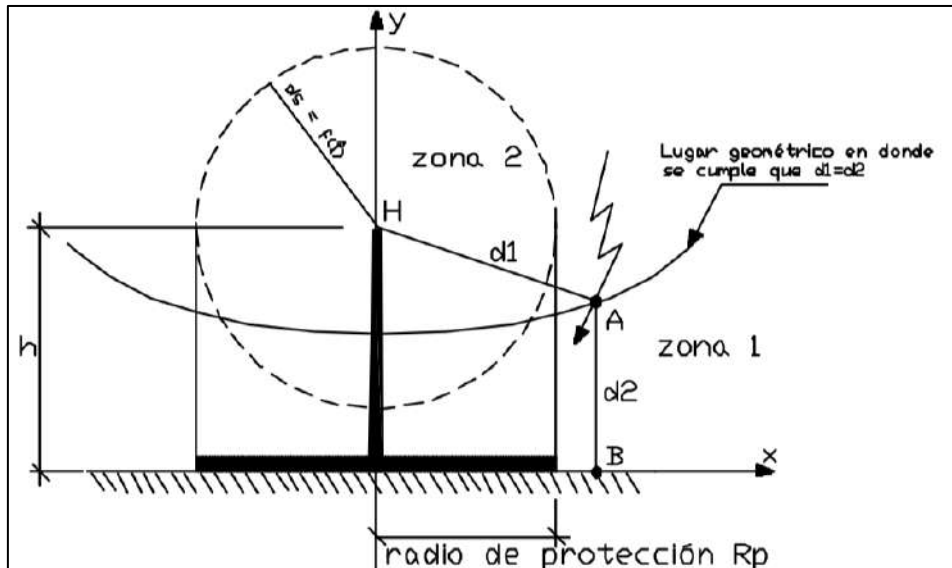


Imagen 21: Diagrama de principio para deducir el concepto de radio de captura o distancia de impacto en el modelo electrogeométrico normalizado.

Fuente: (Kisielewsky, 2000, pág. 22)

Se forma una parábola cuyo vértice está en la punta del pararrayos (punto H, que tiene coordenada $x=0$), y cuya directriz⁶ es el eje x, cuyos puntos están siempre equidistantes a la punta del pararrayos y del suelo, por ejemplo, el punto A que se especifica en la imagen, donde $d1 = d2$. La parábola se intercepta con el círculo de radio d_i formando dos zonas (Kisielewsky, 2000):

⁵ Relación entre la corriente de cresta del primer impulso de retorno y de la distancia de impacto. Fuente: (Internacional council on large electric systems, 2000)

⁶ La directriz es perpendicular al eje de simetría de una parábola y no toca la parábola. Si el eje de simetría de la parábola es vertical, la directriz es una recta horizontal.

- **Zona 1:** Los líderes descendentes cuyos extremos caigan dentro de esta zona estarán más cercanos del suelo que del extremo del pararrayos, por lo que no serán captados por el pararrayos y serán atraídos hacia la tierra. (Kisielewsky, 2000)
- **Zona 2:** Los líderes que se vean involucrados en esa zona, serán atraídos por el equipo de pararrayos. Para que el líder sea captado por este, además de estar a igual o menor distancia de la punta del pararrayos, debe estar dentro de la zona delimitada por el radio d_s . (Kisielewsky, 2000)

Por ejemplo, siguiendo la imagen 21, si un rayo cae en el punto A, el rayo podría caer o bien en el suelo o en el pararrayos, pero, al estar fuera de la zona 2, se deduce que irá hacia la tierra. (Kisielewsky, 2000).

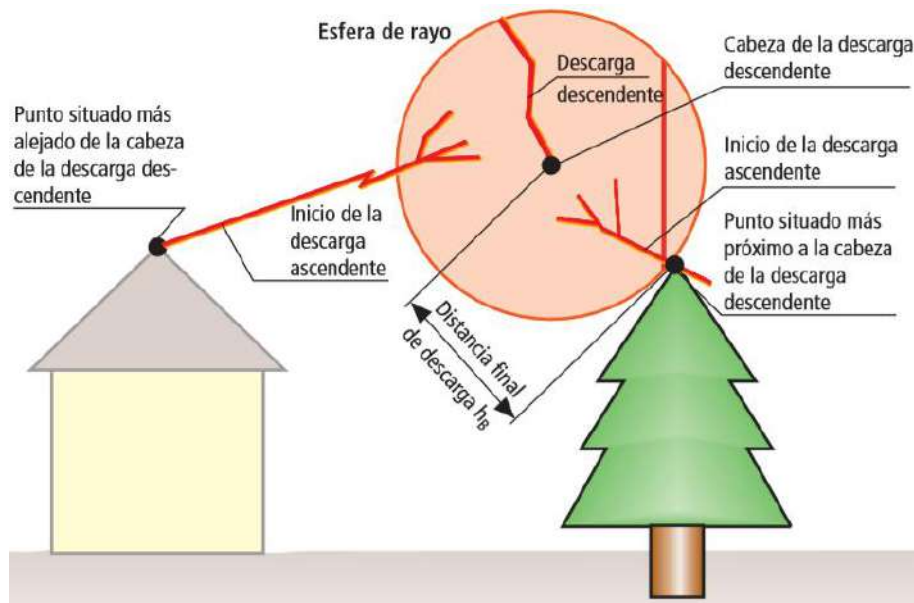


Imagen 22: Descarga inicial ascendente que determina el lugar en que va a caer el rayo.

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 49)

También se puede observar en la imagen 21 el “radio de protección” o R_p , el cual es la proyección del d_s sobre el suelo, y que entra dentro de la zona 2. Este radio de protección, es importante para deducir el área de protección del pararrayos:

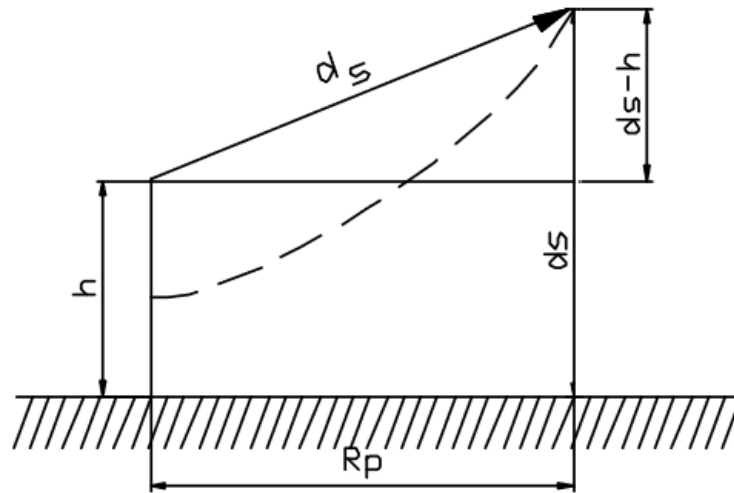


Imagen 23: Diagrama para deducir la magnitud del radio de protección R_p en el modelo electrogeométrico normalizado.

Fuente: (Kisielewsky, 2000, pág. 23)

- Si se cumple que $d_s > h$:

$$R_p^2 + (d_s - h)^2 = d_s^2$$

$$R_p^2 + d_s^2 - 2d_s h + h^2 = d_s^2$$

$$R_p = \sqrt{2d_s h - h^2}$$

- Si $d_s \leq h$ se cumple que:

$$R_p = d_s$$

Por lo tanto, se puede concluir que el radio de protección es función de la altura del pararrayos h , y que, a igualdad de corriente de cresta, el radio de protección aumenta con el aumento de h . (Kisielewsky, 2000, pág. 23)

1.4.3.2 Aplicación del modelo electrogeométrico según las normas de aplicación correspondientes: el método de la esfera rodante

Este método práctico de posicionamiento de un sistema de pararrayos sobre la estructura se utiliza para establecer el área de protección de las puntas. Consiste en rodar una esfera imaginaria sobre la tierra aledaña al edificio, alrededor y encima del mismo. Se debe rodar tal esfera desde el nivel de la tierra hacia la estructura e instalar una terminal aérea en el punto de contacto con la estructura. (Flores, 2010)

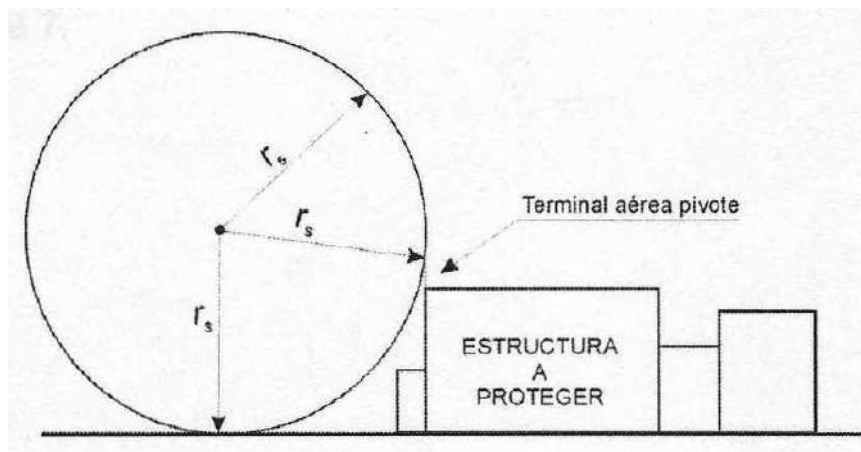


Imagen 24: Esquema del método de la esfera rodante desde una vista de planta.

Fuente: (Flores, 2010)

Este terminal se conoce como pivote, y su altura debe ser tal para asegurar que la esfera no tenga contacto con la estructura cuando esta se apoye sobre la tierra y sobre la punta del terminal área pivote. Debe seguirse rodando la esfera sobre la estructura a proteger pero sobre el plano a la altura del terminal pivote, poniendo un terminal en cada uno de los puntos en los que la esfera necesite un apoyo y así no tocar la estructura. Se debe repetir el proceso hasta cubrir todo el edificio. (Flores, 2010)

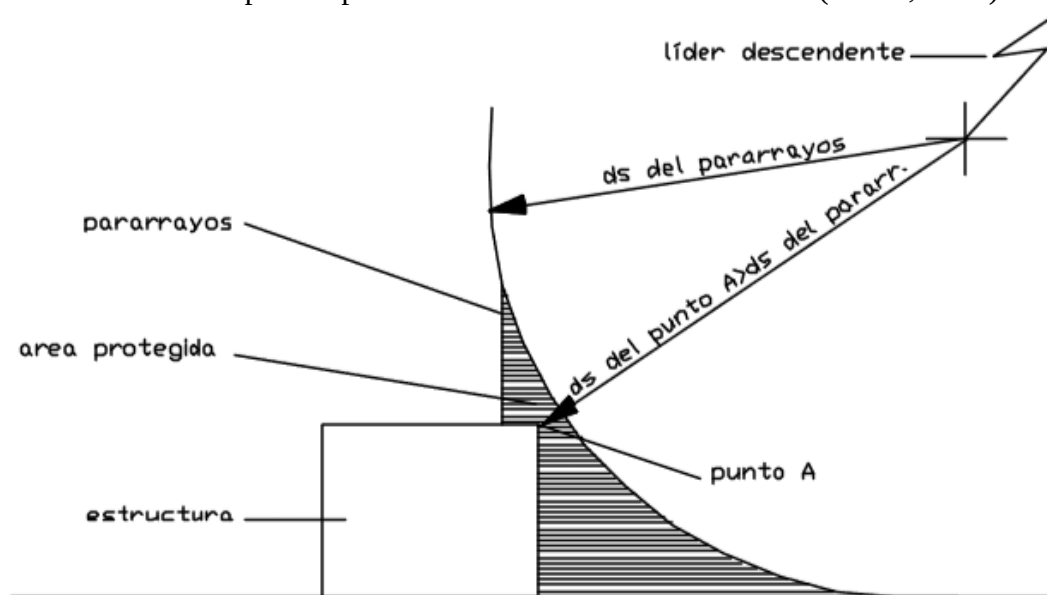


Imagen 25: Diagrama para ilustrar la zona de protección de un pararrayos único, según el modelo electrogeométrico normalizado.

Fuente: (Kisielewsky, 2000, pág. 24)

Si se observa la imagen 25, se puede apreciar que el centro de la esfera imaginaria es la punta del líder descendente, y que la distancia entre ese centro y la

estructura debe ser mayor que la distancia de impacto del pararrayos d_s que se trató en el punto anterior.

En la imagen 25 se observa también que el área o volumen achurado, que se encuentra entre la esfera y los puntos de tangencia del pararrayos y el suelo, se le llama volumen protegido. El posicionamiento del sistema de pararrayos será efectivo siempre y cuando toda la estructura quede comprendida entre el volumen protegido.

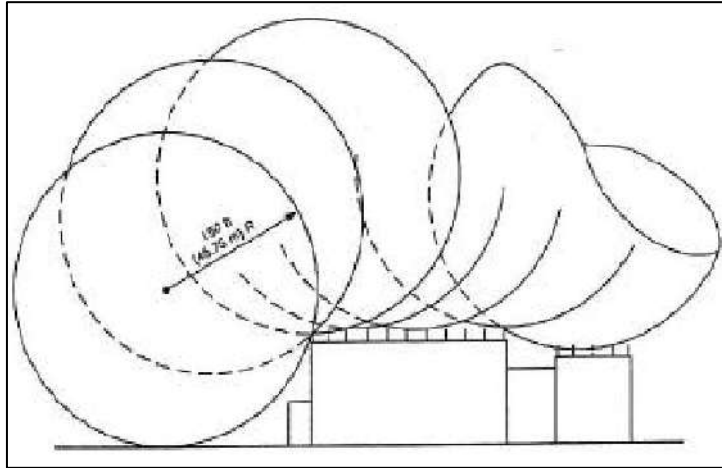


Imagen 26: Aplicación del método de la esfera rodante según la norma NFPA 780 a una estructura compuesta.

Fuente: (Kisielewsky, 2000, pág. 25)

Destaca también que, cuanto más pequeña sea la distancia de impacto elegida⁷, tanto menor será la zona de protección para un pararrayos, por lo que aumentará el número de equipos de atracción de rayos. (Kisielewsky, 2000)

Es también, el método más utilizado internacionalmente para las estructuras con arquitectura compleja. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

⁷ La distancia de impacto la elige el diseñador en base a ciertos conceptos como la asignación de riesgo, el nivel de protección de la estructura a proteger, experiencia propia o siguiendo al pie de la letra una normativa internacional, así como se verá en el presente trabajo.

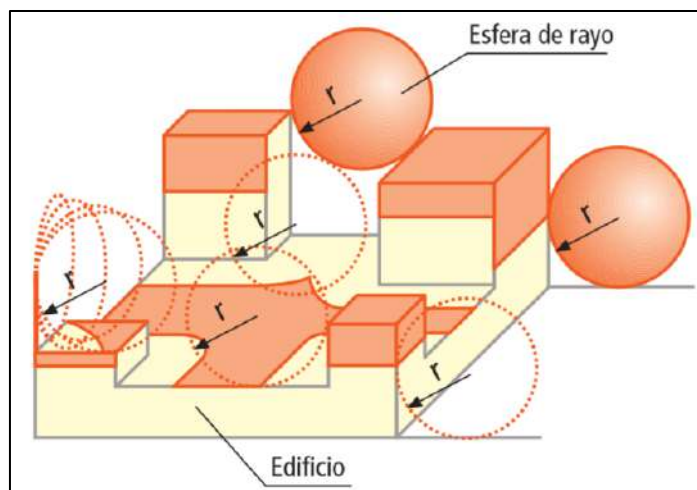


Imagen 27: Aplicación esquemática del método de la “esfera rodante” en un edificio con superficie muy irregular.

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 50)

Por ejemplo, se han realizado distintos proyectos utilizando este método:

- **Nuevo edificio de la administración en Munich:**

En los lugares en los que la esfera de rayo toca partes del edificio puede producirse una descarga directa del rayo con el correspondiente valor mínimo de corriente de cresta de 3kA. Por esta razón, en estos puntos de contacto se necesita poner dispositivo captador. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).



Imagen 28: Edificio administrativo de nueva construcción: Modelo con esfera rodante.

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 51)

- **Catedral de Aquisgrán (Alemania):**

La catedral se encuentra situada en el casco antiguo de la ciudad y está rodeada de altos edificios, los cuales aportan una protección contra las descargas del rayo. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

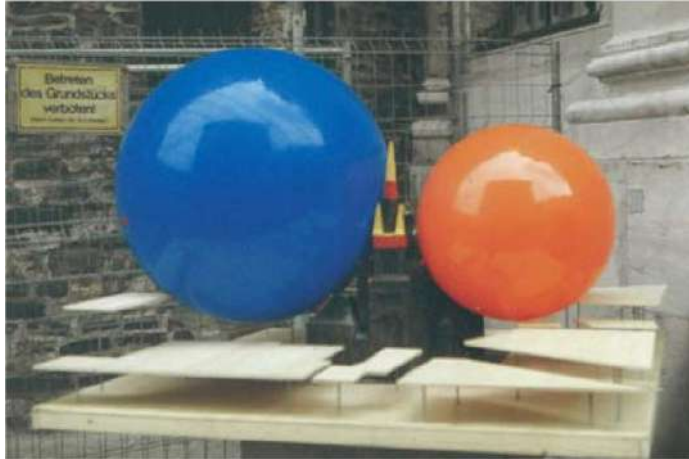


Imagen 29: Catedral de Aquisgrán: Modelo con entorno y esferas de rayo.

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 51)

1.4.3.3 Profundidad de penetración de la esfera rodante

Este concepto es determinante en el dimensionado de los dispositivos captadores para un edificio o para una instalación dispuesta sobre la cubierta. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

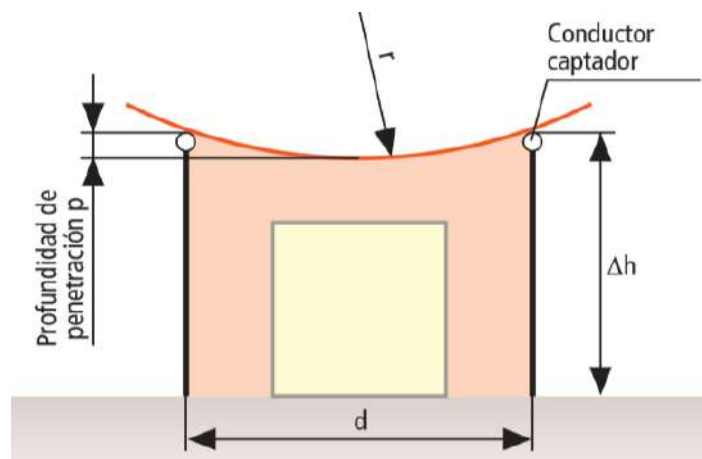


Imagen 30: Profundidad de penetración de la esfera rodante.

Fuente: (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007, pág. 52)

Con la siguiente fórmula se puede calcular la profundidad de penetración:

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

Siendo

r: radio de la esfera rodante

d: distancia entre dos puntas captadoras

p: profundidad de penetración

La altura de las puntas captadora debe ser superior a la profundidad de penetración, ya que con esta altura se garantiza que la esfera rodante no llegue a tocar el objeto que se pretende proteger. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Incluso, en algunos proyectos, se especifica que, como hay tránsito fluído de personas en el techo, se pide un plano de 2 o 3 metros de protección por encima del límite del techo, para así proteger a las personas que realicen trabajos en la superficie externa del edificio.

1.4.3.4 Cálculo del área protegida

Deben ser analizados dos casos, como se especificó anteriormente:

- Si $d_s \leq h$:

La esfera tendrá siempre un radio $d_s = R_p$

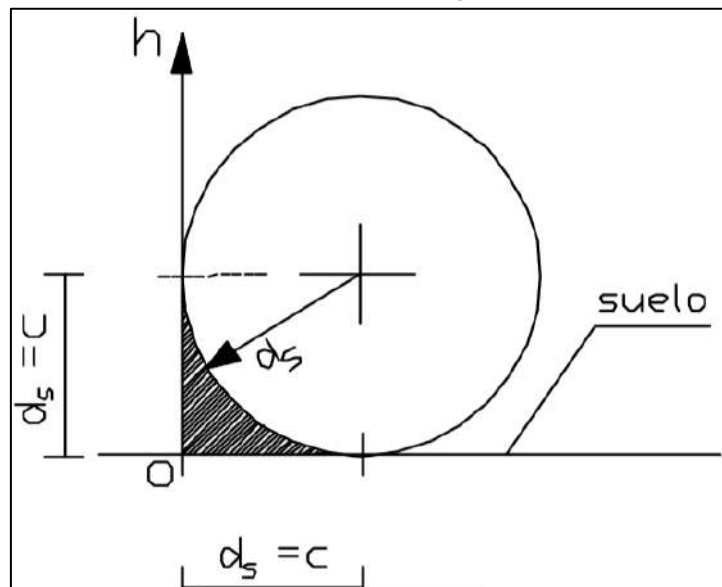


Imagen 31: Caso en el que $d_s \leq h$.

Fuente: (Kisielesky, 2000, pág. 27)

Para encontrar el área protegida achurada, se procederá geoméricamente:

$$\begin{aligned} \text{área protegida} &= \\ &(\text{área del cuadrado } d_s * d_s) - (\text{área del sector circular}) \end{aligned}$$

$$\text{área protegida} = d_s^2 - \frac{\pi * d_s^2}{4}$$

- Si $d_s > h$, se tendrá:

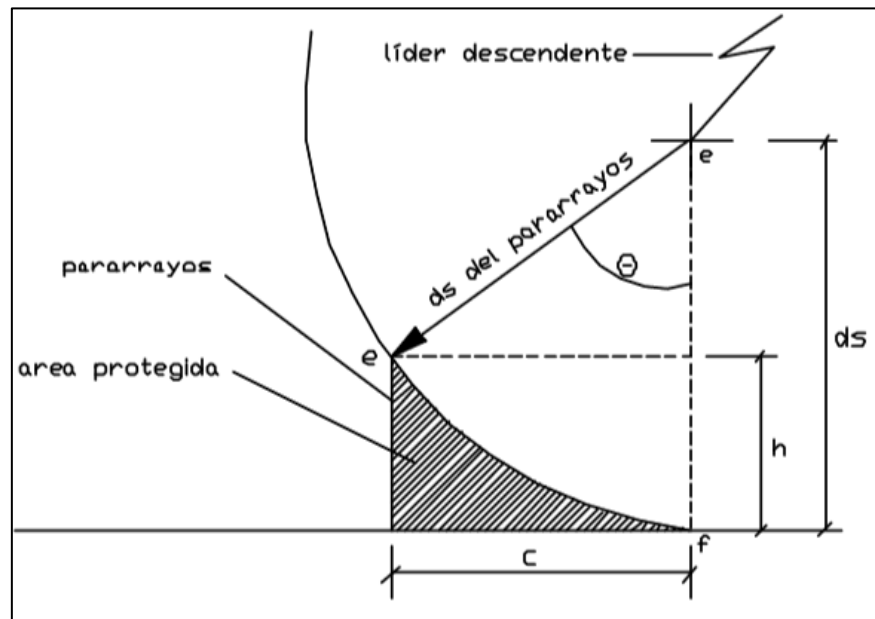


Imagen 32: Gráfico para la deducción del área protegida y de la distancia horizontal de radio de protección.

Fuente: (Kisielesky, 2000, pág. 27)

$$R_p = \sqrt{2d_s h - h^2}$$

$$\begin{aligned} \text{área protegida} &= (\text{área del rectángulo } h * c) \\ &+ (\text{área del triángulo d e f}) \\ &- (\text{área del sector circular e c d}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{área protegida} &= R_p h + d_s \frac{d_s - h}{2} - \frac{d_s^2 q}{2} \\ \text{siendo } q &= \arcsen \left(\frac{R_p}{d_s} \right) \end{aligned}$$

1.4.3.5 Comportamiento de las funciones respecto a la distancia de impacto

A continuación, se verá cómo se comportan las funciones al darles valores aleatorios pero que sean coherentes con la realidad. Primero se resumirán las funciones:

- Si $d_s \leq h$:
 - $R_p = d_s$
 - $A_{protegida} = d_s^2 - \frac{\pi * d_s^2}{4}$
- Si $d_s > h$:
 - $R_p = \sqrt{2d_s h - h^2}$
 - $A_{protegida} = (R_p * h) + \frac{d_s}{2} * (d_s - h - (d_s * q))$

Para hacer la simulación, se va a definir valores estables para la altura del pararrayos y de la distancia de impacto.

La distancia de impacto depende de la corriente de cresta, la que según (Kisielesky, 2000, pág. 23), un mínimo valor es 3kA. Se harán varias posibilidades, utilizando entre 3kA y 10kA, para ver el efecto desde un mínimo valor de corriente hasta mucho más fuerte.

$$d_s = 9.4 * \left(I_c^{\frac{2}{3}} \right)$$

$$d_s = 9.4 * \left(3^{\frac{2}{3}} \right) = 19.55 \text{ m}$$

$$d_s = 9.4 * \left(10^{\frac{2}{3}} \right) = 43.63 \text{ m}$$

La altura del pararrayos dependerá del diseño, por lo cual se decide fijarla en 4 metros debido a que, entre los encontrados en el mercado o en utilización en distintas estructuras, es un promedio comercial.

$$h = 4 \text{ m}$$

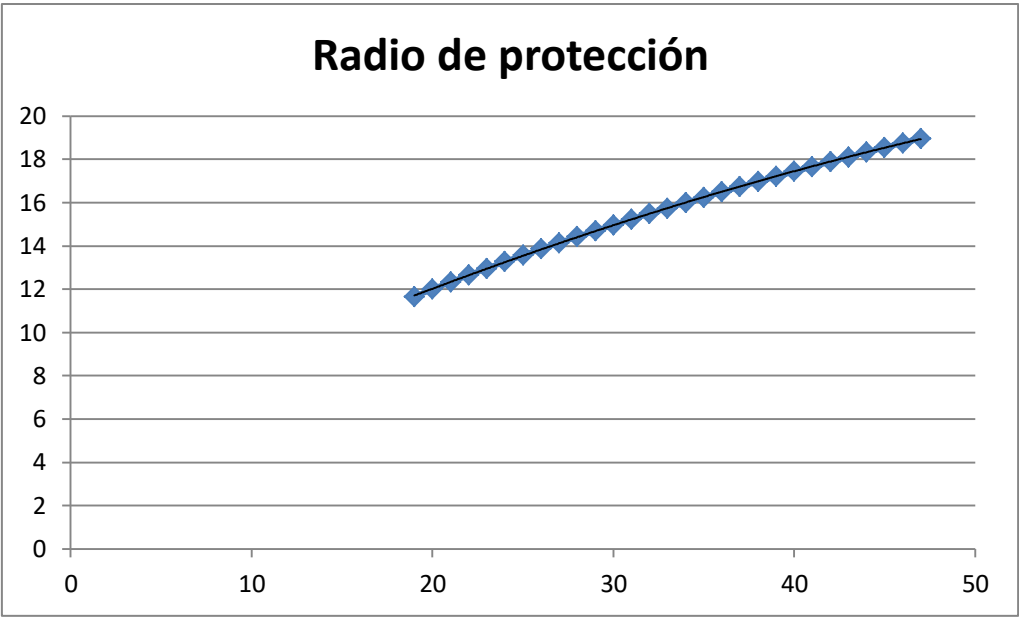


Imagen 33: Comportamiento del radio de protección con la distancia de impacto para el caso de $d_s > h$.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Valores dados a la distancia de impacto y resultados del radio de protección graficados.

Ds	Rp	Ds	Rp
19	11.661904	33	15.748016
20	12	34	16
21	12.328828	35	16.248077
22	12.649111	36	16.492423
23	12.961481	37	16.733201
24	13.266499	38	16.970563
25	13.56466	39	17.204651
26	13.856406	40	17.435596
27	14.142136	41	17.663522
28	14.422205	42	17.888544
29	14.696938	43	18.11077
30	14.96663	44	18.330303
31	15.231546	45	18.547237
32	15.491933	46	18.761663
		47	18.973666

Fuente: Elaboración propia.

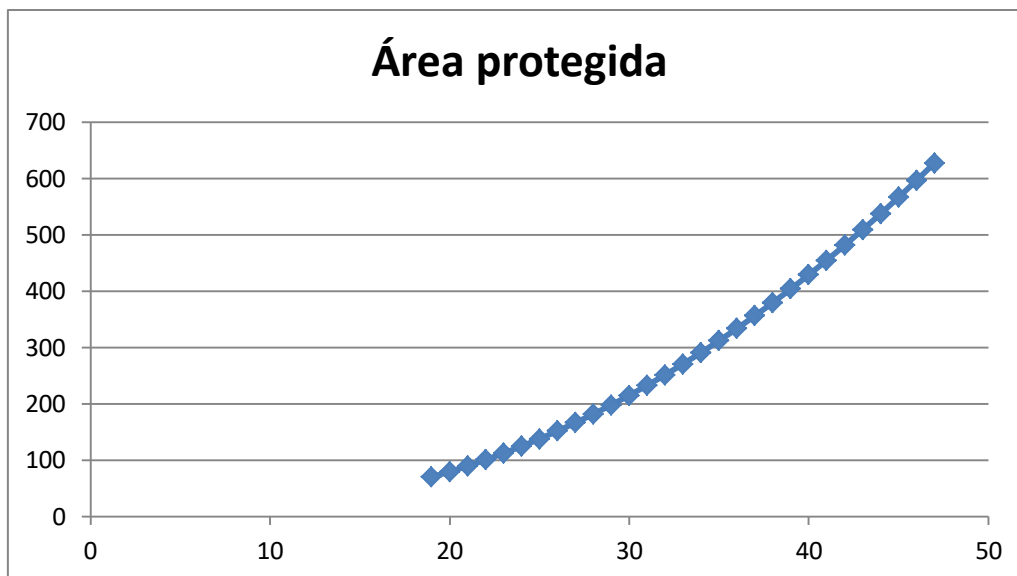


Imagen 34: Comportamiento del área protegida con la distancia de impacto para el caso de $d_s > h$.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Valores dados a la distancia de impacto y resultados del área protegida graficados.

Ds	A	Ds	A
19	69.8650393	33	270.614149
20	79.2997782	34	290.804665
21	89.4613141	35	311.798179
22	100.358196	36	333.597992
23	111.998226	37	356.207247
24	124.38856	38	379.628937
25	137.535795	39	403.865922
26	151.446032	40	428.920934
27	166.124942	41	454.796585
28	181.577806	42	481.495383
29	197.809565	43	509.01973
30	214.824848	44	537.371934
31	232.62801	45	566.554215
32	251.223152	46	596.568708
		47	627.417471

Fuente: Elaboración propia

Se concluye entonces que si se desea proteger la estructura cerca del pararrayos, se debe estar dentro del área protegida. Sin embargo, una pequeña disminución en la

distancia de impacto (variable, dependiente de la corriente de cresta del rayo), podría reducir considerablemente el radio de protección y el área protegida.

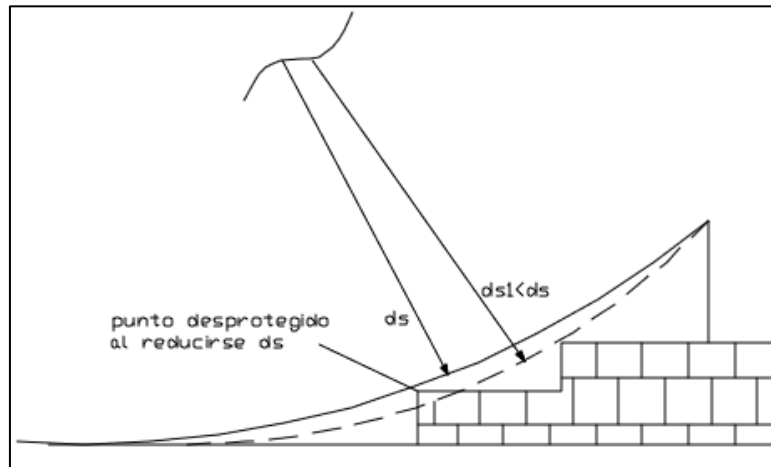


Imagen 35: Punta desprotegida de la estructura debido a que la distancia del impacto del rayo es menor de la diseñada.

Fuente: (Kisielewsky, 2000, pág. 31)

1.4.4 Tipos de pararrayos

Tabla 7. Tipos de pararrayos, con sus pros y contras.

Equipo	Descripción	Aspectos positivos	Aspectos negativos
Punta captadora	Llamado también Pararrayos Franklin. Los más conocidos e inventados por Benjamín Franklin en 1749.	Simplicidad y bajo coste, fácil instalación y pueden formar parte de mallas conductoras o jaulas de Faraday.	Dependen de un buen mantenimiento del sistema de pararrayos.
PDC	Poseen un dispositivo electrónico que emite impulsos de alta frecuencia, ionizando el aire, lo cual garantiza la creación de un camino para la descarga del rayo.	Garantía de máxima durabilidad, fácil instalación y funcionamiento óptimo en cualquier condición atmosférica.	Se necesita verificar los certificados de calibración del avance del cebado. A veces, se necesita una fuente auxiliar de energía.
Dieléctrico	Creados para que exista una diferencia de potencial entre dos partes del pararrayos	Son libres de mantenimiento. Son mucho más costosos que las puntas Franklin.	Baja capacidad de almacenar energía. Su eficiencia no ha podido ser verificada bajo el protocolo de la NFC 17102.
Radiactivo	Ioniza el aire mediante el isótopo 241, y así logra el avance del cebado.	Tienen larga vida y están siempre activados.	Debido a su naturaleza, está actualmente prohibida su comercialización en el mundo.

Fuente: (CIRPROTEC, 2007) y (Ingesc Lightning Solutions, 2016).

1.4.4.1 Puntas Captadoras

Se va a profundizar en este tipo de pararrayos, debido a que es el que se utilizará a futuro en el diseño, por ser el que está aprobado según la norma NFPA 780.

Las puntas captadoras o puntas Franklin son ideales para la protección externa. Se fabrican en acero inoxidable AISI 316L o en cobre.

- **Puntas captadoras simples:** Se integran directamente sobre la pieza de adaptación.



Imagen 36: Punta captadora simple de cobre.

Fuente: (Ingesco Lightning Solutions, 2016)

Son usualmente fabricadas entre 16 mm y 20 mm de diámetro con longitudes de entre 300 mm a 2000 mm.

- **Punta captadora múltiple:** Utiliza el efecto punta⁸, por el cual las cargas alrededor de un conductor se acumulan en los puntos más afilados.

⁸ Cuando los conductores metálicos terminan en punta, se acumula mucha carga en ellas, la densidad de carga es muy alta y en las proximidades se crea un intenso campo que ioniza el aire. En la punta del pararrayos se ioniza el aire y por esa parte, que conduce mejor que el resto, se desplaza el rayo. (Teleformación, s/f)



Imagen 37: Punta captadora múltiple de cobre.

Fuente: (Ingesco Lightning Solutions, 2016)

1.4.5 Materiales

Como es de esperar, los materiales conductores y que soporten las temperaturas inducidas por la corriente, son de vital importancia para el funcionamiento correcto de los dispositivos de protección atmosférica exterior.

A pesar de que se ha visto en algunos catálogos de la web que se ofrecen puntas de Franklin de acero inoxidable, la norma NFPA, que rige el presente trabajo, considera únicamente dos materiales, el cobre y el aluminio.

- **Cobre (Cu):** El cobre pertenece al mismo grupo en la tabla periódica que la plata y el oro, los cuales son resistentes a la corrosión y relativamente inertes. Cuenta con la mejor conductividad eléctrica de todos los metales de uso común, solo superado por la plata. También, es un excelente conductor del calor por lo que es idóneo para aplicaciones en las que se necesita una rápida transferencia de calor. (Instituto Europeo del Cobre).
- **Aluminio (Al):** El aluminio puro no tiene mayores aplicaciones industriales, debido a que es un material muy blando, sin embargo con aleaciones como el cobre, silicio, magnesio, zinc y manganeso, se forman compuestos importantes para la industria eléctrica. Es un elemento muy resistente a la corrosión y con una excelente conductividad eléctrica. (Inge Mecánica, s/f)

Tabla 8. Requerimientos de los distintos tipos de conductor según el material a utilizar clase I.

Tipo de conductor	Parámetro	Cobre		Aluminio	
		U.S.	SI	U.S.	SI
Terminal aéreo sólido	Diámetro	3/8 in	9.5 mm	1/2 in	12.7 mm
Terminal aéreo tubular	Diámetro	5/8 in	15.9 mm	5/8 in	15.9 mm
	Espesor de pared	0.033 in	0.8 mm	0.064 in	1.63 mm
Cable conductor principal	Tamaño de cada hebra	17 AWG	1.04 mm ²	14 AWG	2.08 mm ²
	Peso por longitud	187 lb/1000 ft	278 g/m	95 lb/1000 ft	141 g/m
	Área de la sección transversal	57,400 cir. Mils	29 mm ²	98,600 cir. Mils	50 mm ²
Cable conductor conector (sólido o armado)	Tamaño de cada hebra	17 AWG	1.04 mm ²	14 AWG	2.08 mm ²
	Área de la sección transversal	26,240 cir. Mils	13.3 mm ²	41,100 cir. Mils	20.8 mm ²
Conductor conector de banda sólida	Espesor	0.051 in	1.30 mm	0.064 in	1.63 mm
	Ancho	1/2 in	12.7 mm	1/2 in	12.7 mm
Conductor principal de banda sólida	Espesor	0.064 in	1.30 mm	0.064 in	1.63 mm
	Área de la sección transversal	115,000 cir. Mils	29 mm ²	98,600 cir. Mils	50 mm ²

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 10)

Tabla 9: Requerimientos de los distintos tipos de conductor según el material a utilizar clase II.

Tipo de conductor	Parámetro	Cobre		Aluminio	
		U.S.	SI	U.S.	SI
Terminal aéreo sólido	Diámetro	1/2 in	12.7 mm	5/8 in	15.9 mm
Cable conductor principal	Tamaño de cada hebra	15 AWG	1.65 mm ²	13 AWG	2.62 mm ²
	Peso por longitud	375 lb/1000 ft	558 g/m	190 lb/1000 ft	282 g/m
	Área de la sección transversal	115,000 cir. Mils	58 mm ²	192,000 cir. Mils	97 mm ²
Cable conductor conector (sólido o armado)	Tamaño de cada hebra	17 AWG	1.04 mm ²	14 AWG	2.08 mm ²
	Área de la sección transversal	26,240 cir. Mils	13.2 mm ²	41,100 cir. Mils	20.8 mm ²
Conductor conector de banda sólida	Espesor	0.051 in	1.30 mm	0.064 in	1.63 mm
	Ancho	1/2 in	12.7 mm	1/2 in	12.7 mm
Conductor principal de banda sólida	Espesor	0.064 in	1.63 mm	0.1026 in	2.61 mm
	Área de la sección transversal	115,000 cir. Mils	58 mm ²	192,000 cir. Mils	97 mm ²

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 10)

1.4.6 Inspección y mantenimiento

1.4.6.1 Tipos de inspección y cualificación de los inspectores

Se debe coordinar un programa de mantenimiento con el proyectista o el constructor del sistema de protección contra rayos, y debe hacerlo un técnico con formación especializada (en la hoja suplementaria 3 de la norma UNE EN 62305-2 se describen diferentes exigencias que se plantean para considerarse calificado). (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

Existen diferentes tipos de inspección:

- **Inspección del diseño:** Debe garantizar que corresponde en todos los aspectos con el estado actual de la normativa vigente. Se debe realizar antes de la ejecución del proyecto. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).
- **Inspecciones durante la construcción:** La inspección se especializa en los elementos que no será posible verificarlos una vez culminada la construcción, como las tomas de tierra de cimientos, las uniones de las armaduras, los derivadores sus conexiones en el hormigón, etc. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)
- **Inspección de recepción:** Se verifica el diseño y la ejecución técnica, teniendo en cuenta el destino o uso del edificio, su equipamiento y las condiciones donde se ubica y sus alrededores. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)
- **Inspección complementaria:** Un sistema de protección debe revisarse cuando se modifica el uso del edificio, se cambia la estructura del mismo, existen ampliaciones o reparaciones, etc. Si se ha tenido una descarga de rayo, también debe realizarse esta inspección. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

1.4.6.2 Medidas de inspección

Las mediciones se realizan para comprobar la conductividad de las conexiones y el estado de la instalación de toma de tierra.

- **Conductividad de las conexiones:** Si todas las conexiones y uniones de dispositivos captadores, derivaciones, cables de compensación de potencial y las medidas de protección tienen un valor menos a 1 Ohmio. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).
- **Estado de la instalación de toma de tierra:** Se mide la resistencia de paso a la instalación de toma de tierra, en los puntos de medida se comprueba que la conductividad de los conductores y las conexiones van

acorde a la normativa, valores dados según la criticidad del edificio y su uso. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007)

Los resultados de estas mediciones deben compararse con las de las inspecciones iniciales o anteriores. Si difieren mucho, se realizan inspecciones complementarias.

1.4.6.3 Mantenimiento

El mantenimiento será fundamental para que las mediciones e inspecciones realizadas tengan resultados óptimos.

Las inspecciones correspondientes deberían fijarse con una frecuencia específica, que depende de las condiciones atmosféricas y medioambientales del proyecto, efectos de descargas directas de rayos y de la clase de edificio que se está protegiendo. (Dehn + Söhne: Blitzplaner, 2007).

Un buen mantenimiento al sistema de pararrayos debería incluir, según Dehn + Söhne: Blitzplaner en el año 2007 :

- Comprobación de la integridad física y de la conductividad eléctrica de los conductores y componentes del sistema.
- Medición de la resistencia de la instalación de toma a tierra.
- Fijar nuevamente componentes y conductores.

Capítulo 2

Procedimiento de diseño de un sistema de protecciones atmosféricas externo bajo la norma NFPA 780

2.1 General

En grandes rasgos, para hacer un diseño óptimo de un sistema de protección contra rayos, se deben seguir los siguientes tres procesos especificados en la imagen 38:



Imagen 38: Diagrama de flujo del diseño de un sistema de pararrayos.

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Recopilación de datos

Así comienza el proceso, el cual todo diseñador debe tener muy claro. Para poder afrontar los dos procesos consiguientes, el autor considera que debe saber responderse concretamente y con fundamentos, las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las dimensiones del edificio?
- ¿Existen elementos más altos alrededor de él?
- ¿De qué material es el techo y la estructura?
- ¿Es de gran valor y utilidad para su dueño o sus usuarios?
- ¿Posee material combustible en su interior?

- ¿Tiene importancia cultural o histórica?
- ¿Suele estar habitado por gente?
- ¿Sus usuarios están entrenados para una evacuación en caso de incendio?
- ¿Es primordial la continuidad de su servicio?
- Su destrucción, ¿Traería fuertes consecuencias al medio ambiente?

En la medida en que estas preguntas sean resueltas, se podrá continuar con el proceso de diseño.

2.3 Estudio de riesgo de descarga

El estudio de análisis de riesgo y factibilidad se encuentra en el anexo L de la norma NFPA 780 versión 2014. Este es un conjunto de pasos y directivas que brindan al constructor un sustento a la hora de decidir si considerar la protección atmosférica en la estructura. Este debe ser el primer paso antes de construir el sistema de pararrayos, una vez que el nivel del riesgo se ha determinado, se puede considerar la instalación del mismo.

En la imagen 39 se presenta un resumen del proceso para saber si un LPS, es decir un Lightning Protection System, o Sistema de protección contra rayos en español, es opcional o recomendado según la NFPA 780, 2014, Anexo L.

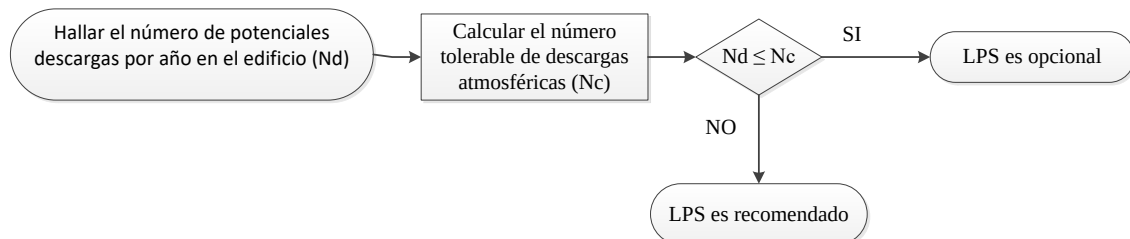


Imagen 39: Diagrama de flujo del estudio de riesgo de descarga

Fuente: Elaboración propia

2.3.1 Potenciales descargas sobre el edificio en un año.

El potencial de descarga sobre el edificio en un año se determina con la siguiente ecuación:

$$N_d = (N_g) * (A_e) * (C_1) * (10^{-6}) = \text{eventos potenciales/año}$$

Dónde:

- N_d : promedio de descargas al año, esto se hallará de la ecuación anterior.
- N_g : descargas en zona geográfica por año, se obtiene del mapa isoceráunico.

- A_e : Área colectiva equivalente de la estructura, el cual se determinará más adelante en el presente capítulo.
- C_1 : Coeficiente del ambiente, se obtendrá en este mismo capítulo más adelante.

En la imagen 40 se grafica el diagrama de flujo para encontrar N_d y luego se explicará cada uno de los subprocesos.

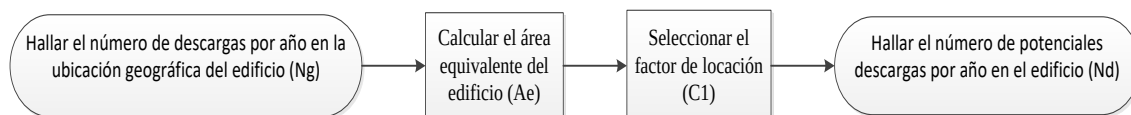


Imagen 40: Diagrama de flujo del número de potenciales descargas por año en el edificio.

Fuente: Elaboración propia

2.3.1.1 Número de descargas por año en la ubicación geográfica del edificio

El mapa isoceráunico es donde se muestra geográficamente los niveles ceráunicos, es decir, el número promedio de días al cabo del año en los que hay tormenta⁹. Las líneas isoceráunicas son aquellas que delimitan áreas territoriales con un mismo nivel ceráunico, las cuales cada una tiene un valor. (Orbea, 2015)

A continuación se presenta en la imagen 43, el mapa isoceráunico del Perú:

⁹ Se considera tormenta a aquel en el que al menos se oye un trueno. (Orbea, 2015)

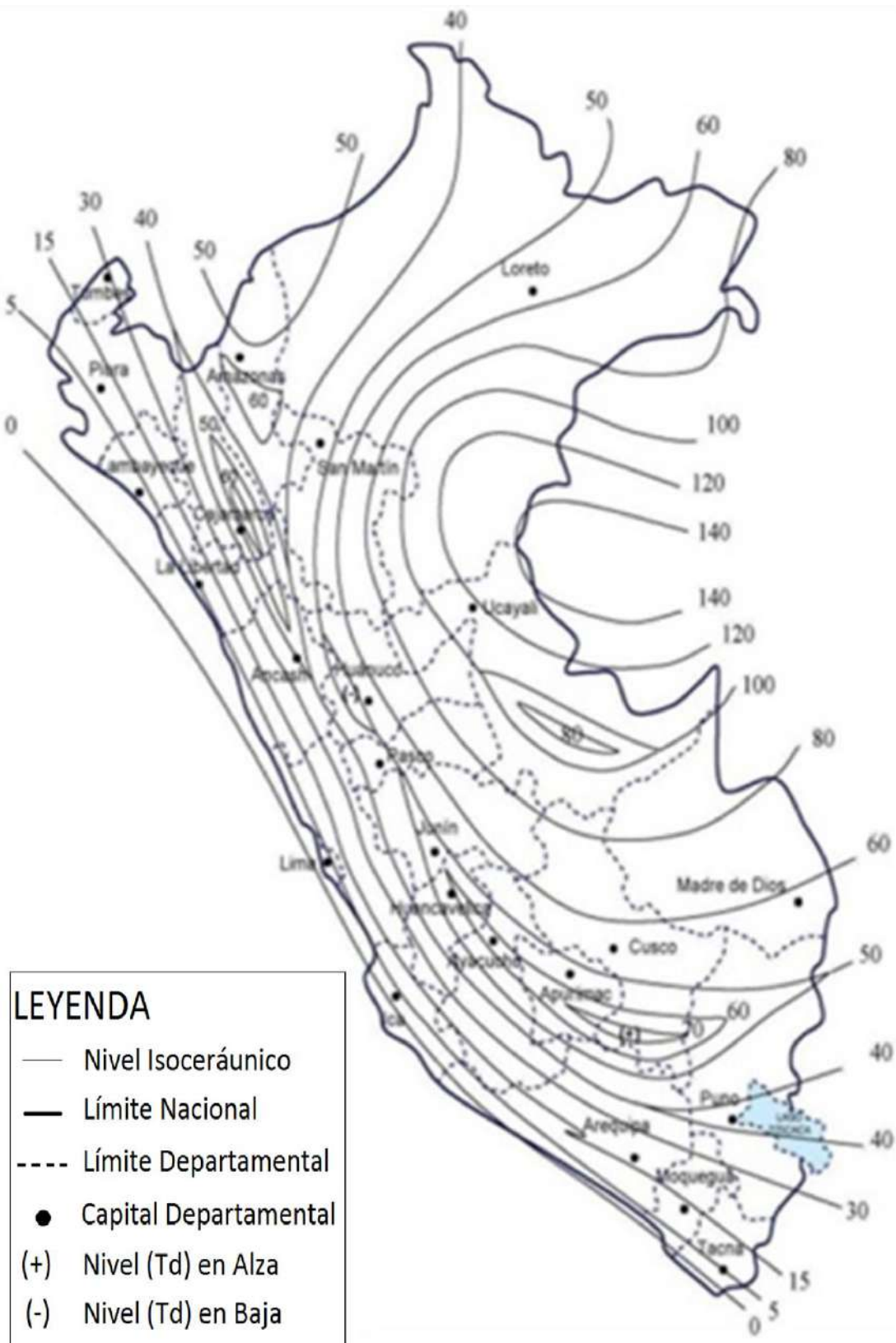


Imagen 41: Mapa isoceráunico del Perú

Fuente: (Yanque M, 2005)

2.3.1.2 Área colectiva equivalente del edificio

Se refiere al área equivalente que haría vulnerable al edificio si cayera en esta. Se obtiene de forma matemática o gráficamente. (NFPA 780, 2014, Anexo L)

- Matemática:

$$A_e = LW + 6H(L + W) + \pi 9H^2$$

Donde L y W son los lados laterales de la edificación, y H es la altura.

Es importante mencionar que esta fórmula es sólo aplicable para edificios rectangulares, como el ejemplo del Edificio E. Así mismo, el resultado que se da estará en metros cuadrados si todas las variables son ingresadas en metros.

- Gráfica:

Se obtiene extendiendo una línea con una pendiente en relación de 1 a 3, desde la parte superior de la estructura hasta el suelo. Se traza así con todo el perímetro del edificio, quedando de la manera como muestra las imágenes 42, 43 y 44 dependiendo si se tiene un techo plano o desniveles en él, como una antena, una torre de señal o simplemente una primera planta de más área que la segunda.

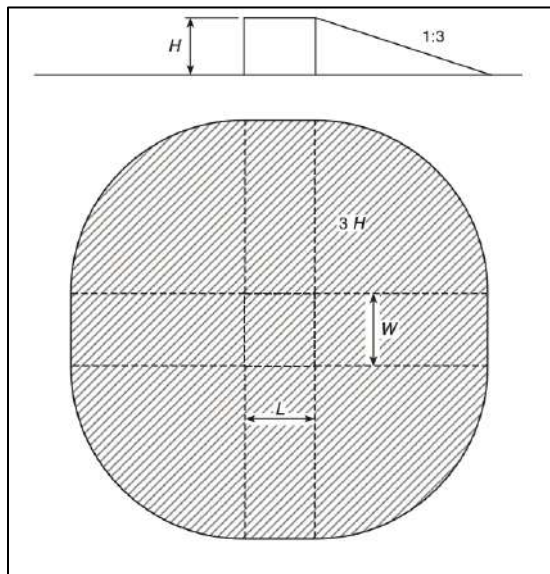


Imagen 42: Cálculo del área colectiva equivalente.

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 67
Anexo L)

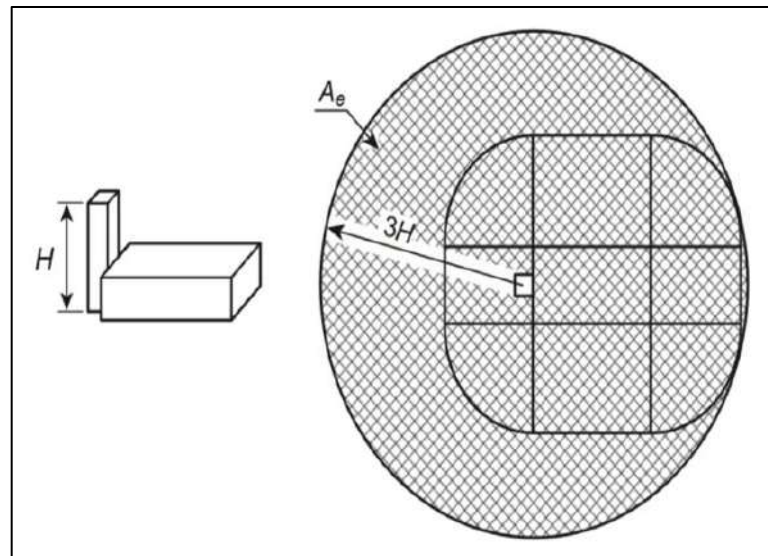


Imagen 43: Cálculo de área equivalente

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 67 Anexo L)

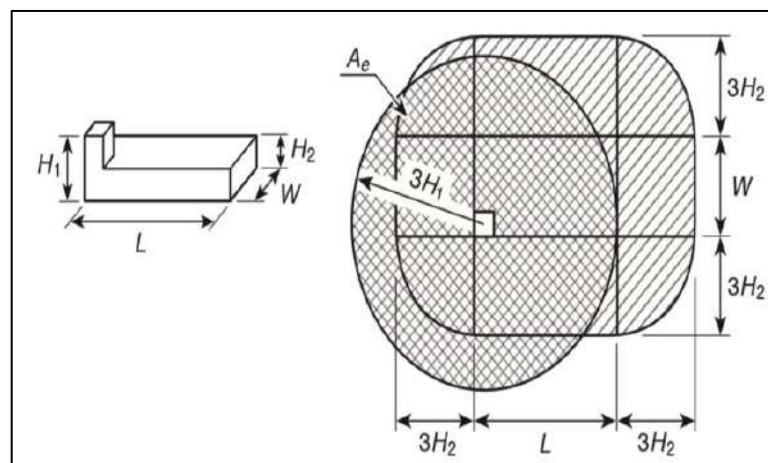


Imagen 44: Cálculo de área equivalente.

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 67 Anexo L)

2.3.1.3 Factor de locación

Para elegir el coeficiente, la norma NFPA 780 versión 2014 proporciona una tabla con posiciones relativas de la estructura. De acuerdo a esta, se debe elegir el coeficiente según las características del edificio a proteger. A continuación la tabla:

Tabla 10: Factor de locación.

Locación relativa de la estructura	Coficiente (C1)
Estructura rodeada por edificios o árboles más altos que ella, en un radio de 3 veces la altura de la estructura a proteger.	0.25
Estructura rodeada por edificios o árboles de igual o menor altura que ella, en un radio de 3 veces la altura de la estructura a proteger.	0.5
Estructura sola, con ninguna otra ubicada como mínimo en un radio de 3 veces la altura de ella.	1
Estructura sola en distancia y altura.	2

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 67 Anexo L)

2.3.2 Densidad de descargas en un año toleradas

Siguiendo la norma NFPA 780 versión 2014 Anexo L, la medida del riesgo o daño a la estructura, o bien “ N_c ”, se puede calcular de la siguiente forma:

$$N_c = \frac{1.5 * 10^{-3}}{C} \text{ eventos/año}$$

Cuando

$$C = (C_2) * (C_3) * (C_4) * (C_5)$$

En la imagen 45 se grafica el diagrama de flujo a seguir para encontrar la densidad de descargas en un año que se pueden tolerar:

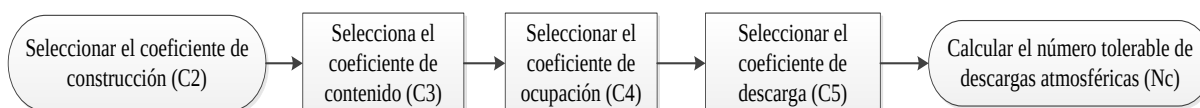


Imagen 45: Diagrama de flujo para calcular el número tolerable de descargas atmosféricas.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, hay que seleccionar varios coeficientes, los cuales se tratarán a continuación. Cada uno debe seleccionarse de tablas que nos brinda la

normativa utilizada, debe escogerse con la información recopilada y según el criterio del diseñador o del gerente del proyecto.

2.3.2.1 Coeficiente de construcción

Tabla 11: Tabla de determinación del coeficiente de construcción

Estructura	Coeficiente de construcción		
	Techo metálico	Techo no metálico	Techo combustible
Metálica	0.5	1	2
No metálica	1	1	2.5
Combustible	2	2.5	3

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 68 Anexo L)

2.3.2.2 Coeficiente de contenido de la estructura

Tabla 12: Tabla de determinación del coeficiente de contenido de la estructura

Contenido de la estructura	C3
Bajo valor y no combustible	0.5
Valor estándar y no combustible	1
Alto valor y moderada combustión	2
Valor excepcional, líquidos inflamables, computadores o electrónicas.	3
Valor excepcional, íconos históricos y culturales irremplazables.	4

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 68 Anexo L)

2.3.2.3 Coeficiente de ocupación de la estructura

Tabla 13: Tabla de determinación del coeficiente de ocupación de la estructura.

Ocupación de la estructura	C4
Desocupado	0.5
Normalmente ocupado	1
Difícil de evacuar o riesgo de pánico	3

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 68 Anexo L)

2.3.2.4 Coeficiente de consecuencia de descargas sobre la estructura

Tabla 14: Tabla de determinación del coeficiente de consecuencia de una descarga.

Consecuencia de una descarga	C5
No se requiere de la continuidad de su servicio, sin impacto ambiental.	1
Se requiere la continuidad de su servicio, sin impacto ambiental.	5
Consecuencias al ambiente.	10

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 68 Anexo L)

2.3.3 Recomendación de incluir el sistema de protección contra descargas atmosféricas

Entonces, según la norma NFPA 780 versión 2014 Anexo L:

Si:

$$N_d \leq N_c \text{ entonces una protección es opcional}$$

$$N_d > N_c \text{ entonces una protección es recomendada}$$

2.4 Diseño

De forma general, se ha resumido el proceso de diseño en las imágenes 46 y 47, que son diagramas de flujo de los cuales se desarrollará cada subproceso en este capítulo.

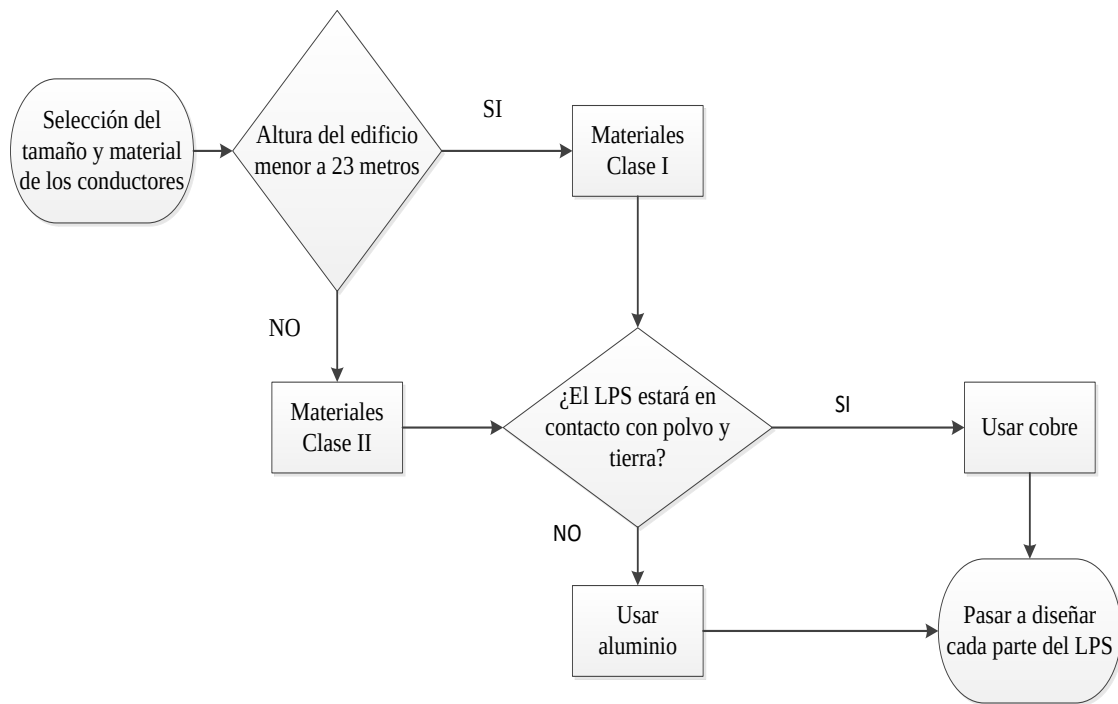


Imagen 46: Diagrama de flujo para diseñar LPS.

Fuente: Elaboración propia.

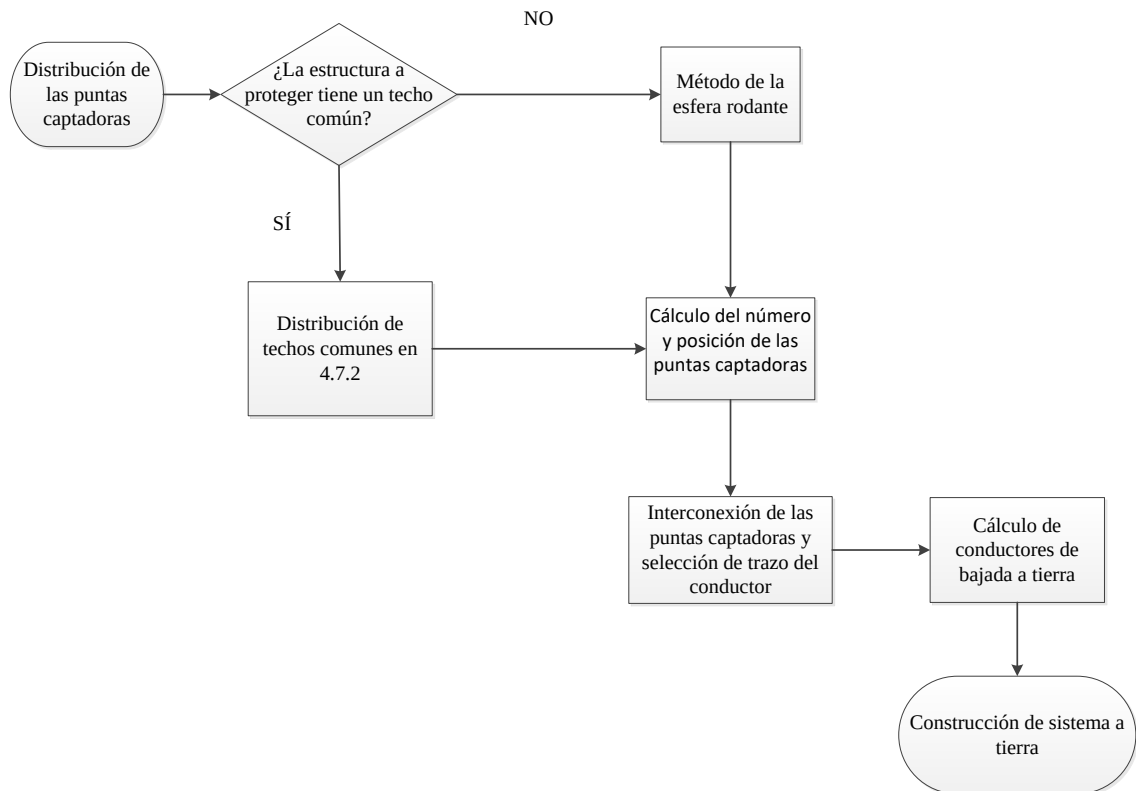


Imagen 47: Diagrama de flujo para diseñar LPS.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.1 Elección de material según la altura del edificio

Si la estructura a proteger no excede los 23 metros, se debe utilizar la tabla número 8 del presente trabajo, la cual está ubicada en el primer capítulo. Si la estructura a proteger mide 23 metros o más, se usará la tabla número 9.

Si solo una porción del edificio es la que excede los 23 metros, como un campanario o una antena, se puede utilizar el material de la tabla 9 únicamente para esa porción de la estructura. Si esta porción de edificio es una chimenea que emana gases a altas temperaturas y posiblemente tóxicos, debe cubrirse los conductores con pintura anticorrosiva o con un revestimiento de estaño.

Si se instala aluminio, debe tenerse cuidado de no ponerlo en contacto con ninguna superficie de cobre.

2.4.2 Puntas captadoras

Como mínimo, la punta captadora debe medir 254 milímetros, o estar separada esa distancia entre su punta y la superficie del techo de la estructura. Por otro lado, si el mástil que se colocará mide más de 60 centímetros, debe estar soportado por una placa anclada al techo o por un peso de al menos 1.5 del valor del peso de la punta captadora.

Si se tiene un mástil metálico de 4.8 milímetros de diámetro (o de espesor de cada uno de sus componentes en caso de ser una armadura), puede ser utilizado como punta captadora. Si no es metálico, obligatoriamente debe llevar un pararrayo y conectarse a la malla principal del sistema de protección.

2.4.2.1 Distribución en tipos de techo

Según los tipos de techo, la normativa NFPA 780 nos da la distribución lógica de las puntas captadoras, la cual se aprecia en la imagen 48:

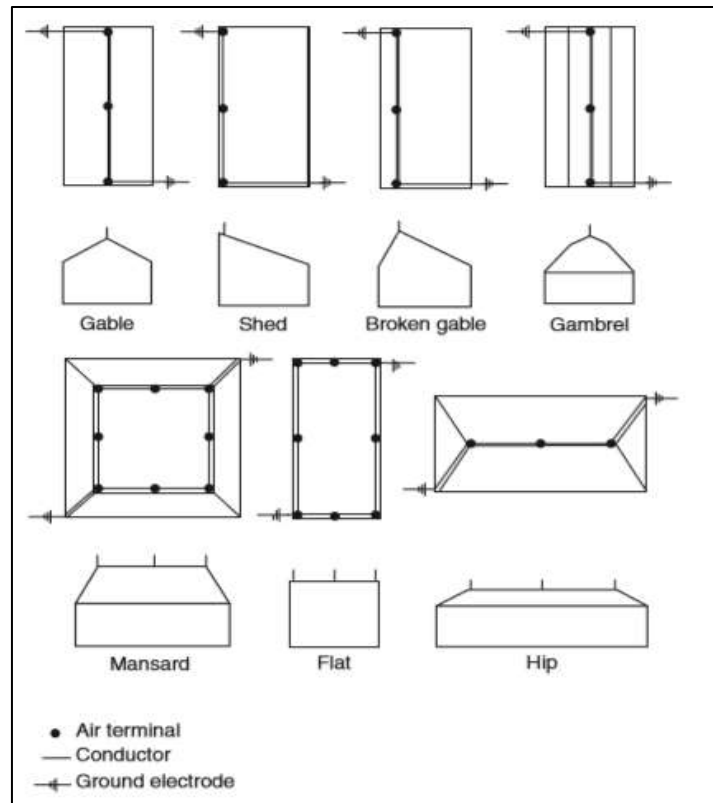


Imagen 48: Distribución de las puntas captadoras para techos comunes.

Fuente: (NFPA 780, 2014, pag 13)

“Air terminal” significa terminal aéreo o mástil o punta captadora, “conductor” es un cable conductor y “ground electrode” es el pozo a tierra.

De la imagen 49 hasta la 52 se aprecian distintos tipos de techos que tienen mallas de pararrayos en ellos:



Imagen 49: Techo de estructura con puntas captadoras.

Fuente: (Organización ITER, 2018)



Imagen 50: Techo con puntas captadoras.

Fuente: (Pixmypix, 2016)



Imagen 51: Techo con puntas captadoras.

Fuente: (Photo News 247, 2015)

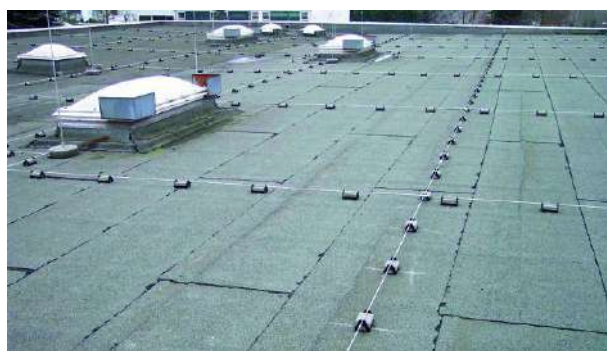


Imagen 52: Techo con instalación de pararrayos.

Fuente: (Direct Industry, 2018)

Si el techo es inclinado y la altura de su punta más alta es menor a 46 metros, puede ser utilizada la distribución indicada en la imagen 51, es decir, poner solo las puntas captadoras en fila sobre la superficie de mayor altura o el vértice entre los dos planos inclinados que forman las dos aguas del techo. Si sobrepasa los 46 metros ya

debe usarse el método de la esfera rodante, ya que tendrá que considerarse también puntas captadoras en el perímetro del techo.

Si el techo tiene un perímetro irregular, se debe siempre cumplir la distancia de 60 centímetros como máxima distancia entre el final del techo y la primera línea de pararrayos, como se muestra en la imagen 53:

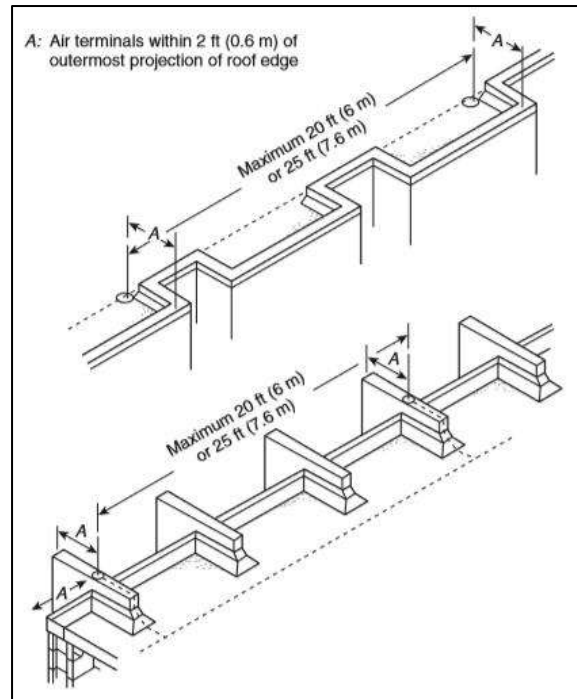


Imagen 53: Techos con perímetro irregular.

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 15)

Si las dimensiones del edificio a proteger superan los 15 metros por lado, y se tiene un área libre sin techo de perímetro mayor a 92 metros, éste debe quedar siempre bajo la zona de protección o disponer mástiles para protegerlo.

2.4.2.2 El método de la esfera rodante

El radio de la esfera para la normativa NFPA 780 es de 46 metros para todo edificio.

Debe aplicarse cuando la estructura a proteger no tiene una forma predeterminada vista en 2.2.2.1, o tiene más de un nivel con diferencia entre áreas de la primera planta y las demás. Su forma de aplicar se encuentra en 1.4.3.2 “Aplicación del modelo electrogeométrico según las normas de aplicación correspondientes: el método de la esfera rodante”.

Para simplificar el método geográfico, la normativa NFPA 780 brinda una fórmula matemática para hallar la distancia entre picas, pero debe cumplirse que la parte más alta no debe tener más de 46 metros:

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

Dónde:

d = distancia entre picas captadoras

h_1 = altura del piso más alto

h_2 = altura del piso más bajo

R = 46 metros

2.4.2.3 Distancias mínimas

Para las puntas captadoras que están en el perímetro del techo, tiene que haber una separación entre el fin del techo y el mástil de como mínimo 60 centímetros.

El máximo espaciamiento entre las puntas captadoras entre sí es de 6 metros.

Si tu techo tiene más de 15 metros de ancho o de largo, no será suficiente protegerlo solo en el perímetro, sino también deberá incluirse, en la malla, puntas captadoras intermedias con máximo 15 metros de espaciamiento entre ellas.

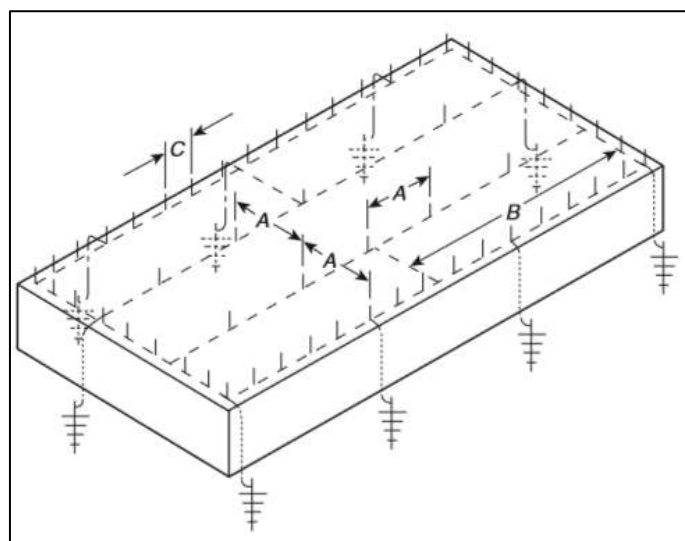


Imagen 54: Puntas captadoras en un techo plano.

Fuente: (NFPA 780, 2014, pag 14)

De la imagen 54, se explican las siguientes distancias:

- A: 15 metros como máximo espacio entre las puntas captadoras del interior del techo.
- B: 46 metros de máxima longitud de dos conductores rectos sin un conector entre ellos.

- C: 6 metros de máximo espaciamiento entre las puntas captadoras en el perímetro de la edificación.

El conductor que une las puntas captadoras y el conductor principal de la malla no debe superar los 4.9 metros.

2.4.3 Conductores, conectores y sujetadores

Todas las puntas captadoras deben tener un conector en T, debido a que la norma exige que tenga dos salidas, como mínimo, en menos de 4.9 metros desde su conexión a la punta captadora, como vemos en la imagen 53. Ahí se aprecia que entre la punta captadora y la conexión con el conductor principal tiene que ser de menos de 4.9 metros para que sea aceptada.

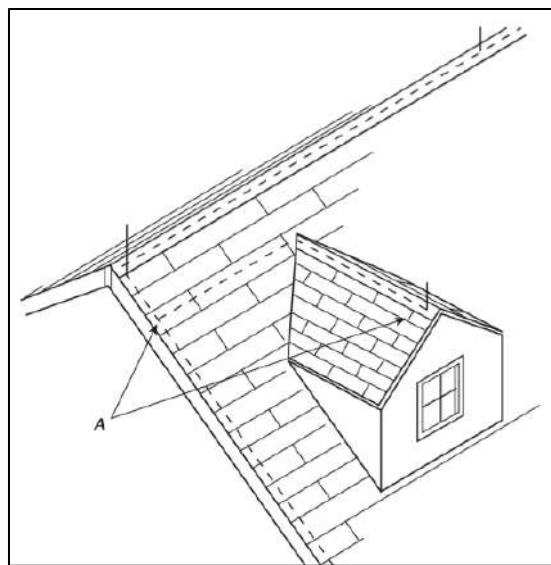


Imagen 55: Distancia máxima de una sola salida de una punta captadora.

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 18)

El radio de curvatura mínimo de cualquier conductor es de 203 milímetros cuadrados.

2.4.3.1 Tipos de conductores

- Cable conductor principal: Es el que recorre las puntas captadoras y las conecta formando una malla de pararrayos. Ya se conoce su dimensión del primer paso en las tablas 8 y 9.
- Cable conductor conector: Son los que conectan entre sí las mallas. Deben ponerse cada 46 metros lineales. También se conoce su dimensión de las tablas 8 y 9.

- **Cables de bajada:** La normativa dice que si el perímetro excede los 76 metros, no debe haber separación mayor de 30 metros entre los conductores de bajada. Estos deben ser de igual calibre y calidad que el conductor principal. Los cables de bajada deben cubrirse con tubo de PVC a los 1.8 metros de distancia antes de tocar el suelo. También, se les debe poner anticorrosivo 90 centímetros antes de conectarlos con el pozo a tierra. El número de conductores de bajada determina el número de pozos a tierra del sistema de pararrayos.

2.4.3.2 Tipos de conectores

Los conectores son elementos que permiten que durante el proceso constructivo no se utilicen muchas soldaduras exotérmicas. Éstos deben asegurar la continuidad del conductor en todas las configuraciones T o Y que presente el circuito.

Deben ser de un material que no ocasione fugas de corriente y de una dimensión mayor al conductor, o que sea regulable para que el apriete sea perfecto y no se produzcan fallas inesperadas.

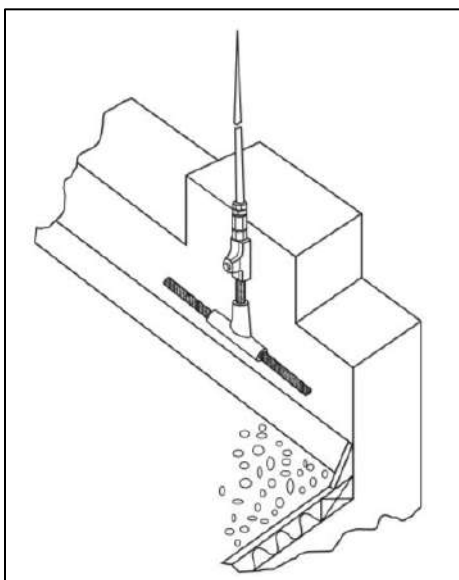


Imagen 56: Conector tipo T entre cable de punta captadora y conductor principal.

Fuente: (NFPA 780, 2014, pág. 15)

2.4.3.3 Distancia entre sujetadores

Los cables pueden estar 90 centímetros, como máximo, sin adherirse a una superficie mediante un elemento de sujeción, para pasar tragaluces o espacios que la arquitectura del edificio disponga.

Los conductores deben estar sujetos al techo o a la pared cada 90 centímetros. De igual forma, si el trazo pasará por una columna, se debe ajustar el conductor o el tubo únicamente al inicio y al final de la misma.

Es recomendable utilizar sujetadores del mismo material que el conductor, para no generar corrosión en las juntas de metales diferentes.

Las mismas normas caben si es que, en vez de un sujetador de conductor, se sujetará un tubo con una abrazadera.

2.4.4 Puesta a tierra

Debe ser un sistema de puesta a tierra independiente para el sistema de pararrayos, y no compartir los pozos con las demás puestas a tierra. T

2.4.4.1 Número de pozos a tierra

Este es el mismo número de conductores de bajada que nos haya mandado el perímetro del edificio.

2.4.4.2 Dimensiones de la varilla

La varilla será de cobre de $\frac{1}{2}$ in de diámetro y 2.4 metros de longitud como mínimo. Esta no debe pintarse.

2.4.4.3 Posición y distancias mínimas del pozo a tierra

El pozo debe construirse de por lo menos 3 metros, debido a que la punta superior de la varilla debe estar conectada 60 centímetros por debajo de la superficie del suelo.

El conductor que conectará los pozos será como los conductores principales, y se debe tender como mínimo a 46 cm de la superficie del suelo.

También se debe acotar que cada pozo debe ir como mínimo a 60 centímetros de cada camino o de lugar de acceso señalizado para cualquier persona. También, indica que si el suelo donde se pose son rocas, se debe fijar cada 90 centímetros, sin embargo, en nuestro caso será arena, por lo cual esto no aplica.

2.4.4.4 Configuraciones de mallas a tierra recomendadas

La normativa recomienda conectarlos para evitar la tensión de paso y de contacto, ya que el potencial se equilibra por todo el terreno

Capítulo 3

Análisis de riesgo y factibilidad

3.1 General

Existen algunos casos donde la protección contra descargas atmosféricas debe tener una consideración mayor según la norma NFPA 780, los cuales se nombran a continuación:

- Grandes aforos de personas.
- Servicios críticos que debe ser confiable su continuidad.
- Lugares con alta frecuencia de descargas atmosféricas.
- Estructuras altas aisladas en medio de edificaciones bajas (antenas, campanarios, entre otros).
- Edificios hechos de o con contenidos explosivos o inflamables.
- Edificios con valor histórico o cultural irremplazable.

Estas consideraciones, a lo largo del capítulo, serán de vital importancia para decidir si es opcional o recomendable poner el sistema de protección contra descargas atmosféricas.

3.1.1 El método de evaluación de riesgo

La vulnerabilidad de la estructura u objeto es una evaluación entre el área equivalente colectiva de la estructura, y la densidad de rayos que caen en el área donde la estructura se localiza. (NFPA 780, 2014, Anexo L)

Este método en una guía que involucra los siguientes parámetros:

- Ambiente en donde se encuentra la construcción.
- Tipo de construcción.

- Ocupación de la estructura.
- Contenido de la estructura.
- Consecuencias de una descarga.

El riesgo de una descarga para una estructura es el producto de la frecuencia con que caen los rayos en el área a proteger, qué tan vulnerable es el edificio con sus alrededores y la consecuencia del impacto con la estructura. (NFPA 780, 2014, Anexo L)

3.2 Mapa isoceráunico

Se trató anteriormente en el presente trabajo el concepto del mapa isoceráunico. El de la región Piura, donde se ubica geográficamente el edificio a evaluar, se aprecia en la imagen 57:

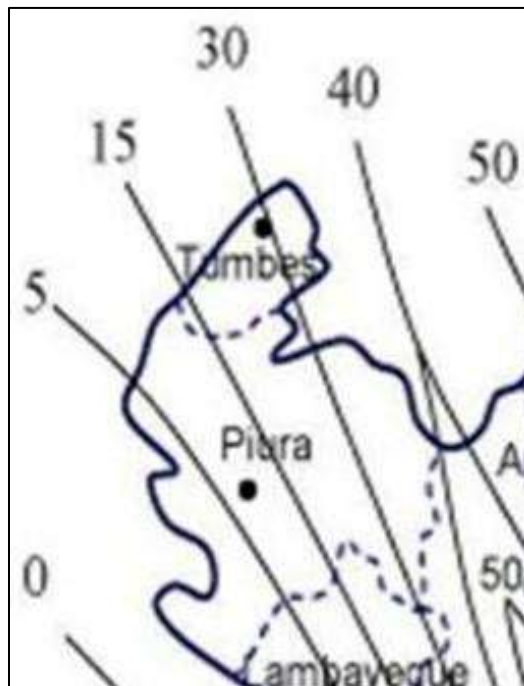


Imagen 57: Mapa isoceráunico de Piura

Fuente: (Yanque M, 2005)

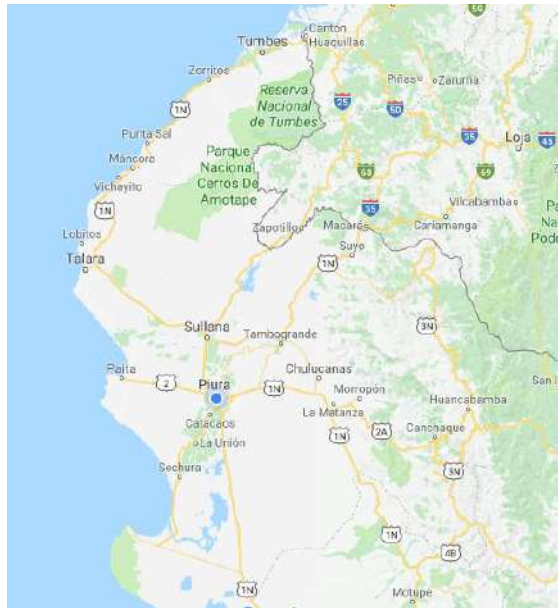


Imagen 58: Ubicación del edificio E satelital en el punto azul.

Fuente: Google maps, 2018.

Como puede apreciarse en la imagen 57, las líneas de nivel ceráunico van de manera progresiva empezando de izquierda a derecha con valor 0, 5, 15, 30 a lo largo de la región, esto significa 0 rayos al año, 5 rayos al año, 15 rayos al año y 30 rayos al año respectivamente. Como la ciudad de Piura, en donde se ubica el edificio a proteger, está prácticamente equidistante de las líneas isoceráunicas de valor 5 y 15, para fines prácticos, se asumirá el valor de 10.

$$N_g = 10$$

De igual manera, hay que aclarar que este dato es sacado de un mapa que se promedia bajo condiciones normales, las cuales se ven afectadas durante un Fenómeno del Niño o Niño Costero, como el sucedido en 2017 en el norte del Perú. Aparte de eso, el mapa que actualmente se utiliza es del año 2005, habiendo pasado ya 13 años, por lo cual las condiciones pueden haber variado.

3.3 Promedio de descargas al año

3.3.1 Área colectiva equivalente

Para efectos prácticos, se utilizará la forma matemática debido a que cumple los requisitos de ser rectangular y sin segundos niveles de diferentes áreas. Según los planos, la altura del edificio es de 10.2 metros, pero como hemos visto, existen en el techo unos equipos de acondicionamiento de aire que miden 1.8 metros, por tanto la altura a considerar será de 12 metros.



Imagen 59: Equipo en el techo del edificio E.

Fuente: Elaboración propia

Entonces, utilizando la ecuación explicada en el punto 2.3.1.2:

$$A_e = LW + 6H(L + W) + \pi 9H^2$$

Siendo:

- $L = 72.4 \text{ m}$
- $W = 72.06 \text{ m}$
- $H = 12 \text{ m}$

Dando como resultado:

$$A_e = 5217.14 + 72 * (144.46) + 1296\pi$$

$$A_e = 5217.14 + 10401.12 + 4071.384$$

$$A_e = 19689.644 \text{ mm}^2$$

3.3.2 Coeficiente del ambiente

Podemos ver que, para el factor de locación, lo que más influye es la existencia de edificios cercanos que son más altos que el que se debe proteger. Para saber eso, se hace una visita al sitio, la cual se evidencia en las imágenes:

Como podemos observar, a un radio de tres veces la altura del edificio, no se encuentran edificios ni antenas, ni pozos de agua de mayor altura. Los árboles son

eventualmente de la misma altura o menores en el momento en el que se hizo la inspección en sitio, así como se evidencia en la imagen 60. Por lo tanto, se puede afirmar que el valor será 0.5. No podría ser 1, debido a que existen árboles alrededor, y también otro edificio de la facultad de Derecho.

$$C_1 = 0.5$$



Imagen 60: Alrededores del edificio E.

Fuente: Elaboración propia

Entonces, con estos resultados, podemos hallar N_d :

$$N_d = (N_g) * (A_e) * (C_1) * (10^{-6}) = \text{eventos potenciales/año}$$

$$N_d = (10) * (19689.644) * 0.5 * 10^{-6}$$

$$N_d = 0.0984 \frac{\text{eventos}}{\text{año}}$$

Esto quiere decir que se pueden producir un aproximado de 10 rayos por cada 100 años en el edificio aulario de la universidad de Piura, contando con las condiciones atmosféricas normales.

3.4 Medida del riesgo o daño a la estructura

$$N_c = \frac{1.5 * 10^{-3}}{C} \text{ eventos/año}$$

Cuando:

$$C = (C_2) * (C_3) * (C_4) * (C_5)$$

Se ha explicado su implicancia en el punto 2.1.2, por lo cual, se procederá a seleccionar su valor.

3.4.1 Coeficiente de construcción C_2

Aquí se necesita tener en cuenta los materiales de la estructura y del techo, ambos son no metálicos debido a que en el plano de construcción se puede apreciar que se utilizan cristales, “drywall” estándar, bloquetas de ladrillo de 10 o 15 cm de espesor y placas de concreto. Por lo tanto, el coeficiente será igual a 1.

$$C_2 = 1$$

3.4.2 Coeficiente de contenido de la estructura C_3

Como se ha hablado con anterioridad, el proyecto involucra una inversión de 32.5 millones de soles, siendo el más moderno y con más capacidad del campus universitario.

El edificio tiene su propia subestación, pero el diseño de la construcción incluye un sistema corta fuegos.

Así mismo, el edificio incluye un servidor y un sistema electrónico de comunicación, seguridad y ambientación del aire por cada habitación del mismo sea salón de conferencias o de clases, exceptuando las oficinas que utilizan ventiladores.

El edificio no tiene un valor histórico ni cultural irremplazable.

Por todo esto, se ha decidido darle el valor de 2, ya que si presenta computadores y electrónicos pero no líquidos inflamables, ni tiene un valor excepcional dentro de proyectos internacionales, sin embargo, sí alto valor para la región y para la universidad en particular.

3.4.3 Coeficiente de ocupación de la estructura C_4

El edificio es normalmente ocupado por los alumnos de la universidad, es decir, la gran mayoría de su población tiene entre 17 y 22 años, por lo cual el riesgo de pánico puede aumentar.

Como anexo, se pondrá el plan de evacuación aprobado por INDECI de cada una de las plantas del edificio, las cuales están correctamente señalizadas y las cuales ayudarán a dirigir a la gente en una catástrofe. El problema radica en que, por la edad de la gente que ocupa el edificio, puede que terminen por no respetarse.

Por tanto, se le dará el valor de 3, debido a que, aparte de estar normalmente en su aforo máximo dentro de las aulas, e incluso con gente interactuando y conversando en los pasillos y oficinas, el riesgo de pánico podría dificultar la situación de emergencia.

$$C_4 = 3$$

3.4.4. Coeficiente de consecuencia de una descarga C_5

Si bien el edificio Aulario es necesario para la operación de la Universidad, no podemos decir que su paralización traería consecuencias catastróficas que afecten directamente a las personas, como es el caso de un hospital.

Tampoco tendría impacto ambiental más que el de la combustión de sus materiales, por lo cual es muy nulo.

Es así, por lo que se decide ponerle 1.

$$C_5 = 1$$

3.5 Cálculo del riesgo

Entonces, según la norma NFPA 780 versión 2014 Anexo L:

Si:

$$\begin{aligned} N_d &\leq N_c \text{ entonces, una protección es opcional} \\ N_d &> N_c \text{ entonces, una protección es recomendada} \end{aligned}$$

$$N_c = \frac{1.5 * 10^{-3}}{C} \text{ eventos/año}$$

Cuando:

$$C = (C_2) * (C_3) * (C_4) * (C_5)$$

Reemplazando:

$$C = (1) * (2) * (3) * (1) = 6$$

$$N_c = \frac{1.5 * 10^{-3}}{6} = 0.00025 \text{ eventos/año}$$

Entonces, si:

$$N_d = 0.0984 \frac{\text{eventos}}{\text{año}}$$

Podemos afirmar que $N_d > N_c$.

Dados los resultados, podemos entonces concluir que es recomendable poner el sistema de pararrayos para el edificio “E”.

Capítulo 4

Estructura a proteger

4.1 Ubicación geográfica

4.1.1 Región Piura

Piura es una de las 24 regiones del Perú, ubicada en el extremo noroccidental, limitando al norte con la región de Tumbes y la República del Ecuador, al sur con la región de Lambayeque, al este con la región de Cajamarca y al oeste con el océano Pacífico. (Marcela Región Piura, 2010)

La región Piura tiene tres regiones naturales (Marcela Región Piura, 2010):

- El litoral: mar rico en fauna y en minerales.
- Costa: llanura baja ubicada entre el litoral y las estribaciones andinas formada por desiertos, bosques, tropicales secos y los valles de Piura y Chira.
- Sierra: La zona más baja de la cordillera de los andes, entre los 500 y 4000 msnm

Se tiene un clima semi tropical, cálido, húmedo y con lluvias en verano, el cual se influencia por la Corriente del Niño en promedio cada 20 años. Ésta corriente tiene aguas cálidas. En la sierra se identifica un clima más templado entre las áreas situadas 2500 y 3500 msnm. (Marcela Región Piura, 2010).

4.1.1.1 El fenómeno del niño

El Niño es un fenómeno del Océano Pacífico ecuatorial que se caracteriza por cinco medias móviles¹⁰ de 3 meses de las anomalías¹¹ de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4¹² que estén por debajo del umbral de ± 0.5 °C. (National Centers for Environmental Information, 2017)

Por causa de El Niño, Perú se ve impactado local y remotamente. De forma local con lluvias en la costa y alteraciones en ecosistemas marinos, y remotamente por las tele conexiones. El ENFEN¹³ cuenta con un indicador local más específico para nuestro litoral sudamericano, el cual no solo identifica la presencia del fenómeno El Niño, sino también su magnitud, este indicador se llama ICEN¹⁴ y se calcula aplicando una media móvil de las anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar. (Carrasco Fonseca, 2017)

Tabla 15 . Categorías de las anomalías en las condiciones de la temperatura según el ICEN

Categorías	ICEN
Fría fuerte	Menor que -1.4
Fría moderada	Mayor o igual que -1.4 y menor que -1.2
Fría débil	Mayor o igual que -1.2 y menor que -1.0
Neutras	Mayor o igual que -1.0 y menor o igual que 0.4
Cálida débil	Mayor que 0.4 y menor o igual 1.0
Cálida moderada	Mayor que 1.0 y menor o igual que 1.7
Cálida fuerte	Mayor que 1.7 y menor o igual que 3.0
Cálida extraordinaria	Mayor que 3.0

Fuente: (ENFEN, 2012)

Siguiendo el criterio del ICEN se han identificado los eventos El Niño en el periodo 1950 – 2015, los cuales se muestran en la tabla 16:

¹⁰ Las medias móviles son una técnica estadística de análisis utilizada para estimar el valor futuro de una serie de datos, y son apropiadas cuando la aleatoriedad de los datos es elevado y la auto correlación baja. (El Estadístico, 2012)

¹¹ Diferencia entre el valor de una variable en una ubicación y su valor promedia en dicha ubicación. (El Niño Southern Oscillation, s/f)

¹² Región clave para monitorear la interacción océano-atmosférica que influye en El Niño, ubicada en el medio del océano Pacífico entre Australia y Ecuador. (Carrasco Fonseca, 2017, pág. 3)

¹³ Comité Multisectorial del Estudio del Fenómeno El Niño de Perú.

¹⁴ Índice costero El Niño.

Tabla 16. Eventos El Niño en la costa del Perú entre 1950 -2015.

Año inicial	Mes inicial	Año final	Mes final	Duración (meses)	Magnitud
1951	5	1951	10	6	Moderado
1953	3	1953	6	4	Débil
1957	3	1958	4	14	Moderado
1965	3	1965	10	8	Moderado
1969	4	1969	7	4	Moderado
1972	3	1973	2	12	Moderado
1976	5	1976	10	6	Débil
1982	7	1983	11	17	Extraordinario
1986	12	1987	12	13	Moderado
1991	10	1992	6	9	Moderado
1993	3	1993	9	7	Débil
1994	11	1995	1	3	Débil
1997	3	1998	9	19	Extraordinario
2002	3	2002	5	3	Débil
2002	9	2003	1	5	Débil
2003	11	2004	1	3	Débil
2004	10	2004	12	3	Débil
2006	8	2007	2	7	Moderado
2008	7	2008	9	3	Débil
2009	5	2009	9	5	Débil
2012	3	2012	7	5	Débil
2014	5	2014	10	6	Moderado
2015	4	2016	6	15	Fuerte

Fuente: (Instituto Geofísico del Perú, 2016)

Como se puede apreciar en la tabla 16, el Instituto Geofísico del Perú califica de extraordinarios a dos fenómenos, los de 1982/1983 y 1997/1998. Estos han demostrado la gran vulnerabilidad del país frente a las variaciones climáticas, debido a que las pérdidas económicas fueron cuantiosas y los efectos sociales desastrosos. Algunas anomalías se resumen en la tabla

Tabla 17. Características de los dos episodios extraordinarios del Niño en el Perú.

Episodio El Niño	Anomalías de la temperatura mínima	Anomalías de precipitación	Efectos Económicos
1982-1983	8 grados centígrados de más en Chiclayo	En la costa norte 3000 mm entre setiembre y mayo; en verano, mayores núcleos en Piura.	3283 millones USD (11.6% del PBI de 1983)
	10 grados centígrados de más en Chimbote	En la sierra sur: déficit severo de precipitación.	
1997-1998	8 grados centígrados desde Chiclayo al Norte Chico	En la costa norte: 3000 mm entre setiembre y mayo; en verano, mayores núcleos en Piura y Tumbes; incrementos de alrededor 2000% en algunas estaciones costeras norteñas: Miraflores, Talara (Piura), Tumbes; lluvias intensas en Lambayeque; Lluvias en Lima.	3500 millones USD (6.2% del PBI de 1998)
		En la sierra sur: déficit de precipitación.	

Fuente: (SENAMHI, 2014)

4.1.1.1.1 El Niño costero en Piura

En noviembre de 2016, debido a la etapa de sequía que atravesaba la región Piura, se declara la región en emergencia hídrica debido a la escasez de lluvias. Se vio afectada el 50% del área cultivada, llevando a pérdidas económicas de 200 millones de soles. (Carrasco Fonseca, 2017)

En enero de 2017 se registró altas temperaturas, teniendo como pico los 39 °C de Chulucanas. El día 21 de enero se registró la primera lluvia de intensidad moderada de 10 mm, la cual creó la primera alerta hacia las zonas de Los Polvorines, Las Dalias, Ignacio Merino, entre otros, haciendo un total aproximado de 10 mil familias en riesgo. (Carrasco Fonseca, 2017)

Cuando inició el mes de febrero, El Niño costero cobró sus primeras víctimas mortales, causados por accidentes ocasionados por las lluvias, reportando más de 1000 damnificados con 300 viviendas colapsadas y 1600 viviendas afectadas. Incrementan los casos de dengue en la región, provocaron daños en la infraestructura vial y colapso de desagües. Así mismo, se activaron quebradas a lo largo de la región ocasionando aproximadamente que 15 mil personas estén aisladas de las demás ciudades. (Carrasco Fonseca, 2017)

A inicios del mes de marzo ocurre un deslizamiento en Huarmaca causando la desaparición de dos personas y el fallecimiento de una. Continuaron las lluvias fuertes, y el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional informó que se alcanzó un récord

histórico, pues las precipitaciones fueron más fuertes que en los 30 años últimos. (Carrasco Fonseca, 2017)

Los puentes fueron cerrados como medida de precaución debido a que llegaron a pasar 1900 m³/s. El día 11 de marzo se produjo el primer desborde del río Piura, afectando a la Plaza de Armas de la ciudad de Piura y a la plaza Tres Culturas. A mediados de marzo, y debido al aislamiento de las ciudades de Piura, Tumbes, Chiclayo y Trujillo entre ellas y con el resto del país, se implementó un puente aéreo para llevar ayuda a los damnificados. Debido al aumento de personas afectadas, se dispuso de instalaciones de refugios y desplazamientos de efectivos de las Fuerzas Armadas en todo el país. (Carrasco Fonseca, 2017)

Los pobladores del Bajo Piura fueron reubicados de manera temporal en zonas más altas de Piura como medida de precaución ante el riesgo de que el río se desborde, lo cual ocurre el día 27 de marzo debido al caudal de 3468 m³/s registrado en el puente Cáceres. Se inundaron numerosas calles del centro de la ciudad, las urbanizaciones Cocos del Chipe, Quinta Ana María, Miraflores, distritos como Simbilá, Catacaos y Pedregal sufrieron del embate de la naturaleza en su máxima expresión. (Carrasco Fonseca, 2017)

Se registró al final en la región un saldo de 41925 damnificados, 349471 afectados, 16 fallecidos, 39 heridos, 3 desaparecidos, 61 albergues, 1618 carpas instaladas dando cobijo a un total de 15780 personas. (INDECI, 2017)

4.1.1.1.1 Descargas atmosféricas en Piura

El 18 de febrero del 2017, el diario La República (2017) mencionó: “Y, en Sullana, un ganadero murió producto de una descarga eléctrica por causa de la caída de un rayo cuando se encontraba en su parcela” (p1).

Así mismo, el 8 de marzo de 2017, Ralph Zapata (2017) de El Comercio, ponía en sus noticias:

“La ciudad de Piura soportó anoche una intensa lluvia, acompañada de una tormenta eléctrica. Los rayos, truenos y relámpagos aterrorizaron a la población, que optó por refugiarse en sus viviendas. En varios sectores se cortó la energía eléctrica.

Pese a las recomendaciones ofrecidas por las autoridades, varios ciudadanos salieron a las calles. Se supo que un rayo cayó en la Universidad de Piura, y otro en el sector de Buenos Aires de La Legua. Felizmente, no se reportaron heridos.” (p1)

A su vez, el diario El Popular, escribió: “Rayo deja sin luz a Piura. La intensa lluvia se prolongó por más de una hora y un rayo cayó en un poste y causó el corte de energía eléctrica en el distrito de Castilla”. (El Popular, 2017, pág. 1)

4.2 Universidad de Piura

La Universidad de Piura es una institución de educación superior privada que inició sus actividades el 29 de abril de 1969 y a lo largo de los años ha acumulado reconocimientos a nivel nacional e internacional por su rigurosidad académica, nivel de exigencia y calidad institucional.



Imagen 61: Ubicación de la Universidad de Piura en la ciudad

Fuente: Google Maps

4.2.1 El campus universitario

“Se ubica en un área de 130 hectáreas de extensión. Cuenta con 90 hectáreas de Algarrobos productos de una reforestación permanente desde 1969.” (UDEP, s/f)

En 2015, este campus albergaba a 4883 alumnos, los cuales pueden reflejarse en la tabla 18:

Tabla 18. Alumnos matriculados en la UDEP al 2015

Facultad	Alumnos matriculados (2015-I)
Ingeniería	2008
Ciencias Económicas y Empresariales	1397
Comunicación	553
Derecho	506
Ciencias de la Educación	378
Humanidades	41

Fuente: (UDEP, s/f)

Al tener 90 hectáreas de bosque de algarrobos, el campus de la universidad es muy reconocido por su importancia en la ciudad como foco de aire puro, de flora y fauna.

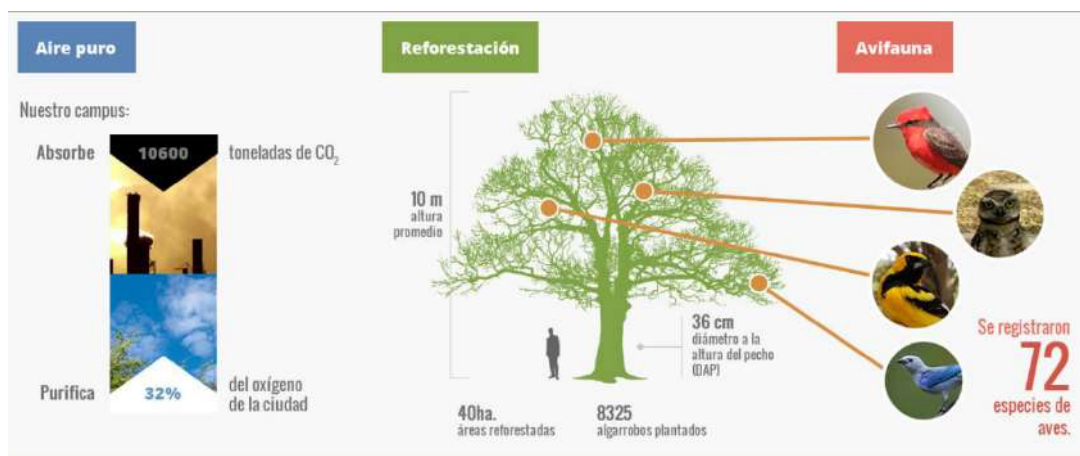


Imagen 62: Infografía que resume la acción del aire, los bosques y la fauna.

Fuente: (UDEP, s/f)

En la revista SOMOS, se publicó un artículo con detalles del campus, en donde resalta los siguientes puntos:

- “El campus de la universidad se ha transformado en un gran bosque, refugio de animales y centro de investigaciones científicas” (Rocha, 2013)
- Es un oasis en medio de la bulliciosa ciudad, un punto verde que contribuye con un tercio del oxígeno que respira Piura. (Rocha, 2013)
- El sistema de desagüe de la Universidad de Piura posee dos lagunas de oxidación, las cuales reciben 720 metros cúbicos diarios de agua servida de tres urbanizaciones colindantes. Una vez tratada, se usa para regar los árboles jóvenes que no poseen raíces lo suficientemente grandes como para alimentarse de aguas subterráneas del desierto. (Rocha, 2013)
- En 1983 se consiguieron fondos para adquirir un sistema de riego a goteo, lo que hizo posible plantar 20 hectáreas de algarrobos en la UDEP. (Rocha, 2013)
- La UDEP trabaja con la comunidad campesina San Juan Bautista desde hace 20 años, quienes hacen algarrobina y harina de algarrobina, las cuales ya se exportan a los Estados Unidos. (Rocha, 2013)
- En cifras: 100 hectáreas de bosque hay dentro de la universidad. 20 mil algarrobos han sido cultivados hasta la fecha, en los cuales viven 64 especies de aves y 155 variedades de insectos. El campus proporciona el 32% de oxígeno de Piura, y 80 venados viven en libertad dentro del campus universitario. (Rocha, 2013)
- En el campus se cuenta con radares para medir velocidad y dirección de los vientos de hasta 1320 kilómetros de altura. También se mide la radiación ultravioleta, temperatura, humedad y demás parámetros del clima. (Rocha, 2013)

4.2.1.1 El edificio “E”

El edificio E es la sede de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales y de los alumnos y profesores de Ciencias básicas de la Facultad de Ingeniería. De modo innovador, no se limita a aulas de primer nivel, sino provee ambientes de calidad para el trabajo en equipo entre alumnos y profesores. (UDEP, 2016).

Es un proyecto que involucra un área de 9473 metros cuadrados, teniendo un aforo de 1832 personas con una inversión de 32,5 millones de soles. Presenta zonas dedicadas a aulas de distintas formas, sean escalonadas, tipo taller con mobiliario flexible, etc. En total, son 94 oficinas, 5 salas de reuniones, 3 oficinas de investigación y 5 oficinas para asesoría. (UDEP, 2016)

Se indica que tiene una apreciable calidad en su diseño y construcción, pero fundamentalmente por la generosidad la creación de lugares disponibles para la interacción entre profesores y alumnos, siendo ecológicamente amigable con el bosque seco ecuatorial en el Campus Piura de la UDEP. (Belletich, 2018)

A la fecha, la calidad arquitectónica del diseño de la obra de Barclay & Crousse¹⁵ ha obtenido importantes méritos como la aparición en la revista Casabella de Italia, Summa+ de Argentina, Arquitectura de Perú, entre otras, lo que ha puesto a la Universidad de Piura en ojos del mundo arquitectónico. (Belletich, 2018)



Imagen 63: Inauguración del edificio E el 22 de abril de 2016.

Fuente: (UDEP, 2016)

¹⁵ Sandra Barclay y Jean Pierre Crousse son reconocidos arquitectos, profesores invitados y miembros del consejo consultivo del programa académico de Arquitectura de la Universidad de Piura. (Belletich, 2018)

4.2.1.1.1 Arquitectura del edificio “E”

La propuesta involucra una figura geoméricamente pura de 70 metros por 70 metros orientada: los alzados¹⁶ Norte y Sur cuentan con parasoles¹⁷ verticales, mientras que los más expuestos al este y oeste tienen celosías y espacios intermedios exteriores para proteger de la radiación solar. (Red Fundamentos, 2017)

Los arquitectos han logrado que, al ingresar al edificio, no se sienta la diferencia respecto a estar en medio del bosque seco de algarrobos. Así como el bosque no lo constituye únicamente un algarrobo, el aulario es un conjunto de 10 edificios independientes que definen espacios de encuentro bajo sombra generosa indispensable para el confort del clima caluroso y soleado del norte peruano. (Red Fundamentos, 2017).



Imagen 64: Edificio “E” en medio del bosque de algarrobos.

Fuente: (Red Fundamentos, 2017)

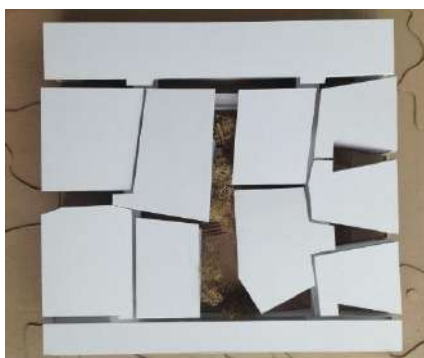


Imagen 65: Maqueta del edificio Aulario con el techo sólido

Fuente: (Red Fundamentos, 2017)

¹⁶ Las elevaciones son proyecciones de todas las caras de la vivienda o edificio. Nos muestran la forma exterior del proyecto a partir de las diferentes vistas y nos ayuda a entender la relación de este con el contexto. (González, 2013)

¹⁷ Elemento arquitectónico integrado a la fachada consistente en una pantalla situada por delante de las ventanas que sirve para proteger de la incidencia directa de los rayos solares. (Construmática, s/f)



Imagen 66: Maqueta del edificio Aulario sin techo sólido.

Fuente: (Red Fundamentos, 2017)



Imagen 67: Exterior del aulario de noche

Fuente: (Red Fundamentos, 2017)



Imagen 68: Exterior del Aulario de día

Fuente: (Red Fundamentos, 2017)



Imagen 69: Interiores del Aulario en la primera planta.

Fuente: (Red Fundamentos, 2017)



Imagen 70: Interiores del Aulario en la segunda planta.

Fuente: (Red Fundamentos, 2017)

Capítulo 5

Propuesta del sistema de pararrayos

5.1 Materiales

La norma NFPA 780 manda a usar los materiales de la Tabla 8 y Tabla 9 del presente trabajo. Como el edificio a proteger mide 10.20 metros más 1.8 de los equipos en el techo, haciendo un total de 12 metros, se usarán los materiales de la Clase I, es decir, la Tabla 8.

Aquí se debe decidir el material a utilizar, el cual puede ser cobre o aluminio. En este trabajo de tesis, se utilizará el cobre ya que es más resistente a ambientes corrosivos, como en el que estaremos expuestos en medio del bosque de algarrobos de la Universidad de Piura. (NFPA 780, 2014)

5.2 Puntas captadoras

Como se ha visto anteriormente en este trabajo, se utilizarán puntas captadoras o tipo Franklin, debido a que son las que no tienen elementos electrónicos o radiactivos, por lo tanto son las más comerciales, económicas en su mantenimiento y no contaminantes.

Se adjuntará una ficha técnica comercial de la empresa “INGESCO S.A.” como anexo, para que se pueda apreciar la variedad de puntas captadoras junto con un soporte que se encuentra en el mercado. La punta captadora más alta de este comerciante mide desde la base hasta la punta 2584 mm, por lo que el equipo más alto podría medir 2300 mm como máximo. En el caso de evaluación del presente trabajo, el equipo de acondicionamiento de aire más alto mide 1800 mm, por lo cual, se encuentra dentro del rango del proveedor mencionado.

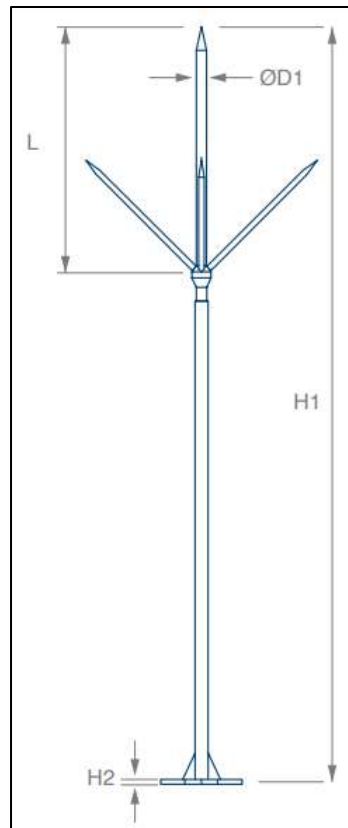


Imagen 71: Dimensiones de las puntas captadoras comerciales

Fuente: (Ingesc Lightning Solutions, 2016)

Como se está considerando únicamente la altura de los equipos, se debería también tener en cuenta a las personas. El techo del aulario es una zona de no acceso público, las escaleras están cerradas y por tanto no puede subir nadie sin autorización. Actualmente los accesos al techo están bloqueados con candados, siendo únicamente el personal de mantenimiento el que tiene acceso a la llave de los mismos, habrá que poner dentro de su procedimiento de seguridad, el prohibir el acceso en caso de tormenta eléctrica.

Respetando las dimensiones mínimas de la tabla 8, se elegirán opciones comerciales como las de la ficha técnica que se menciona anteriormente y se adjunta como anexo:

- D1: 20 mm
- L: 480 mm
- H1: 2584 mm
- H2: 10 mm.

Se fijará al techo con la placa graficada en la imagen 72 que viene con el dispositivo:

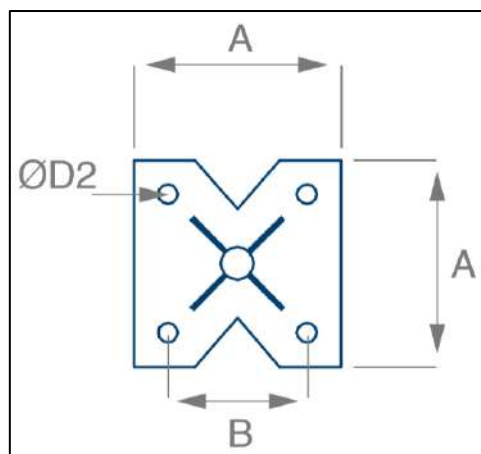


Imagen 72: Sujeción de la punta captadora.

Fuente: (Ingesco Lightning Solutions, 2016)

Siendo para el diseño:

- A: 170 mm
- B: 113 mm
- D2: 18 mm

D2 es la medida del diámetro de los pernos a utilizar, cumpliendo el mínimo de la norma que dicta ¼ de pulgada.

5.3 Techo

Como se ha conocido en el capítulo número 4, el aulario tiene un techo irregular debido a que tiene separaciones entre los diferentes pequeños edificios que componen la totalidad de la construcción. Para efectos prácticos se considerará como sólido, debido a que en la normativa NFPA 780 dice que, si hay lugares debajo de la zona de protección, se considerarán protegidos, por lo tanto puede protegerse la superficie completa y proteger a la vez los espacios vacíos en ella.

Se debe recordar que la separación del límite del techo con las puntas captadoras y con el conductor principal, tiene que ser 60 centímetros. Otro dato a tener en cuenta es que el perímetro del edificio a proteger es regular.

También debe tenerse en cuenta que, para pasar entre los espacios libres del techo, la norma NFPA 780 permite solo 900 mm sin que el conductor esté soportado. Esto es importante en nuestro edificio debido a que hay algunos espacios vacíos como observamos en las imágenes 67 y 68 por los cuales se tendrá que encontrar la forma de llevar el conductor siempre por un camino de máximo 900 mm o agregarle un soporte, que podría ser un riel, una escalera o un tubo de PVC sujeto por abrazaderas en el inicio y fin del vacío.

5.4 Aplicación del método de la esfera rodante y de las distancias mínimas

Como mencionado al inicio del capítulo, se va a considerar una estructura plana y maciza de un solo nivel, por lo cual, no puede aplicarse el método de la esfera rodante matemático, sino el método gráfico o el de las distancias mínimas entre picas.

Se ha visto en el marco teórico cómo se aplica el método de la esfera rodante en un edificio. Ya para su aplicación, se referirá únicamente a las exigencias de la normativa NFPA 780. El primer dato importante es que para la normativa, el radio de la esfera es de 46 metros.

A continuación, se mostrarán unas imágenes de cómo se aplicó el método de la esfera rodante sobre el plano de perfil “as built” del edificio aulario. Se eligió una de las caras del edificio al azar, ya que todas tienen la misma altura.

En la imagen 73, se muestra la dimensión de la circunferencia respecto al edificio.

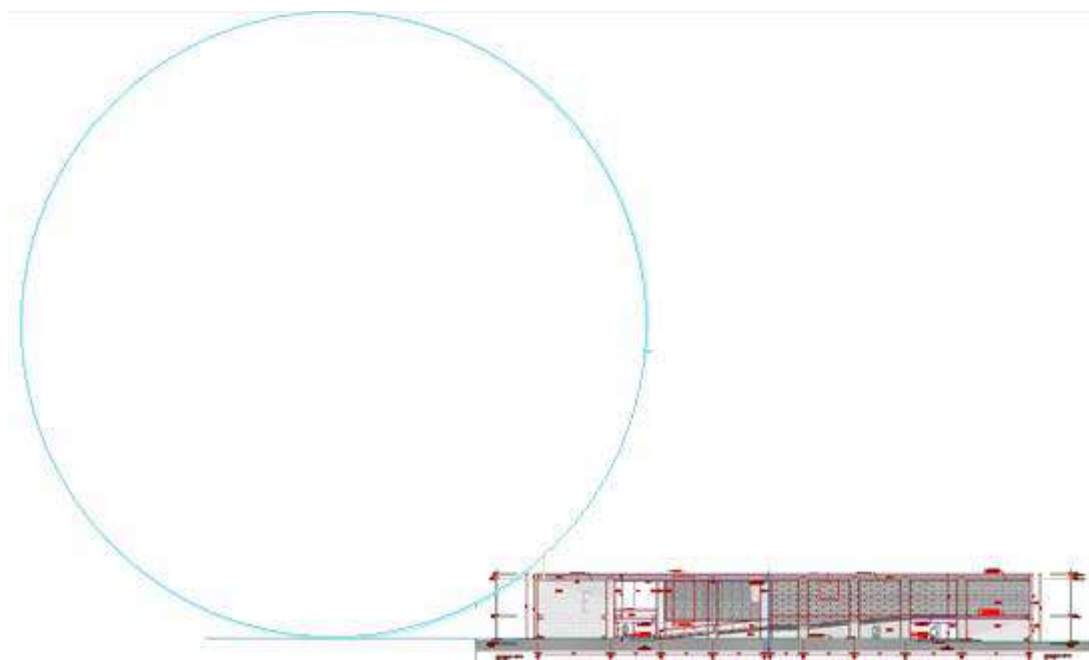


Imagen 73: Aplicación del método de la esfera rodante

Fuente: Elaboración propia

En la imagen 74, se ve a mayor detalle que la circunferencia se ha construido tangente al nivel del suelo.

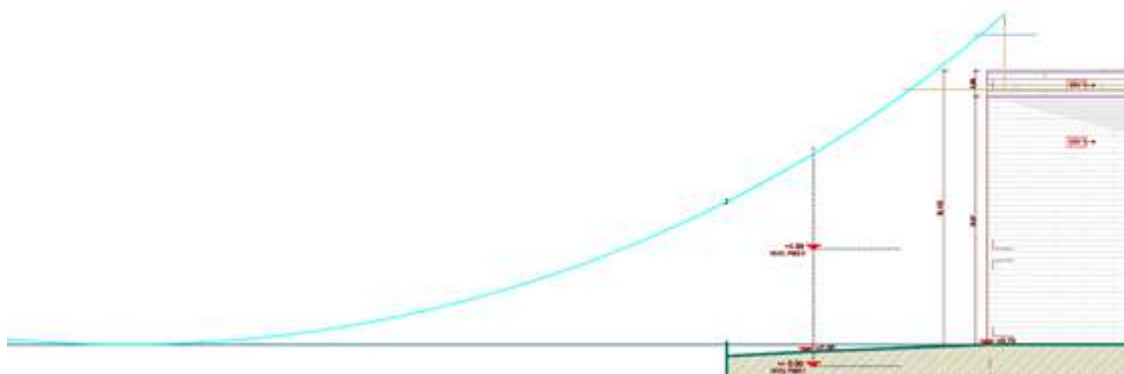


Imagen 74: Detalle de aplicación del método de la esfera rodante.

Fuente: Elaboración propia

En la imagen 75, se aprecia que la circunferencia se ha construido tangente al punto más alto de la punta captadora ubicada a 60 centímetros del límite del techo, la cual, en total tiene una altura de 2594 milímetros y se está representando por la línea amarilla mostrada en la imagen perpendicular al techo. La línea amarilla paralela al techo es el nivel en el cual las puntas captadoras se instalarán.

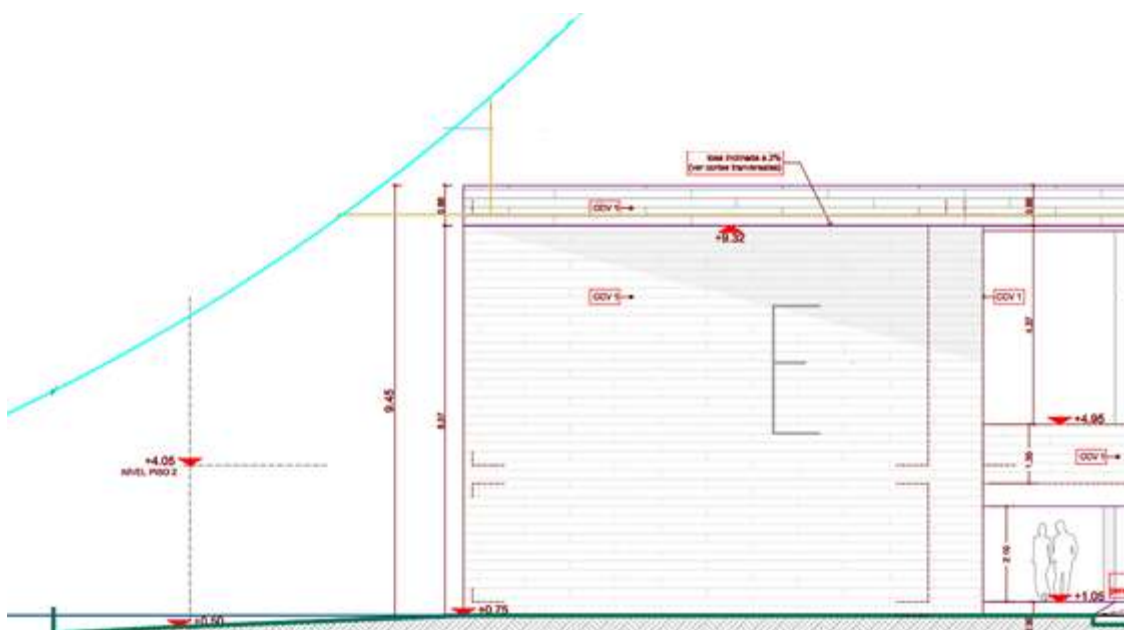


Imagen 75: Detalle de aplicación del método de la esfera rodante.

Fuente: Elaboración propia

La distancia máxima entre la primera y la segunda punta captadora, según la normativa NFPA 780, es de 6 metros, por lo tanto, en el AutoCAD, se ubicará el siguiente pararrayo a esa distancia y se verificará lo que sucede con la esfera rodante.

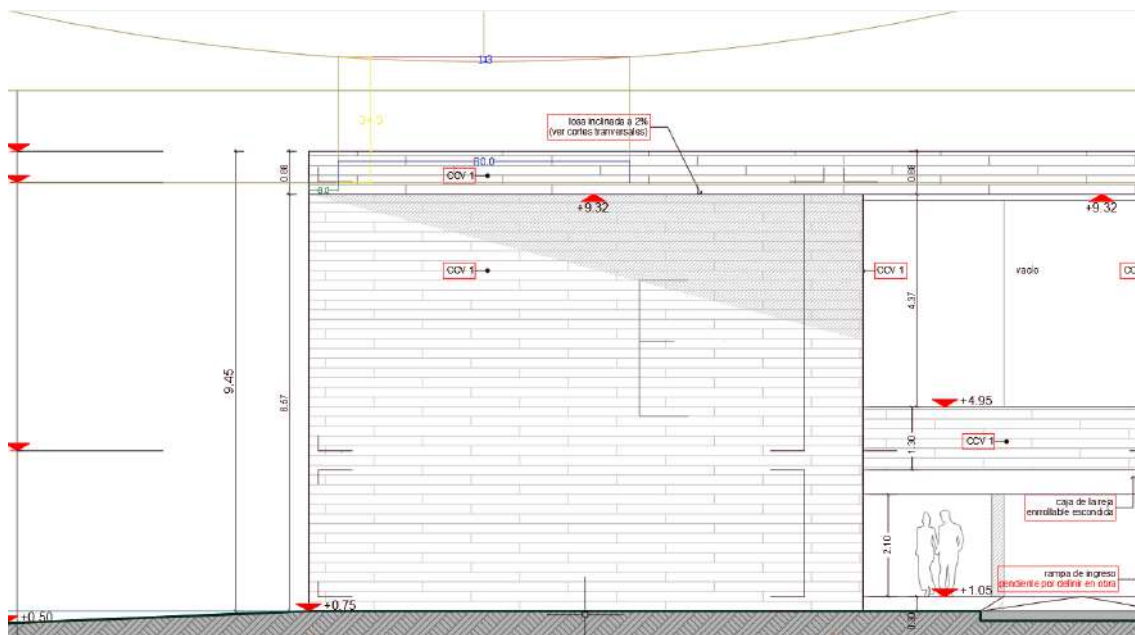


Imagen 76: Aplicación del método de la esfera rodante para determinar separación de puntas captadoras.

Fuente: Elaboración propia

Como puede apreciarse en la imagen 76, la zona de protección cae muy poco, casi no apreciable. En la imagen 77 encontramos el detalle de las distancias evaluadas.

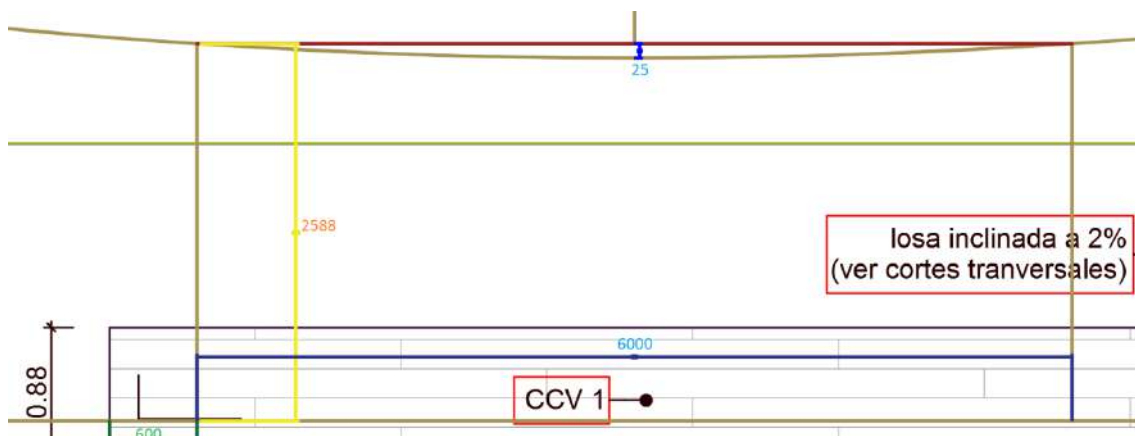


Imagen 77: Distancias de la aplicación del método de la esfera rodante.

Fuente: Elaboración propia

Así, se ve que la parte más baja de la circunferencia mide 100 milímetros, es decir, la zona de protección estaría a un nivel de 2494 milímetros. Como es superior a la altura de cualquier equipo ubicado en el techo del edificio a proteger, podemos concluir que 6 metros de separación es óptimo y cumple con las condiciones de diseño. Teniendo

este dato, con las longitudes del edificio, se puede obtener el número de puntas captadoras a instalar:

- $L = 72.4 \text{ m}$
- $W = 72.06 \text{ m}$

A cada una de estas longitudes hay que restarles 1.2 metros, debido a que debe tenerse de separación 0.6 metros entre el pararrayo y el extremo del techo. Por lo tanto, quedará:

- $L = 71.2 \text{ m}$
- $W = 70.86 \text{ m}$

Si estas longitudes se dividen entre 6 metros nos dará como resultado el número de intervalos de 6 metros, no el número de pararrayos. El resultado es siempre un número decimal mayor a 11, por lo que debe diseñarse con 12 intervalos, lo que hace que sean 13 puntas captadoras a lo largo de cada cara del edificio, y un conjunto de 52 en todo el perímetro. La nueva separación sería dividiendo entre 12, por lo que nos dará:

- $L = 71.2 \text{ m} / 12 \text{ intervalos} = 5.933 \text{ m}$
- $W = 70.86 \text{ m} / 12 \text{ intervalos} = 5.905 \text{ m}$

Teniendo el número de puntas captadoras y su separación, el siguiente paso será ubicarlos en el techo del edificio para ver si hay que modificar alguna posición por interferencias constructivas, muros o tragaluz. Recordemos que el edificio a trabajar tiene muchos espacios blancos en el techo, y debe definirse primero los del perímetro antes de completar la malla.

La forma de evaluar será hacer zoom al perímetro del edificio y ubicar en él círculos amarillos, los cuales estarán posicionados en el sitio de una punta captadora. Si se aprecia en las imágenes que el círculo está en un tragaluz, escalera, u otra condición que pudiera alterar su posición, se modificará la misma al finalizar la evaluación de todo el perímetro. Finalmente, se obtendrá la posición exacta de cada pararrayo en el perímetro y se procederá a hacer la malla completa.

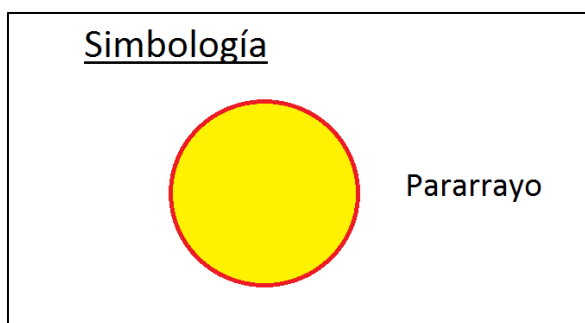


Imagen 78: Leyenda para las imágenes relacionadas a planos de pararrayos

Fuente: Elaboración propia

En el sector occidental del techo no se tiene mayor consideración, ya que ninguno de los soportes de las puntas captadoras cae sobre algún espacio vacío.

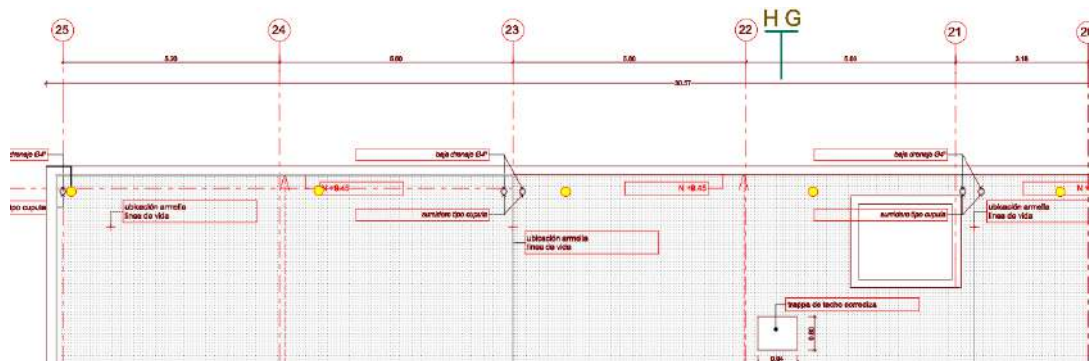


Imagen 79: Pararrayos perímetro occidental parte 1 (Vista de planta).

Fuente: Elaboración propia.

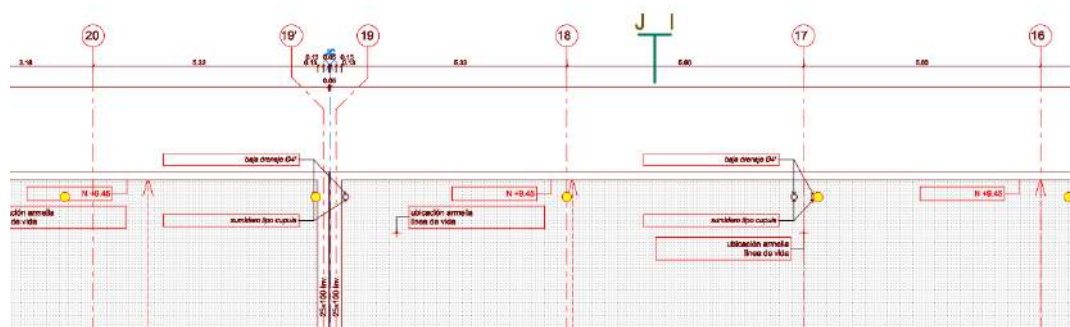


Imagen 80: Pararrayos perímetro occidental parte 2.

Fuente: Elaboración propia.

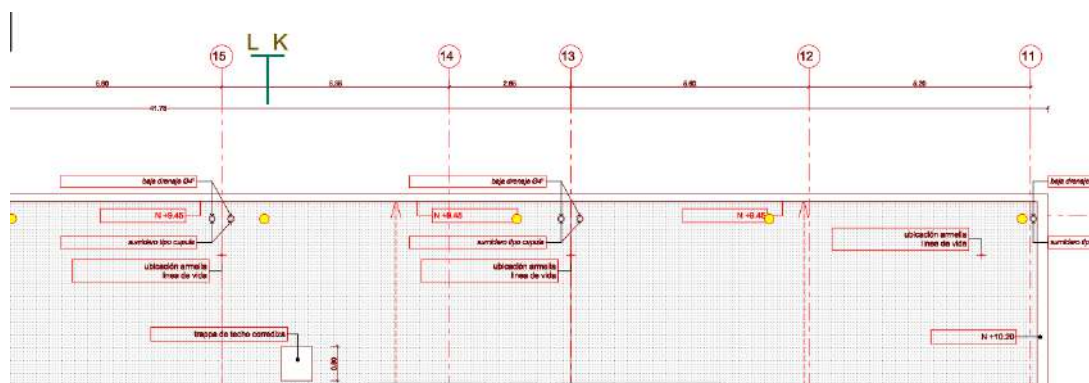


Imagen 81: Pararrayos perímetro occidental parte 3.

Fuente: Elaboración propia.

Ahora se evalúa la zona oriental del perímetro del edificio, la cual es muy similar a la occidental.

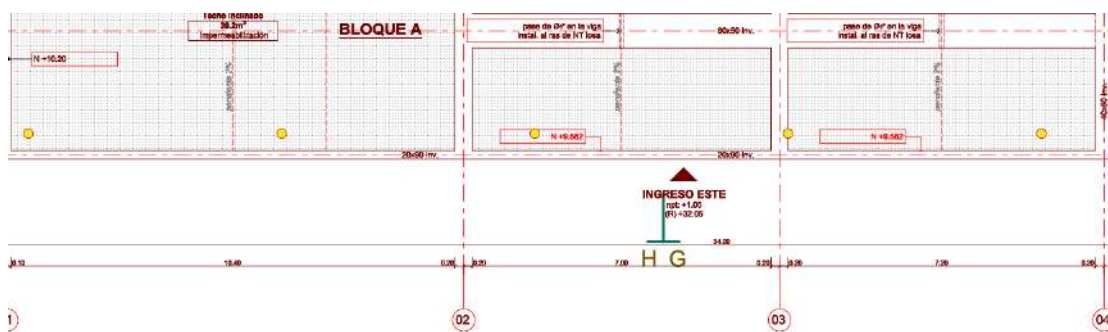


Imagen 82: Pararrayos perímetro oriental parte 1.

Fuente: Elaboración propia.

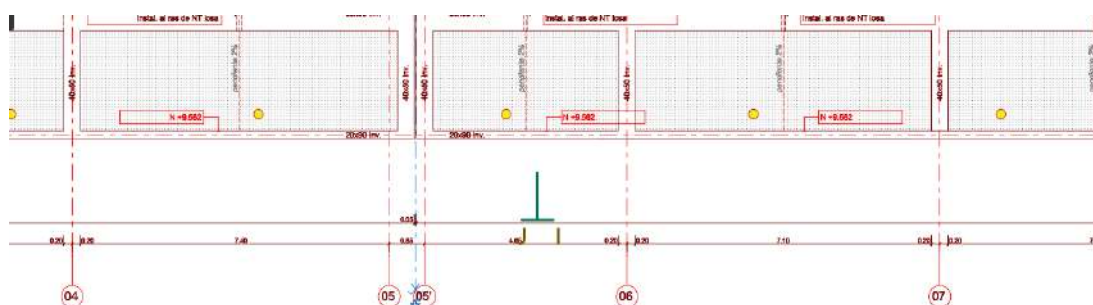


Imagen 83: Pararrayos perímetro oriental parte 2.

Fuente: Elaboración propia.

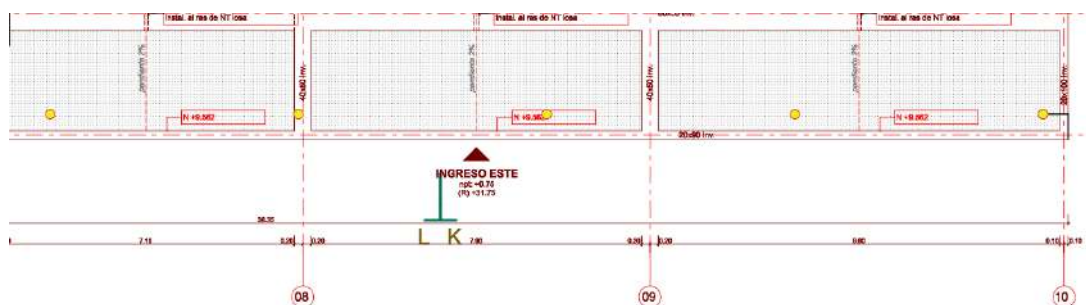


Imagen 84: Pararrayos perímetro oriental parte 3.

Fuente: Elaboración propia.

Puede comprobarse que no hay ninguna punta captadora que se ubique en un vacío o tragaluz.

Ahora se evaluará el sector sur:

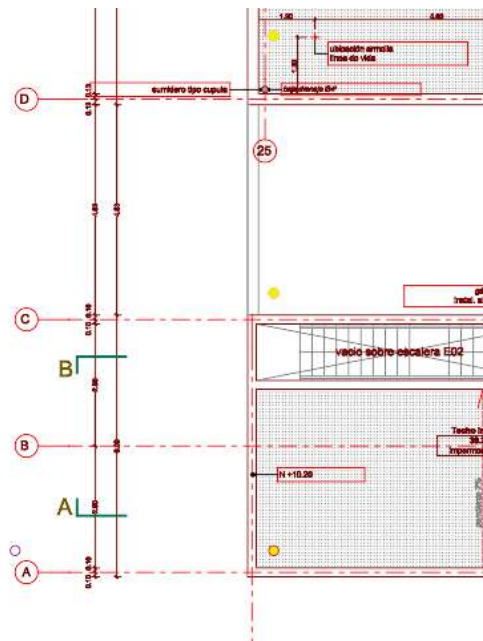


Imagen 85: Pararrayos perímetro sur parte 1.

Fuente: Elaboración propia.

Aquí se tiene un problema mayor con el pararrayo que está cercano al eje C, debido a que caería en un tragaluz.

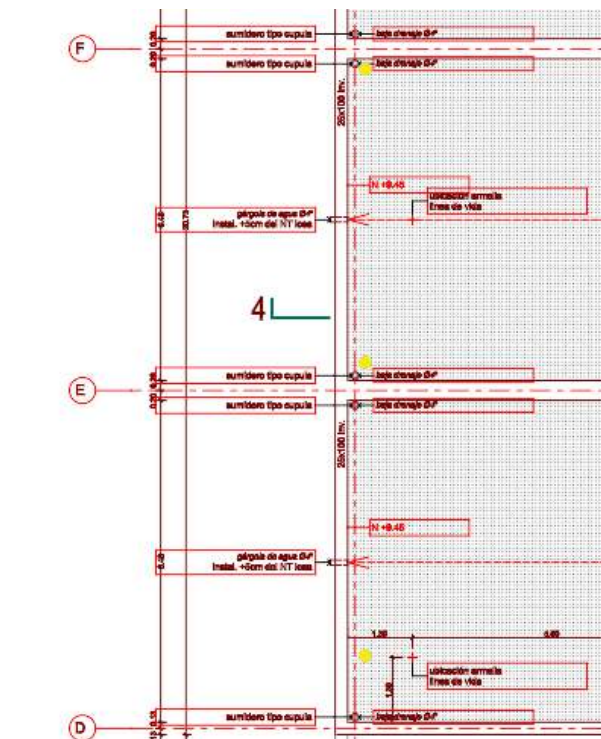


Imagen 86: Pararrayos perímetro sur parte 2.

Fuente: Elaboración propia.

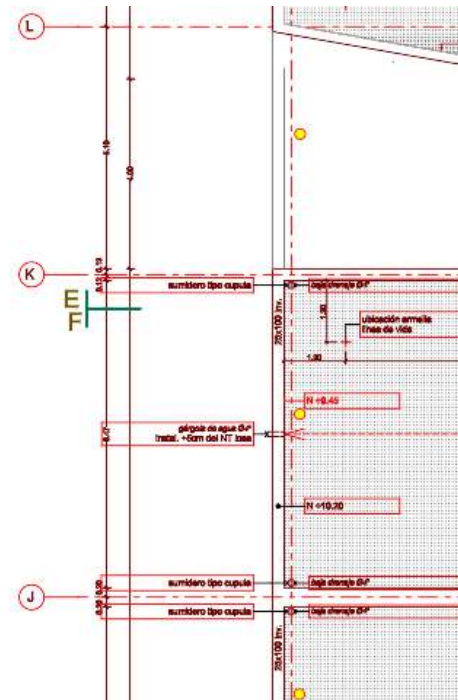


Imagen 89: Pararrayos perímetro sur parte 5.

Fuente: Elaboración propia.

En la imagen 89 se aprecia también que una punta captadora entre los ejes L y K queda en un tragaluz o un acceso, por lo cual debe evaluarse su posición.

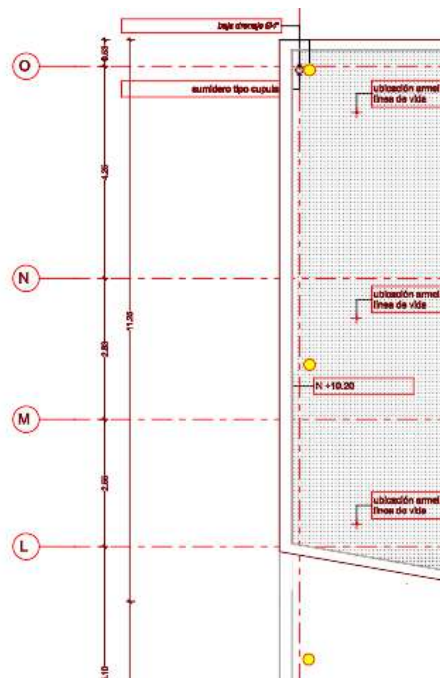


Imagen 90: Pararrayos perímetro sur parte 6.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la parte norte del edificio:

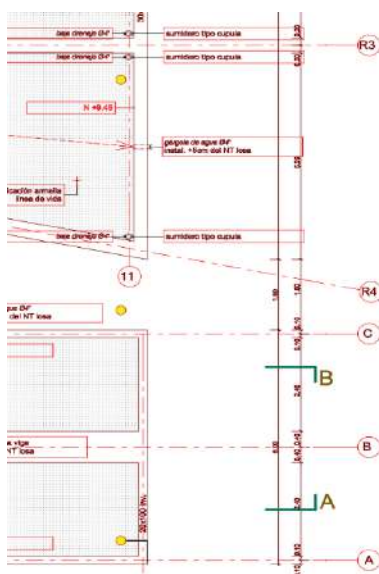


Imagen 91: Pararrayos perímetro norte parte 1.

Fuente: Elaboración propia.

En la imagen 91 se aprecia que una punta captadora queda en un espacio blanco, entre los ejes R4 y C. En la imagen 92 también se apreciará una pica que cae sobre una escalera entre los ejes Q4 y R1.

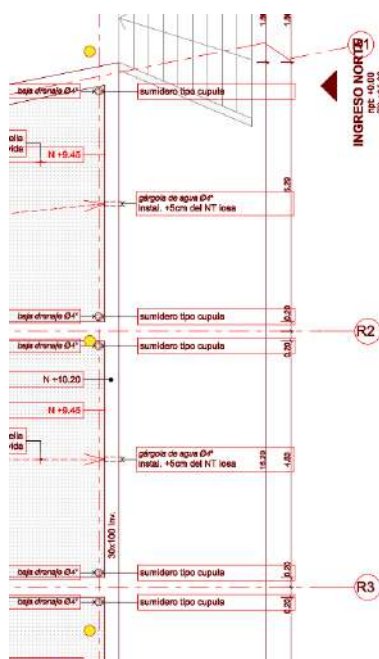


Imagen 92: Pararrayos perímetro norte parte 2.

Fuente: Elaboración propia.

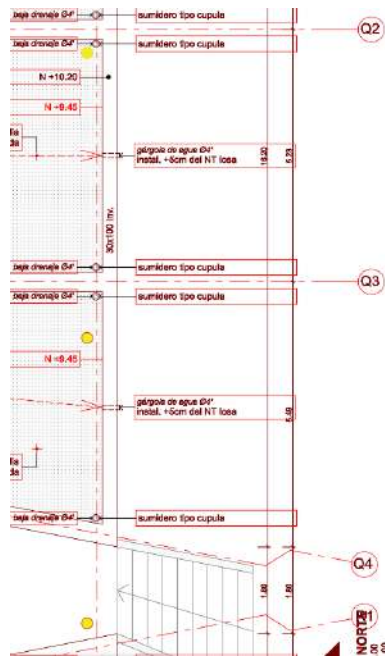


Imagen 93: Pararrayos
perímetro norte parte 3.

Fuente: Elaboración propia.

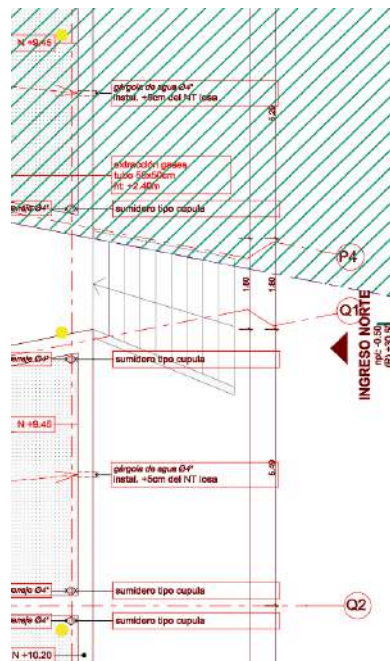


Imagen 94: Pararrayos
perímetro norte parte 4.

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la imagen 94, también se tiene que reubicar el pararrayo que está muy próximo al espacio en blanco, en medio de los ejes P4 y Q1.

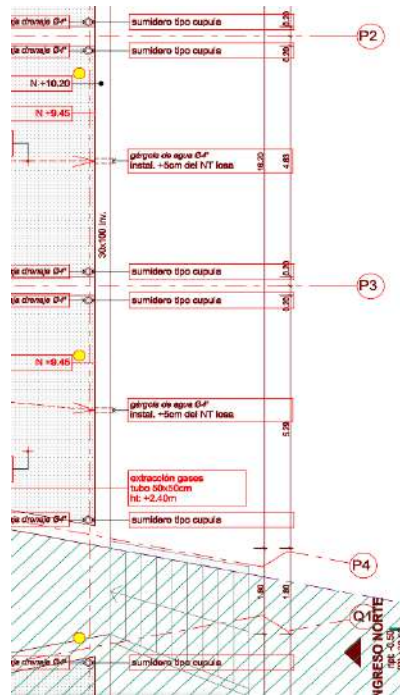


Imagen 95: Pararrayos
perímetro norte parte 5.

Fuente: Elaboración propia.

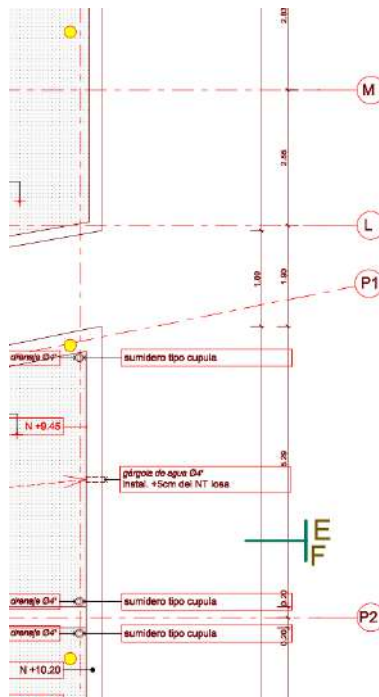


Imagen 96: Pararrayos
perímetro norte parte 6.

Fuente: Elaboración propia.

Ítem 1:

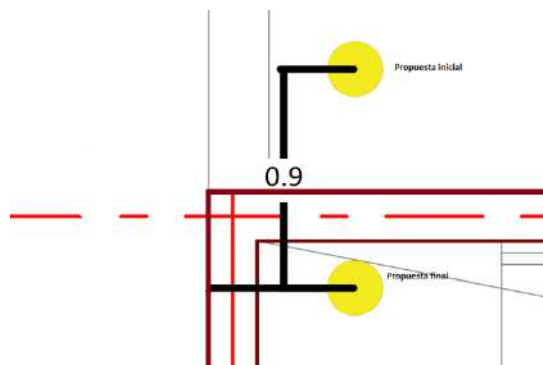


Imagen 98: Reubicación ítem 1.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en las imágenes 98 y 99, se ha reubicado hacia el este 0.9 metros. Eso hace que la distancia hacia el siguiente pararrayo sea de 6.81 metros.

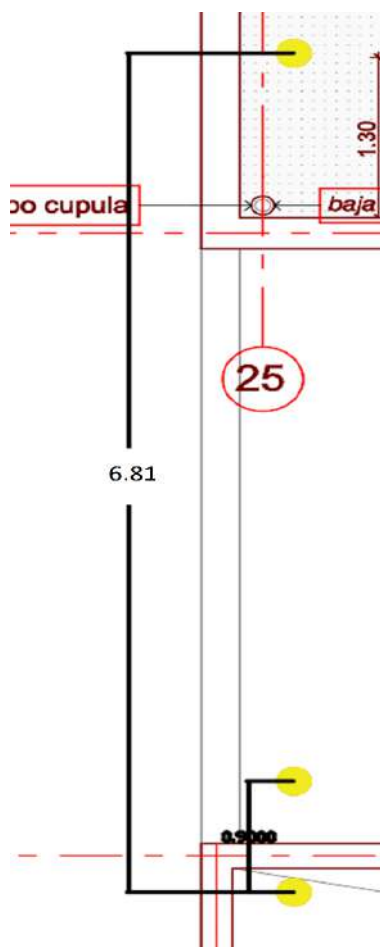


Imagen 99: Distancia entre ítem 1 y pararrayo existente.

Fuente: Elaboración propia.

Ítem 2:

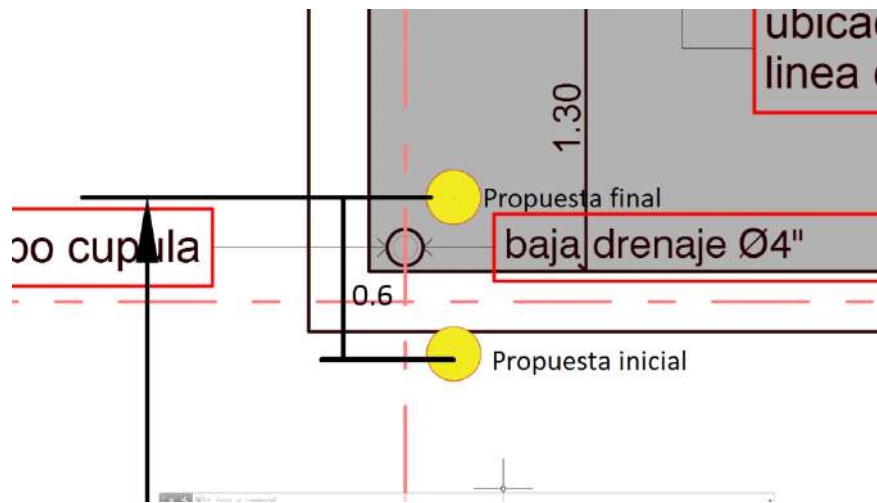


Imagen 100: Reubicación de ítem 2.

Fuente: Elaboración propia.

Cómo puede apreciarse, el ítem 2 ha tenido que desplazarse 60 centímetros, quedando alejado del siguiente pararrayos 6.51 metros.

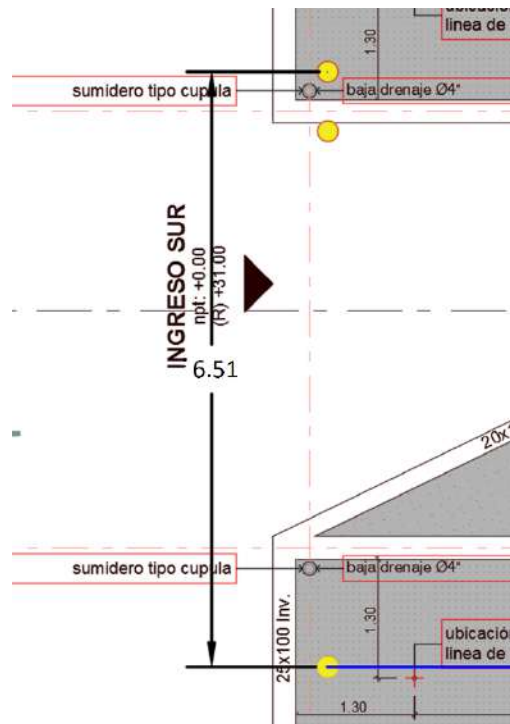


Imagen 101: Distancia entre ítem 2 y pararrayos existente.

Fuente: Elaboración propia.

Ítem 3:

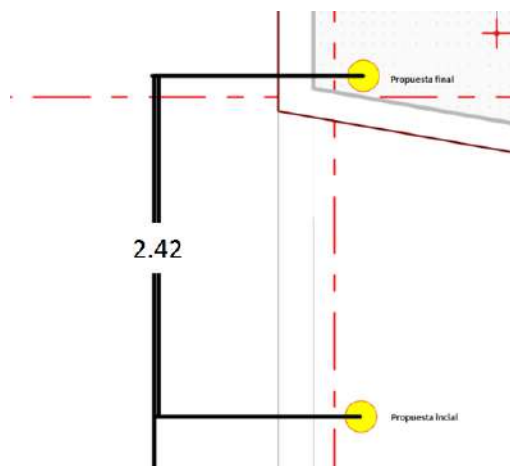


Imagen 102: Reubicación de ítem 3.

Fuente: Elaboración propia.

Se ha reubicado hacia el oeste una distancia de 2.42 metros, por lo cual, la distancia entre el pararrayo reubicado y el anterior quedaría de 8.32 metros.

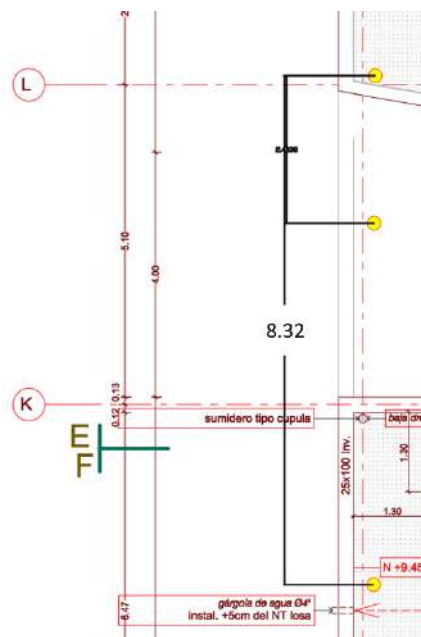


Imagen 103: Distancia entre ítem 3 y pararrayos existente.

Fuente: Elaboración propia.

Ítem 4:

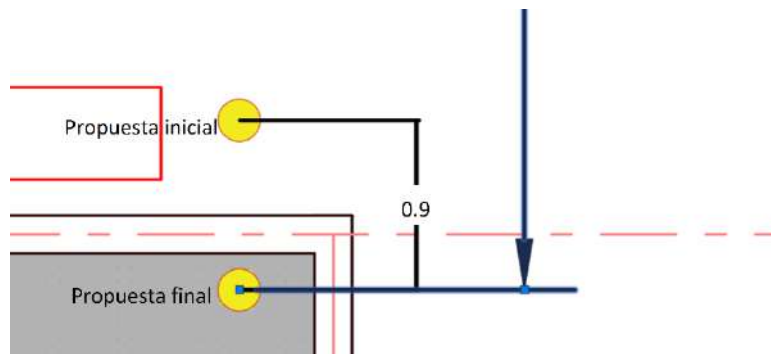


Imagen 104: Reubicación de ítem 4.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en las imágenes 105 y 106, el pararrayo había quedado ubicado en un vacío, por lo cual, se ha reubicado 90 centímetros para que entre en el techo del edificio. Esto conlleva a que exista una separación entre éste y el pararrayo siguiente de 6.81 metros.

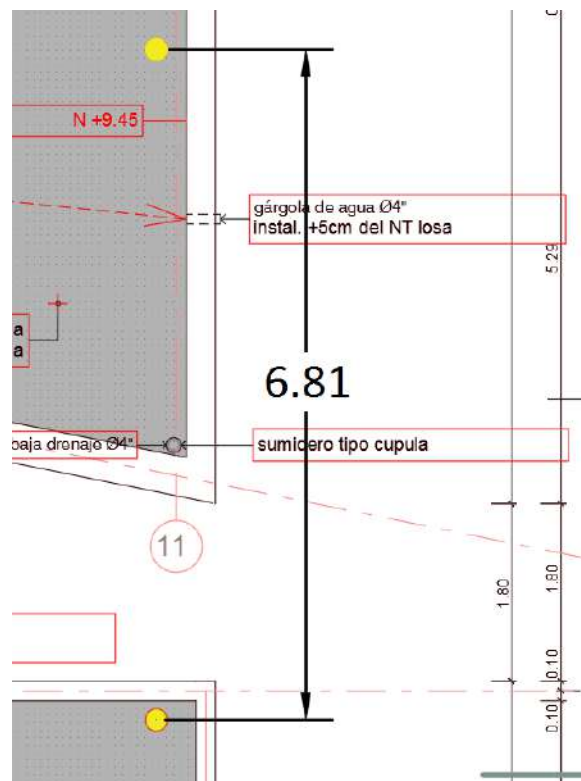


Imagen 105: Distancia entre ítem 4 y pararrayo existente.

Fuente: Elaboración propia.

Ítem 5:

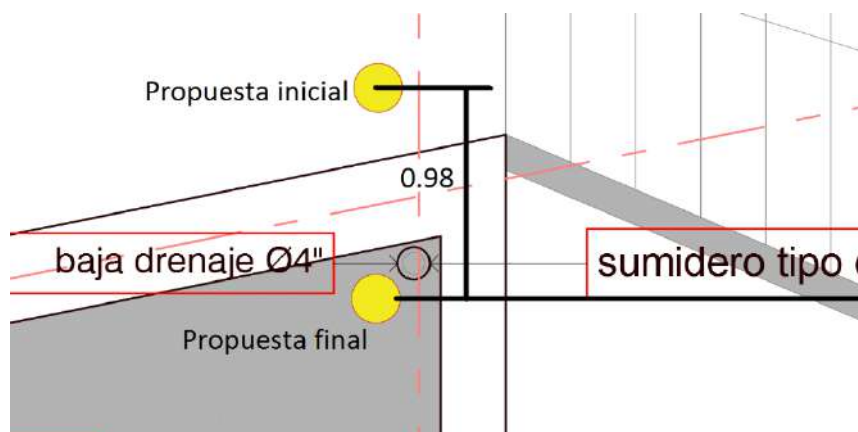


Imagen 106: Reubicación ítem 5.

Fuente: Elaboración propia.

En este ítem podemos apreciar que se reubica casi 98 centímetros, lo cual hará que la distancia entre el pararrayo existente y el ítem 5 reubicado, sea de 6.88 metros.

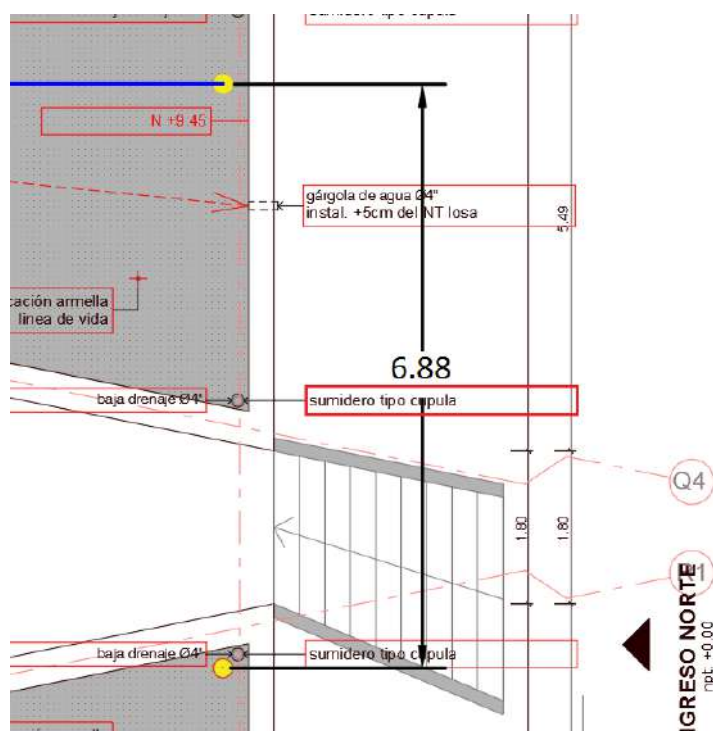


Imagen 107: Distancia entre ítem 5 y pararrayos existente.

Fuente: Elaboración propia.

Ítem 6:

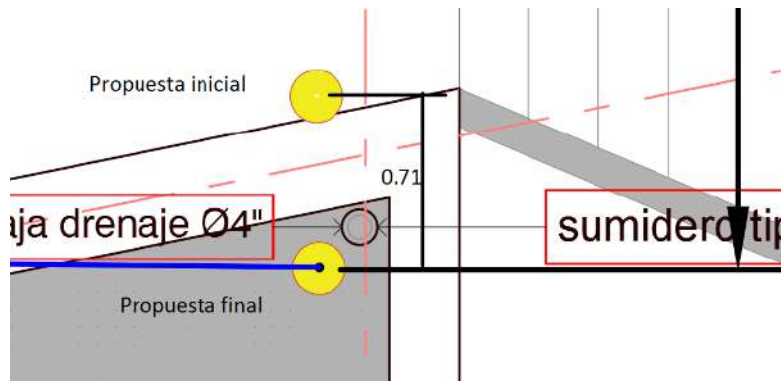


Imagen 108: Reubicación ítem 6.

Fuente: Elaboración propia.

En esta ocasión, puede observarse en la imagen 109 que la punta captadora no quedó ubicada en su totalidad en un vacío, sin embargo, es probable que no iba a poder asentar los 4 pernos de la placa de fijación al techo, por lo cual se decidió reubicar 70 centímetros.

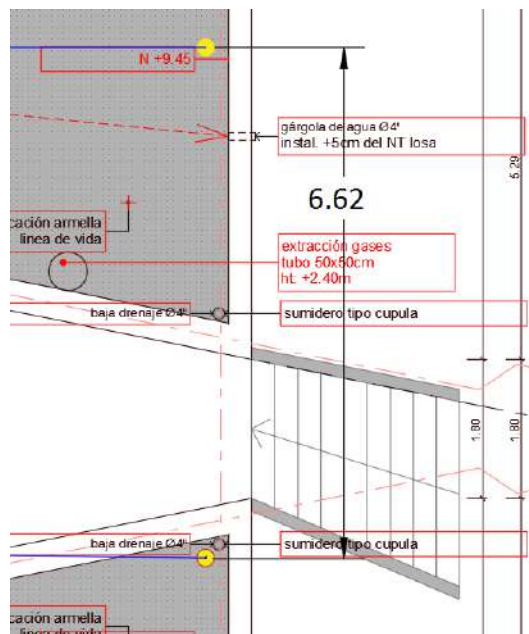


Imagen 109: Distancia entre el ítem 6 y el pararrayo existente.

Fuente: Elaboración propia.

Habiendo terminado con todos los ítems, puede apreciarse que el ítem 3 es el caso más crítico debido a que existe una distancia de 8 metros entre las dos puntas captadoras. Este caso es el que se evaluará con el método de esfera rodante para identificar cuánto se pierde de zona protegida.

Se utilizará la vista de perfil y se colocarán los mástiles en la posición final, es decir, la ya modificada. Se trazará la esfera de 46 metros de radio y se halla gráficamente la distancia que afecta a la zona de protección.

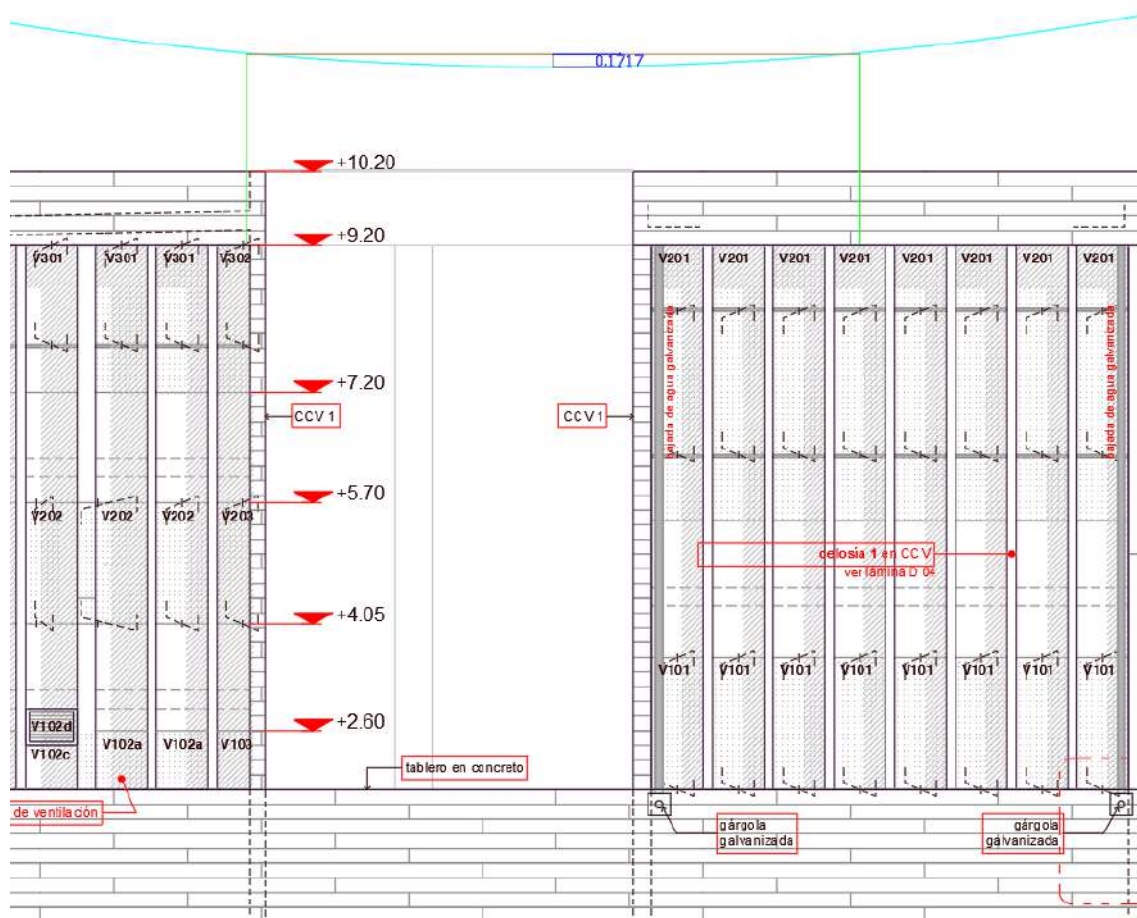


Imagen 110 : Vista de elevación con la separación dada por el ítem 3.

Fuente: Elaboración propia.

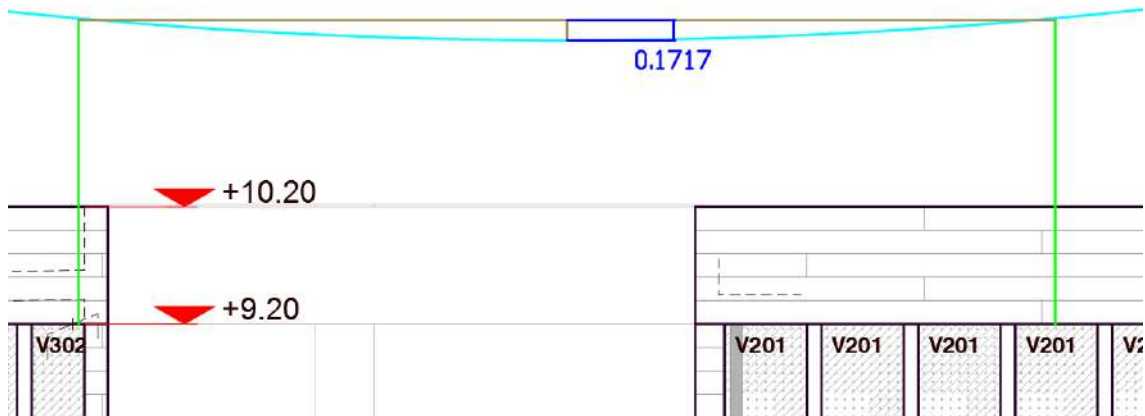


Imagen 111: Detalle de la vista de elevación de la imagen 107.

Fuente: Elaboración propia.

De verde, se aprecian los pararrayos en mención, de celeste la esfera de 46 m de radio y de amarillo la línea imaginaria entre los límites de las puntas captadoras. La disminución de la zona de protección es de 0.172 metros, con lo cual podemos comprobar que la zona de protección sigue siendo óptima a pesar de la variación de distancias.

altura del mástil – disminución zona de protección > altura de equipos

$$2584 \text{ mm} - 172 \text{ mm} = 2412 \text{ mm}$$

$$2412 \text{ mm} > 1800 \text{ mm}$$

Habiendo definido la ubicación de las puntas captadoras ubicadas en el perímetro, se procede a proyectar una cuadrícula que tenga como ejes los pararrayos antes mencionados. Ésta será de utilidad para definir la ubicación de las puntas captadoras al interior del techo, ya que se usarán las intersecciones de los ejes para ubicar los pararrayos y así guardar la simetría en el diseño y la distancia máxima normada entre ellos, la cual es de 15 metros.

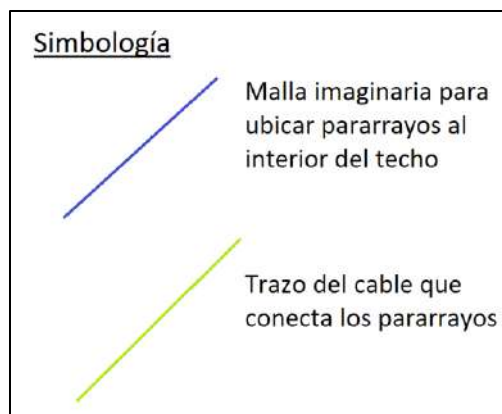


Imagen 112: Simbología para los planos referidas a cableado de pararrayos

Fuente: Elaboración propia

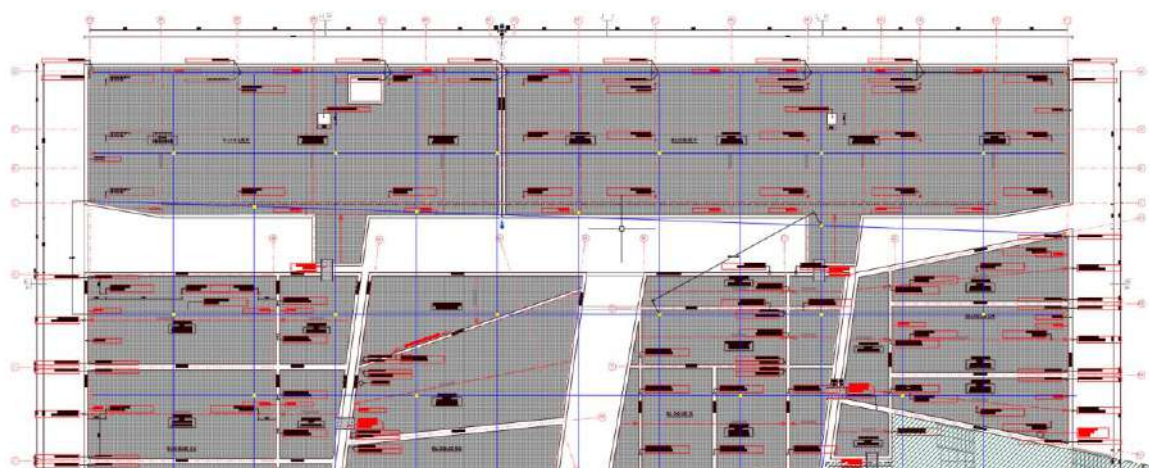


Imagen 113: Lado occidental del techo con la malla creada y pararrayos ubicados.

Fuente: Elaboración propia.

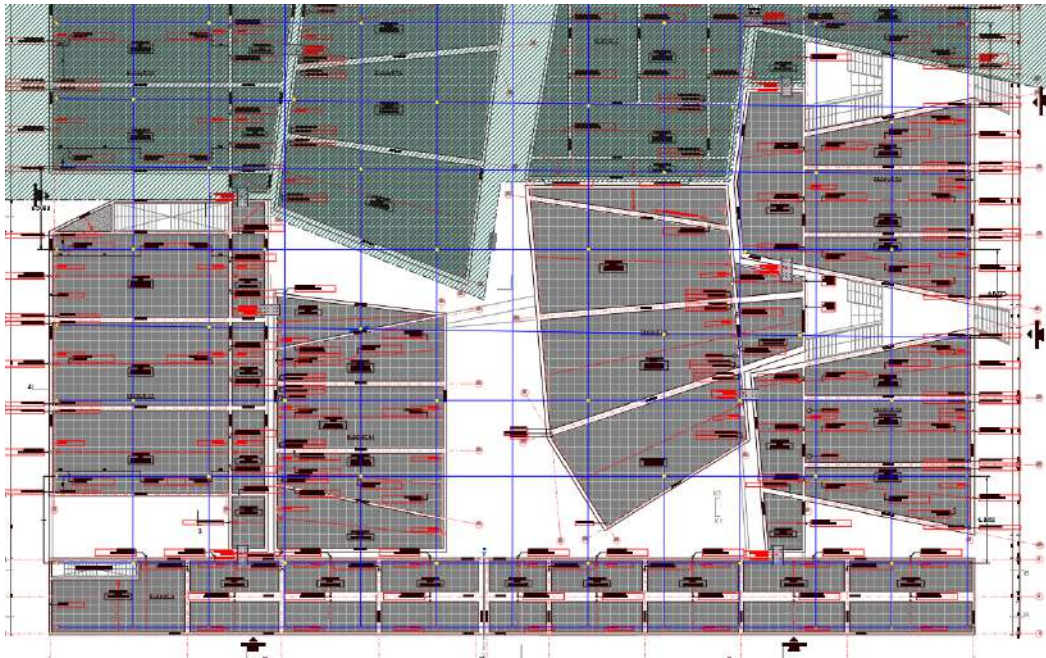


Imagen 114: Lado oriental del techo con la malla y los pararrayos ubicados.

Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de los puntos amarillos es un pararrayo, manteniendo la leyenda de la imagen 78, los cuales han sido ubicados solventando las interferencias constructivas como tragaluces, escaleras, muros desnivel, entre otros. El metrado total es de 104 puntas captadoras.

Lo que procede ahora es definir el trazo del conductor que una los pararrayos. Se debe recordar que la trayectoria del conductor debe ser, en su preferencia, recta, respetando distancias a materiales inflamables y que ningún pararrayo puede ser “un punto muerto”, es decir, tener únicamente un cable a su salida, ya que éstos deben tener al menos dos caminos conductores para transportar la corriente eléctrica de una descarga.

El trazo del cableado quedará con la siguiente trayectoria mostrada en las imágenes 115, 116 y 117:

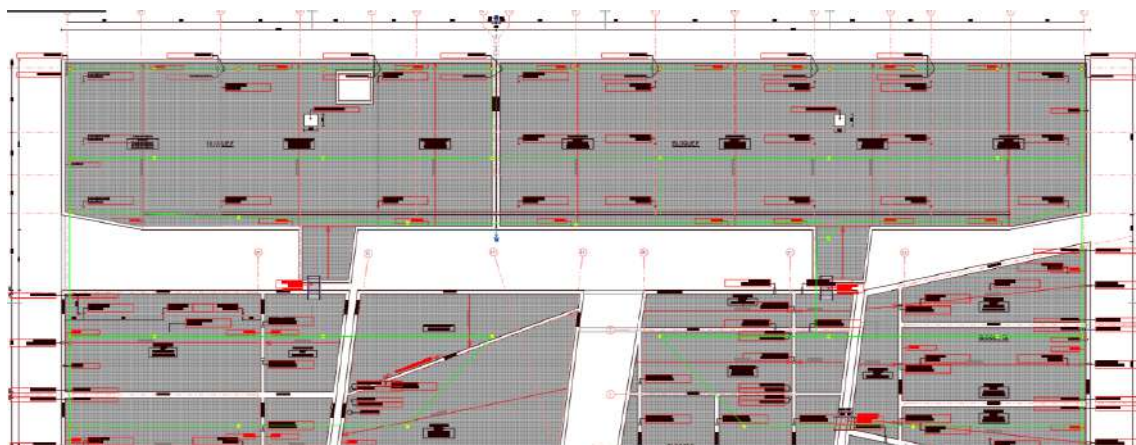


Imagen 115: Parte 1 del trazado del cable

Fuente: Elaboración propia

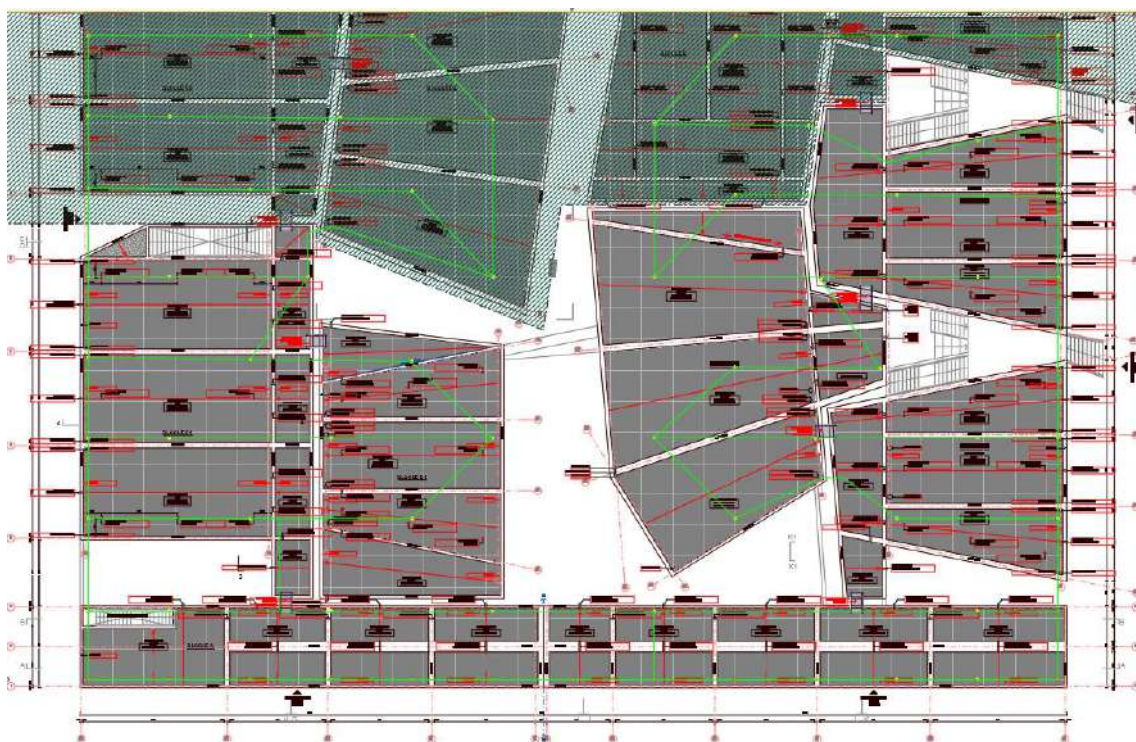


Imagen 116: Parte 2 del trazado del cable.

Fuente: Elaboración propia

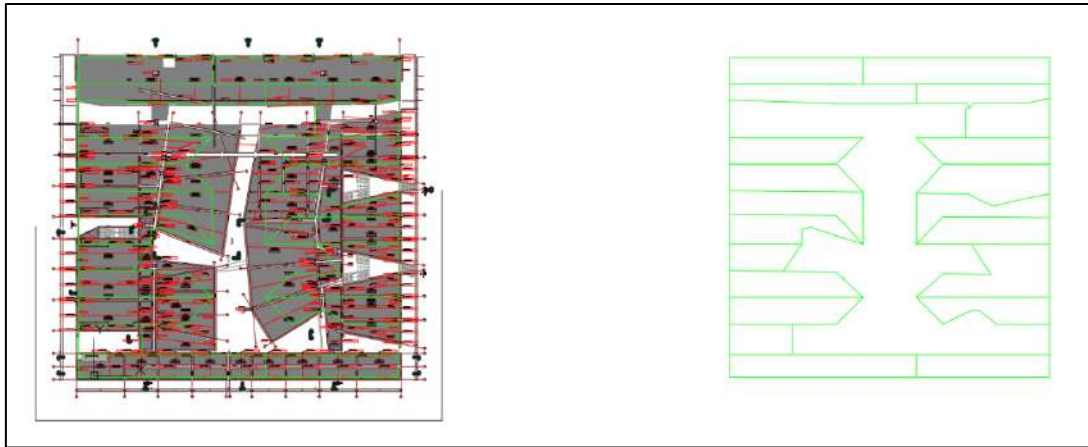


Imagen 117: Trazo del conductor de la malla de pararrayos.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, para obtener el metrado, se ha usado el comando LIST y el DATA EXTRACTION del AutoCAD para obtener la sumatoria de todas las líneas. El mismo es igual a 670 metros.

5.5 Conductores

Como definido en el punto 5.1, se utilizará la Tabla 8 para las dimensiones y materiales de los conductores. Debe tenerse cuidado en el trazo del diseño para no violar los requerimientos de la norma, como curvaturas y distancias.

Se encuentra en el mercado cables duros y recocidos, los cuales poseen cada uno sus propiedades:

- Cable recocido: Para conexiones a tierra, amarres, antenas de radio y TV, etc.
- Cobre duro: Para redes de distribución y líneas de transmisión aéreas.

Por lo tanto, se debe tener en consideración qué tipo de cable de cobre se utiliza. Se adjuntará como anexo una hoja técnica de la empresa “CONDUCTORES Y CABLES DEL PERÚ”, la cual describe los distintos tipos de cable, su temperatura de operación, la norma de fabricación y los datos constructivos según la sección nominal, el número de hilos, etc.

Entonces, se elegirá una opción comercial de la ficha técnica adjunta como anexos que se han mencionado con anterioridad:

- Cable conductor principal: 35 mm cuadrados de sección transversal y 305 g/m de peso por longitud.
- Cable conductor conector: 16 mm cuadrados de sección transversal. y 139 g/m de peso por longitud.

- Cable de bajada: 35 mm cuadrados de sección transversal y 305 g/m de peso por longitud.

También la normativa nos da la posibilidad de rodear un equipo si este interfiere en el trazo ideal de nuestro conductor, teniendo la consideración de no topar con el equipo.

5.5.1 Cables de bajada

Como el edificio E tiene el perímetro de 288 metros y debe haber un cable de bajada cada 30 metros como máximo, se puede deducir que, como mínimo, deben haber 10 conductores de bajada hacia tierra, lo que significa que la malla a tierra del ejemplo tendrá 10 pozos.

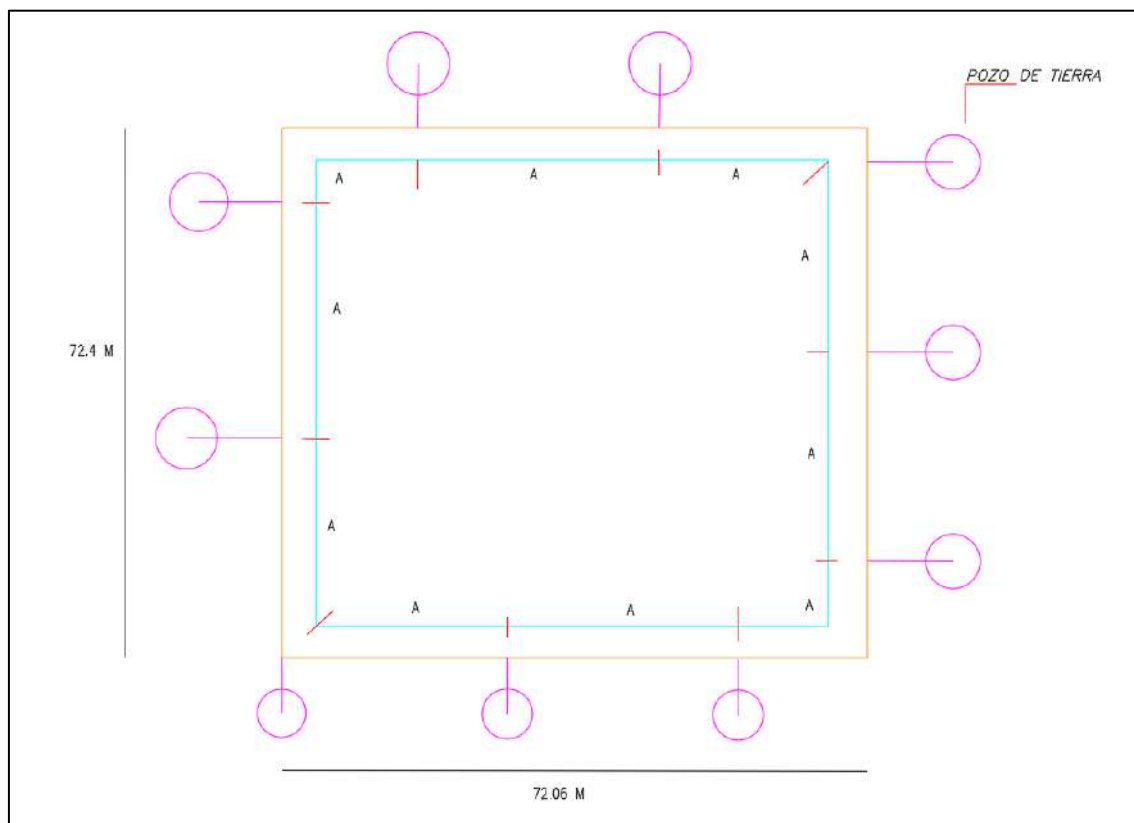


Imagen 118: Distribución de los pozos a tierra.

Fuente: Elaboración propia

La imagen 118 muestra la distribución de los pozos en el perímetro del edificio. Éstos se separan una distancia “A”, donde A es aproximadamente 28.6 metros, cumpliendo con el estándar de estar a máximo 30 metros.

Así mismo, en la misma ubicación pero en el techo del edificio debe ponerse el conector tipo “Tee”, el cual permitirá derivar el conductor principal de la malla hacia el conductor de bajada.

En la imagen 119 se puede clarificar el detalle de los conductores de bajada:

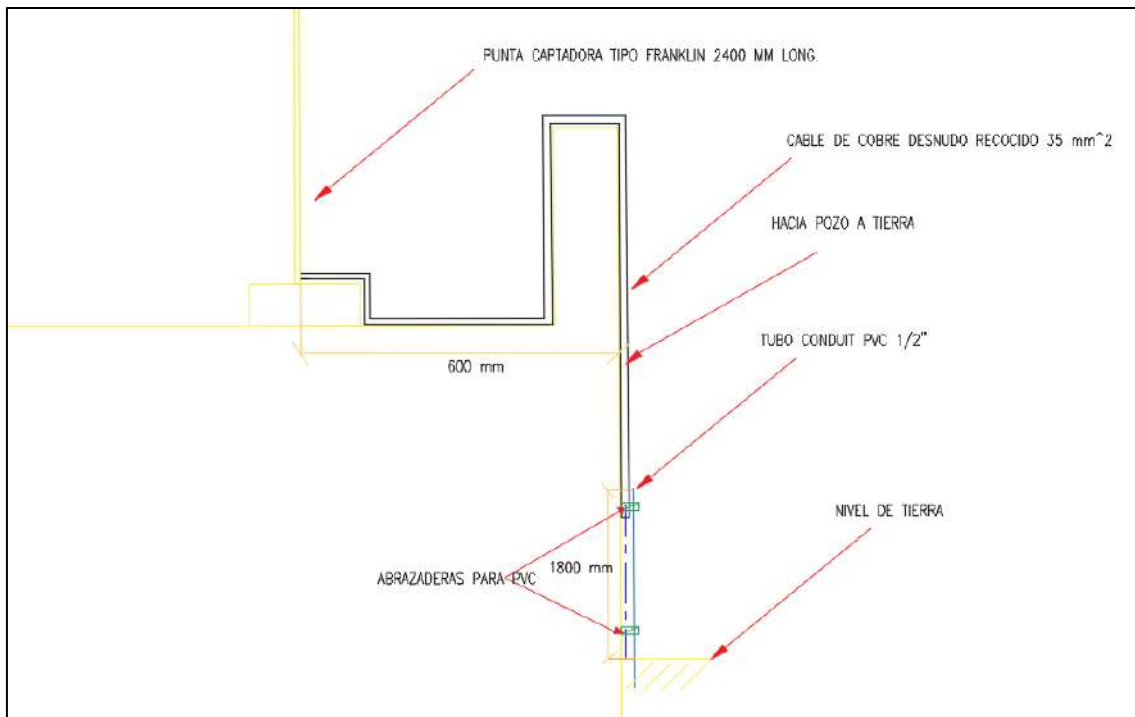


Imagen 119: Detalle de bajada de cables a tierra

Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que desde la malla de pararrayos se sorteará el muro del techo y se usarán grapas para peinar el cable por 8.20 metros que tiene de bajada. El edificio tiene 10 metros de altura, pero como se pondrá el cable en un tubo de PVC a 1.8 m antes de ingresar a tierra, se utilizarán dos abrazaderas para ducto de PVC en estos últimos 1.8 m, ya no las de fijación de cable desnudo, sino las que se muestran en la imagen 122.

Se aproxima que cada cable de bajada tendrá 13.5 metros de conductor, ya que si son 60 centímetros de distancia entre la malla y el límite del edificio, sumando 60 centímetros del muro, 10 metros de bajada más los 60 centímetros que tiene que estar de profundidad el pozo más, finalmente, una pequeña reserva. Como son 10 pozos, serán 135 metros.

Como mencionado anteriormente, se pondrá tubo a 1.8 metros del piso antes de entrar a la tierra. Para seleccionar este tubo se recurrirá, como en pasadas ocasiones, a fichas técnicas de algún proveedor cualquiera para determinar las características exactas y comerciales del material:

- Tubo PVC “conduit” tipo liviano, de ½ pulgada (tiene que tener 3 veces la sección transversal del conductor que pasará por dentro).
- Curvas de 45 grados campana x espigo, de ½ pulgada. Éstas se usarán en la entrada del conductor con “conduit” a la tierra para dirigirse a su pozo.

Ya que son 10 pozos a tierra, y debe ponerse 1.80 metros por cada uno, el total de PVC necesario es de 18 metros, por lo que se comprarán 6 tubos de 3 metros. Se le pondrá anticorrosivo 90 centímetros antes de que entre a la tierra.

5.6 Pernos y elementos de sujeción

Los pernos deben tener un diámetro mínimo de $\frac{1}{4}$ in según la norma. Los únicos pernos que ya tenemos definidos son los que fijan el mástil de la punta captadora al techo y tienen un diámetro de 18 mm, lo cual cumple con la normativa.

Ahora se debe ver los pernos y elementos que sujeten el cable de cobre desnudo durante su trayecto desde las puntas captadoras hasta el pozo a tierra, y también las abrazaderas que sostendrán los tubos “conduit” que se ubicarán a 1.8 metros del suelo.

Se ha encontrado dentro del mercado abrazaderas que tienen tirafondo y tarugo, el cual se presentará a continuación:



Imagen 120: Abrazadera con tirafondo

Fuente: (Ingesco Lightning Solutions, 2016)

- Abrazadera con tirafondo M6 cable de 35 mm².

El proceso para instalar estas abrazaderas se describe en la imagen 72, la cual también se ha extraído de la ficha técnica del elemento.

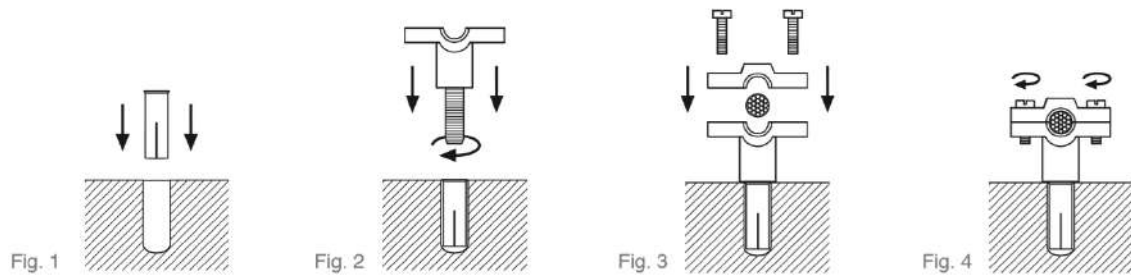


Imagen 121: Proceso de instalación de las abrazaderas

Fuente: (Ingesco Lightning Solutions, 2016)

Se aprecia en la imagen 121 que el primer paso es perforar la pared o techo donde se vaya a sujetar el conductor, para introducir el tarugo del autorroscante. Como segundo paso, se inserta y se ajusta a la superficie la primera mitad de la abrazadera, luego se coloca el conductor y se cierra con la segunda mitad del elemento fijándola con dos pernos que se incluyen en el producto.

Las grapas de fijación se instalan cada 90 centímetros, por lo que, al tener el metrado del cable, se puede obtener el número de abrazaderas. Hay que tener en cuenta que debe contabilizarse los metros lineales del cable de la malla de pararrayos junto con el de los cables de bajada.

Para el ejemplo del trabajo, la sumatoria del cable de la malla es 670 y la de los cables de bajada es 135 metros, por lo que sumaría 805.

Las abrazaderas del tubo de PVC serán las llamadas comúnmente de “dos brazos” y su dimensión será de $\frac{1}{2}$ pulgadas, es decir, la misma que el tubo. Se necesitan dos por cada tubo y si son 10 conductores de bajada, se necesitarán 20 abrazaderas. Un ejemplo puede observarse en la imagen 122.

- Abrazadera 2 orejas sap $\frac{1}{2}$ ”



Imagen 122: Abrazadera de dos orejas

Fuente: (Tienda SODIMAC, 2018)

El proveedor no tiene disponible en su página web la ficha técnica detallada, sin embargo, tiene varios datos que se muestran en la imagen 123.

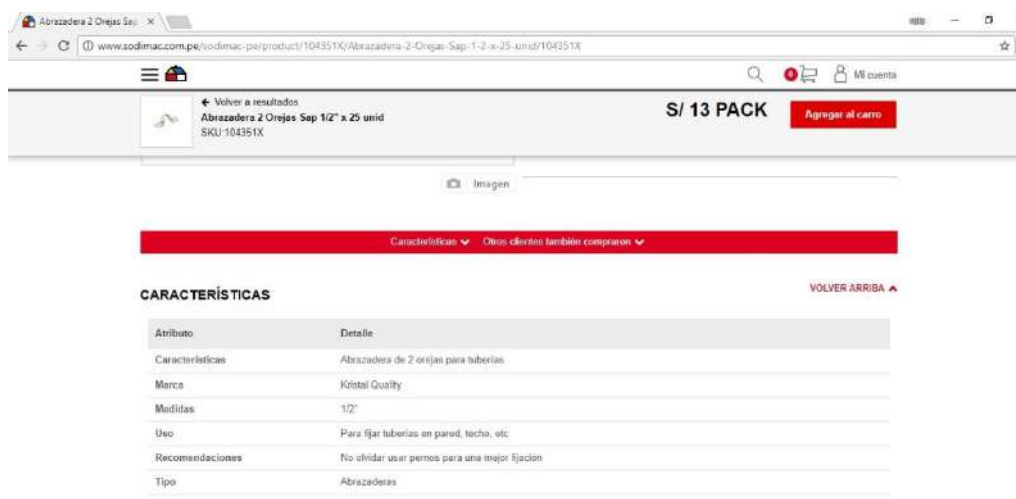


Imagen 123: Características abrazadera de dos orejas

Fuente: (Tienda SODIMAC, 2018)

5.7 Conectores

Son de aleación Cu / Zn, lo cual los hace resistentes a la tensión y a la corrosión para cumplir lo normado. A continuación se muestra el conector elegido entre las opciones de los proveedores encontrados.

- Manguito “T” (2 piezas) 35 x 35 mm².

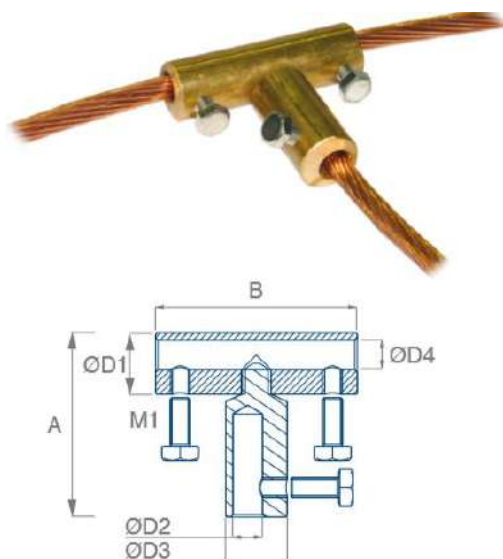


Imagen 124: Conector en Y.

Fuente: (Ingesco Lightning Solutions, 2016)

Siendo para el diseño a presentar, las dimensiones para el conector en Y:

D1= 25 mm; D2= 25 mm; D3= 8.5 mm; D4= 8.5 mm; A= 75 mm; B= 82 mm

Se debe introducir en el manguito de conexión los extremos de los cables a unir, intentando que se introduzcan de igual longitud cada uno de ellos. Los tornillos que vienen incluidos son roscados y deben apretarse con una llave fija de 13 mm (Ingesc Lightning Solutions, 2016)

De estos manguitos, mostrados en la imagen 124, su metrado será el número de pararrayos más el número de cables de bajada. Esto debido a que son los únicos puntos en los que el conductor debe dirigirse hacia otra dirección y formar una conexión de tres puntas: dos sobre el conductor principal de la malla y uno más para el cable de bajada o para el que se conecta con la punta captadora.

5.8 Puesta a tierra

La varilla será de cobre de 18 mm de diámetro y 2.4 metros de longitud.

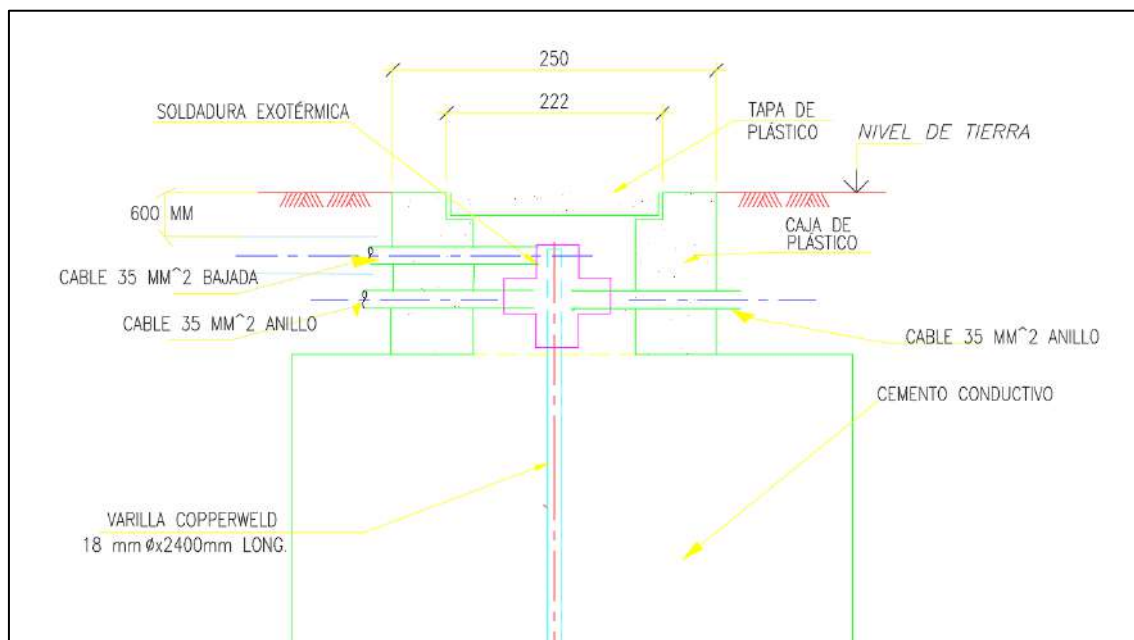


Imagen 125: Instalación típica de una puesta a tierra.

Fuente: Elaboración propia

Como visto anteriormente, los 10 pozos a tierra se conectarán en un sistema de anillo. La normativa recomienda conectarlos para evitar la tensión de paso y de contacto, ya que el potencial se equilibra y distribuye por todo el terreno en caso de una descarga atmosférica.

Para obtener la resistencia equivalente del anillo, se utilizará la siguiente fórmula:

$$R_j = \frac{p_r}{2\pi L} * \ln\left(\frac{D}{d}\right) + \frac{p}{12\pi L} * \ln\left(\frac{4L}{D}\right)$$

Dónde:

p_r : Resistividad del terreno, es decir 400 Ohm-m.¹⁸

p : Resistividad de diseño, es decir 0.05 Ohm-m¹⁹

L : Longitud del electrodo, es decir 2.4 m

D : Diámetro del pozo, es decir, 0.22 m²⁰

d : Diámetro del electrodo, es decir 0.018 m

Reemplazando, se obtiene que:

$$R_j = 16.7 \text{ Ohm}$$



Imagen 126: Resistencia equivalente vs número de electrodos paralelos

Fuente (Montúfar, s/f)

Este sería el resultado para un solo pozo, sin embargo, según se aprecia en la imagen 126, el efecto de varios electrodos en paralelo provoca un multiplicativo menor a 1 que disminuye el valor de la resistencia de la configuración de malla que se ha

¹⁸ Dato obtenido del Cálculo de puesta a tierra del Proyecto Aulario de la Universidad de Piura, sub-proyecto Sistema de Puesta a Tierra – Baja tensión, citado en la ciudad de Piura en mayo del 2015.

¹⁹ Dato obtenido de la ficha técnica del cemento conductivo elegido comercialmente.

²⁰ Se estaría utilizando un tubo de PVC de 8" para colocar el relleno, por lo que el diámetro del pozo tendría, en metros, 0.22 m.

diseñado. Como se ve que el multiplicativo tiene una asíntota infinita en el valor 0.1, se utilizará el mismo para obtener la resistencia del anillo.

$$R_{10} = 1.67 \text{ Ohm}$$

Para calcular la tensión de paso se utilizarán los siguientes datos²¹:

- I: Corriente del rayo, valor crítico de 200kA
- p : Resistividad del suelo, 400 ohm*m
- ps : Resistividad de la superficie, 400 ohm*m
- T:Tiempo de descarga, 20 μ s
- n: Número de conductores paralelos del anillo, 2
- D: Distancia entre conductores, 72m
- h: Profundidad enterrada del conductor, 0.6m
- d: Diámetro del conductor, 0.0075m
- L: Longitud del conductor, 290m

Primero se calculará la tensión de paso real (E_r), posteriormente se calculará la permisible (E_p) y finalmente se comparará si la permisible es mayor que la real, de ser así, cumplirá el diseño.

$$E_r = (k_s) * (k_i) * \frac{p * I}{L}$$

Se calcularán los coeficientes k:

$$k_i = 0.65 + 0.172 * n$$

$$k_i = 0.994$$

$$k_s = \frac{1}{\pi} * \left(\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{d + D} + \frac{1}{2 * D} + \frac{1}{3 * D} \right)$$

$$k_s = 0.2744$$

Reemplazando en la ecuación de la tensión de paso real, se obtendrá:

$$E_r = (0.2744) * (0.994) * \frac{400 * 200000}{290}$$

$$E_r = 75242.37 \text{ v}$$

Ahora se calculará E_p :

$$E_p = \frac{165 + ps}{\sqrt{t}}$$

$$E_p = \frac{165 + 400}{\sqrt{0.00002}} = 126337.84 \text{ v}$$

Por tanto, podemos comprobar que $E_p > E_r$.

²¹ Se utiliza la bibliografía de (Scienca et Technica, 2003)

Si bien la tensión puede parecer alta, recordemos que los tiempos de aplicación son muy cortos, así como se explicó en el punto 1.2.3.

El conductor que conectará los pozos será como los conductores principales, cobre desnudo recocido de 35 mm cuadrados de sección transversal, y se debe tender como mínimo a 46 cm de la superficie del suelo. También debe respetarse que cada pozo debe ir, como mínimo, a 60 centímetros de cada camino o de lugar de acceso.

Para conectar la varilla al anillo y al cable de bajada, se utilizará una soldadura exotérmica, del tipo similar al que se muestra en la imagen 127.

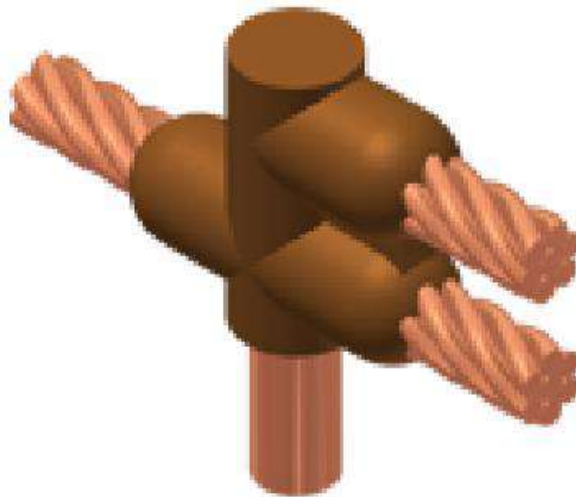


Imagen 127: Molde de soldadura exotérmica.

Fuente: (Thermoweld, 2007)

5.9 Metrado

Para finalizar la evaluación, se resumen y especifican todos los metrados que se han venido calculando a lo largo del capítulo.

Tabla 20: Metrado del diseño.

Ítem	Material	Descripción	Unidad	Metrado
1	Punta captadora de cobre	Altura de 2500 mm, punta principal de 500 mm y 4 puntas auxiliares.	UND	104
2	Placa de sujeción	170 x 170 mm. Para soportar el pararrayo. 4 holes de 18 mm diámetro	UND	104
3	Tornillo de 18 mm diámetro y 1 in longitud con 1 tarugo.	Cabeza hexagonal de 18 mm de diámetro y longitud 1 in.	UND	416
4	Conductor de cobre desnudo recocido 35 mm ²	305 g/m de peso por longitud	m	1105
5	Abrazadera para cable desnudo con tirafondo	Para conductor de 35 mm ² de Cu/Zn	UND	890
6	Impermeabilizante	Para resanar perforaciones	GLN	1
7	Conector tipo "Te" para conductor de 35 mm ²	De Cu/Zn	UND	114
8	Tubo "conduit" PVC diámetro 1/2 in	Liviano en tubos de 3 metros	UND	6
9	Abrazadera para tubo PVC	2 orejas con sus pernos y tarugos.	UND	20
10	Curvas "conduit" PVC de 90 grados, diámetro 1/2 in	Liviano	UND	10
11	Varilla de cobre	Longitud 2400 mm, diámetro 18.5 mm. Instalación de pozo a tierra vertical.	UND	10
12	Soldadura exotérmica	Tipo CR-17, para la varilla de 18 mm y el conductor de 35 mm ² , con molde.	KIT	10
13	Registro plástico con tapa	Arqueta circular de PP de 222 de diámetro.	UND	10
14	Cemento conductivo	Sacos de 25 kg	kg	250

Fuente: Elaboración propia.

5.10 Valorización del diseño

A continuación se muestra la cotización de los materiales y la valorización aproximada que una contratista del mercado podría sugerir para realizar el trabajo. Los precios se encuentran en dólares americanos, dando como total 48095.97 USD.

Tabla 21: Valorización del diseño.

MALLA DE PARARRAYOS						
Ítem	Material	Características	Unidad	Metrado	Precio unitario USD	Precio total USD
1	Punta captadora de cobre con 2 tensores y 2 armellas	Altura de 2500 mm, punta principal de 500 mm y 4 puntas auxiliares. Incluye dos tensores y sus armellas de conexión al techo.	UND	104	134	13936
2	Placa de sujeción	170 x 170 mm. Para soportar el pararrayo. 4 holes de 18 mm diámetro	UND	104	45	4680
3	Tornillo de 18 mm diámetro y 1 in longitud con 1 tarugo.	Cabeza hexagonal de 18 mm de diámetro y longitud 1 in.	UND	416	3	1248
4	Conductor de cobre desnudo recocido 35 mm ²	305 g/m de peso por longitud	m	670	3.14	2103.8
5	Abrazadera para cable desnudo con tirafondo	Para conductor de 35 mm ² de Cu/Zn	UND	740	2.05	1517
6	Impermeabilizante	Para resanar perforaciones	GLN	1	21	21
7	Conector en Tee para conductor de 35 mm ²	De Cu/Zn	UND	104	25.1	2610.4
BAJADA A TIERRA						
Ítem	Material	Características	Unidad	Metrado	Precio unitario USD	Precio total USD
1	Conductor de cobre desnudo recocido 35 mm ²	305 g/m de peso por longitud	m	135	3.14	423.9
2	Abrazadera para cable desnudo con tirafondo	Para conductor de 35 mm ² de Cu/Zn	UND	150	2.05	307.5
3	Tubo conduit PVC diám. 1/2 in	Liviano en tubos de 3 metros	UND	6	1.65	9.9
4	Abrazadera para tubo pvc	2 orejas con sus pernos y tarugos.	UND	20	0.15	3
5	Conector en Tee	De Cu/Zn	UND	10	25.1	251
6	Curvas conduit PVC de 90 diám. 1/2 in	Liviano	UND	10	0.35	3.5
ANILLO DE ATERRAMIENTO						
Ítem	Material	Características	Unidad	Metrado	Precio unitario USD	Precio total USD
1	Varilla copperweld	longitud 2400 mm, diámetro 18.5 mm. Instalación de pozo a tierra vertical.	UND	10	17.4	174
2	Soldadura exotérmica	Tipo CR-17, para la varilla de 18 mm y el conductor de 35 mm ² , con molde.	UND	10	4.7196	47.196
3	Molde para soldadura exotérmica	Tipo CR-17, para la varilla de 18 mm y el conductor de 35 mm ² , con molde.	UND	10	61.6892	616.892
4	Registro plástico con tapa	Arqueta circular de PP de 222 de diámetro.	UND	10	12.75	127.5
5	Cemento conductivo	Sacos de 25 kg	kg	250	51.2	12800
6	Conductor de cobre desnudo recocido 35 mm ²	305 g/m de peso por longitud	m	300	3.14	942
TOTAL MATERIALES						41822.588
TOTAL COSTOS MANO DE OBRA						4182.2588
TOTAL COSTOS DIRECTOS COMPLEMENTARIOS						2091.1294
TOTAL COSTO PROYECTO						48095.9762

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones y recomendaciones

- El proceso para diseñar el sistema de protecciones atmosféricas que se ha presentado en el presente trabajo puede ser empleado tanto para edificaciones comerciales, industriales, residenciales o cualquiera que lo requiera.
- A pesar de que el trabajo se ha basado prácticamente en su totalidad en la normativa NFPA 780, se pueden encontrar en el diseño algunas consideraciones constructivas propias de la experiencia del autor y su asesor.
- Existen diversos proveedores que realizan la ingeniería y el montaje de estos sistemas, utilizando especialmente las normativas NFPA 780 y la IEC 62305. Es importante solicitar siempre los certificados de calidad de los materiales y revisar los manuales para ver períodos de mantenimiento y detalles de instalación permitidos, como radios de curvatura mínimo admisible de los conductores, prohibiciones de colocar grampas o abrazaderas respecto del material del accesorio, entre otros.
- El trabajo de investigación no ha considerado las protecciones atmosféricas internas. Si se dividiera la protección contra rayos, las externas e internas serían dos mitades que se complementan una con otra en la protección de edificaciones, la cual permite salvaguardar equipos eléctricos y electrónicos de importante uso.
- Las protecciones atmosféricas deben tomarse como una inversión y no como un gasto innecesario, ya que ha quedado demostrado en innumerables ocasiones, que el gasto correctivo es mayor que el preventivo. Las probabilidades están dadas y las normativas de recomendaciones son claras.

- El CNE no tiene una normativa clara para la implementación de los sistemas de protección atmosféricas en edificios. Menciona, entre otros, subestaciones eléctricas de distribución, líneas de transmisión o antenas de telecomunicaciones, por lo que surge la necesidad de ir a otras bibliografías capacitadas, como es la NFPA, para edificaciones arquitectónicas.
- El mapa isoceráunico del Perú no tiene una actualización reciente que tenga en cuenta las descargas atmosféricas acontecidas durante el fenómeno. Ese es otro tema de investigación el cual complementaría y haría mucho más exacto el cálculo del trabajo presente, ya que incluso, en la experiencia del autor, muchos proveedores y constructores siguen utilizando el de 2005 para realizar sus trabajos.
- Los registros oficiales de descargas atmosféricas sucedidas en el fenómeno del niño costero del 2017, a la fecha, no están disponibles abiertamente al público. Se ha tomado registro periodístico de distintas fuentes, los cuales mostraron el efecto destructivo de los mismos materializado en vidas y en daños materiales. Sin embargo, son cientos los cuales no han sido reportados, sin embargo, fueron un potencial peligro.
- A la fecha de presentación de este trabajo, el edificio “E”, o comúnmente llamado “Aulario”, ha recibido numerosos premios por su diseño de inclusión con la naturaleza presente en el campus universitario. Esto incrementa la importancia del edificio para la universidad, por lo cual el autor hace hincapié en la ejecución de la construcción del presente trabajo.
- El costo aproximado del proyecto corresponde al 0.5% del costo de inversión para la construcción del edificio E, lo cual fortalece la recomendación hecha por la normativa NFPA 780 de implementar las protecciones atmosféricas al Aulario.

Bibliografía

(s.f.).

Belletich, E. (18 de Marzo de 2018). *UDEP* . Obtenido de UDEP hoy:
<http://udep.edu.pe/hoy/2018/edificio-e-de-la-universidad-de-piura-sera-expuesto-en-la-bienal-de-venecia/>

Carrasco Fonseca, J. G. (2017). *Aplicación de la logística humanitaria para atender la emergencia ocasionada por el niño costero en Piura*. Piura, Perú: Área Departamental de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura.

Centro de Estudios de Aparejadores por Correspondencia. (29 de Enero de 2013). *CEAC*. Obtenido de CEAC: <https://www.ceac.es/blog/efecto-corona-en-lineas-de-transmision>

CIRPROTEC. (2007). Seminario de protección contra sobretensiones. *Seminario de protección contra sobretensiones*, (pág. 108). Talara.

Construmática. (s/f). Obtenido de <http://www.construmatica.com/construpedia/Parasol>

Dehn + Söhne: Blitzplaner. (2007). *Manual de protección contra rayos*. Madrid: Ibergraphi 2002, S.L.L. Mar Tirreno, 7 bis.

Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, República del Perú. (17 de enero de 2006). Código Nacional de Electricidad - Utilización. *Código Nacional de Electricidad - Utilización*. Lima, Perú.

Direct Industry. (2018). *Direct Industry*. Obtenido de Direct Industry:
https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fimg.directindustry.com%2Fimages_di%2Fphoto-g%2F12397-11780705.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.directindustry.com%2Fproduct%2Fdehn-soehne%2Fproduct-12397-557303.html&docid=znmDaszJgscCHM&tbnid=fsdOsZ3j_utSfM%3A

- El Estadístico. (2 de octubre de 2012). *El Estadístico*. Obtenido de El Estadístico:
<http://elestadistico.blogspot.pe/2012/10/medias-moviles-como-tecnica-estadistica.html>
- El Niño Southern Oscillation. (s/f). *ESRL.NOAA*. Obtenido de ESRL.NOAA:
<https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/glossary.html#t>
- El Popular. (13 de marzo de 2017). *El Popular*. Obtenido de Piura: tormenta eléctrica deja dos muertos y la ciudad a oscuras tras caída de rayo:
<http://www.elpopular.pe/actualidad-y-policiales/2017-03-13-piura-tormenta-electrica-deja-dos-muertos-y-la-ciudad-oscuras-tras-caida-de-rayo-video>
- ENFEN. (2012). *Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú*. Obtenido de
http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/informes/imarpe_comenf_not_tecni_enfen_09abr12.pdf
- Flores, C. (14 de Octubre de 2010). *Seguridad con la electricidad*. Obtenido de Seguridad con la Electricidad:
<http://seguridadconelectricidad.blogspot.pe/2010/10/metodo-de-la-esfera-rodante.html>
- GAMMA - Aisladores Corona. (15 de Abril de 2011). *Gamma*. Obtenido de Gamma:
<http://www.gamma.com.co/caracteristicas-las-descargas-atmosfericas-efecto-las-lineas-transmision/>
- García Galindo, G. (19 de Febrero de 2012). *Orientalia*. Obtenido de Orientalia:
<https://www.orientalia.com.es>
- García González, A. (22 de Marzo de 2013). *Panama Hitek*. Obtenido de Panama Hitek:
<http://panamahitek.com/conceptos-basicos-de-electricidad-la-ley-de-ohm/>
- Golde, R. (1977). *Lightning*. London; New York; San Francisco: Academic Press.
- González, C. (6 de junio de 2013). *MVBLOG*. Obtenido de Planimetría: Elevaciones, fachadas o alzados.: <https://www.mvblog.cl/2013/06/06/planimetria-elevaciones-fachadas-o-alzados/>
- Gordon S. Wood, T. (23 de Febrero de 2018). *Enciclopedia Británica*. Obtenido de Enciclopedia Británica: <https://www.britannica.com/biography/Benjamin-Franklin>
- Hernández Laguna, M. (18 de Mayo de 2016). *LHistoria*. Obtenido de Lhistoria:
<http://www.lhistoria.com/biografias/benjamin-franklin>
- IMELEC. (2016). *Industrias metálicas eléctricas del Ecuador*. Obtenido de
http://www.imelec.ec/web/assets/public/images/catalog/prod_239_big.png?1467132252

- INDECI. (21 de abril de 2017). *Reporte de situación diaria*. Obtenido de http://space.indeci.gob.pe:8080/share/s/uI_0PpctS1O85Lmbx0r1Tw
- Inge Mecánica. (s/f). *Ingemecánica*. Obtenido de Propiedades mecánico-químicas del aluminio, tutorial 110.: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html>
- Ingesco Lightning Solutions. (2 de Febrero de 2016). *Ingesco Lightning Solutions*. Obtenido de Ingesco Lightning Solutions: <https://www.ingesco.com/es/noticias/tipos-pararrayos>
- Instituto Europeo del Cobre. (s.f.). *A Copper Alliance Member*. Obtenido de Instituto Europeo del Cobre: <http://www.copperalliance.es/el-cobre/propiedades>
- Instituto Geofísico del Perú. (2009). *met.igp.gob.pe*. Obtenido de Ministerio del Ambiente: <http://www.met.igp.gob.pe/variabclim/enfen/>
- Instituto Geofísico del Perú. (2016). *met.igp.gob*. Obtenido de Ministerio del Ambiente: http://www.met.igp.gob.pe/elnino/lista_eventos.html
- Internacional council on large electric systems. (2000). *CIGRE*. Obtenido de CIGRE: <http://www.cigre.org/Menu-links/Publications/Papers-proceedings>
- Kisielewsky, A. (2000). *Estudio de la protección contra las descargas atmosféricas. Modelización y simulación computacional de una descarga atmosférica. Aplicación a pararrayos pasivos y activos*. Buenos Aires: Tesis de grado del departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
- Klever, D. (15 de OCTUBRE de 2013). *Tipos de puesta a tierra*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/DannyKQM/tipos-de-puesta-a-tierra>
- La República. (18 de Febrero de 2017). *Piura soportó torrencial lluvia con rayos y truenos*. Obtenido de La República: <http://larepublica.pe/sociedad/1016637-piura-soporto-torrencial-lluvia-con-rayos-y-truenos>
- López, A. (15 de junio de 2012). *20 minutos*. Obtenido de 20 minutos: <https://blogs.20minutos.es/yaestaellistoquetodolosabe/el-dia-que-benjamin-franklin-echo-a-volar-una-cometa/>
- López, A. (15 de Junio de 2012). *20 minutos blog*. Obtenido de 20 minutos blog: <https://blogs.20minutos.es/yaestaellistoquetodolosabe/el-dia-que-benjamin-franklin-echo-a-volar-una-cometa/>
- Marcela Región Piura. (28 de septiembre de 2010). *Marcela Región Piura*. Obtenido de Marcela Región Piura: <http://marcelaregionpiura.blogspot.pe/>

- Ministerio de energía y minas dirección general de electrificación rural. (Octubre de 2008). Atlas eólico del Perú. *Departamento de Piura atlas eólico del Perú*. Lima, Lima, Perú.
- Montúfar, J. Y. (s.f.). *Sistema de conexión a tierra*. Lima: Procobre-Perú.
- Moore, C. (1983). *Improved Configurations of Lightning Rods and Air Terminals*. New Mexico: Journal of Franklin Institute.
- National Centers for Environmental Information. (2017). *ncdc.noaa*. Obtenido de ncdc.noaa: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst.php>
- NFPA 780. (2014). *Standard for the Installation of Lightning Protection Systems*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- Opus Dei. (10 de Enero de 2010). *Opus Dei*. Obtenido de Opus Dei: <http://opusdei.org/es-pe/article/universidad-de-piura/>
- Orbea, E. (9 de Septiembre de 2015). *El estudiante electromecánico*. Obtenido de Mapa isoceraúnico del Ecuador: <http://elestudianteelectromecanico.blogspot.pe/2015/09/mapa-isoceraunico-del-ecuador.html>
- Organización ITER. (24 de Julio de 2018). *ITER*. Obtenido de ITER: <https://www.iter.org/construction/Cryoplant>
- Photo News 247. (7 de Enero de 2015). *Photo News 247*. Obtenido de Photo News 247: <https://photonews247.com/2015/01/100-north-tampa-regions-building-skyscrapper-in-tampa-fl/>
- Pixmypix. (2016). *Pixmypix*. Obtenido de Pixmypix: <https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fedusolution.info%2Fwp-content%2Fuploads%2F2018%2F05%2Fighting-rod-for-house-do-lightning-rods-work-developed-lighting-which-protect-lightning-rod-house-roof.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fedusolution.info%2F>
- Red Fundamentos. (4 de Mayo de 2017). *Redfundamentos*. Obtenido de Aulario UDEP en Piura: <http://www.redfundamentos.com/blog/workshopmallorca.tumblr.com/obras/deta lle-302/>
- Rocha, A. (2013). El pulmón de Piura. *SOMOS*, 28-32.
- San José Perú Constructora. (2016). *Cálculo de protección contra descargas atmosféricas, sistemas de pararrayos*. Talara: Modernización de Refinería Talara, Técnicas Reunidas S.A.
- Schneider Electric España S.A. (2008). *Guía de diseño de instalaciones eléctricas*. Barcelona: Tecfoto S.L.

- Scienza et Technica. (2003). *Cálculo de la malla de puesta tierra de una subestación*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- SENAMHI. (2014). *El Fenómeno El Niño en el Perú*. Obtenido de El Fenómeno El Niño en el Perú: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/07/Dossier-El-Ni%C3%B1oFinal_web.pdf
- Suárez Martínez, V. (13 de Abril de 2016). *Linked In*. Obtenido de Protección Integral contra rayos y sobretensiones: <https://es.linkedin.com/pulse/protecci%C3%B3n-integral-contra-rayos-y-sobretensiones-su%C3%A1rez-mart%C3%ADnez>
- Teleformación. (s/f). *Teleformación*. Obtenido de Teleformación: http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/sacaleE_M2/Triboelectricidad/EfectoPuntas/EfectoPuntas.htm
- Thermoweld. (2007). *Catálogo de conexiones eléctricas*. Oklahoma: Handy and Harway Company.
- Tienda SODIMAC. (3 de Mayo de 2018). *SODIMAC*. Obtenido de <http://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/104351X/Abrazadera-2-Orejas-Sap-1-2-x-25-unid/104351X>
- Torres-Sánchez, H. (s.f.). *Normas técnicas contra rayos y sus aplicaciones*. Obtenido de BDIGITAL: http://www.bdigital.unal.edu.co/43069/24/9587012135_Parte%204.pdf
- UDEP. (Marzo de 2016). *Proyectos emblemáticos de la ciudad de Piura*. Obtenido de Proyectos emblemáticos de la ciudad de Piura: <http://udep.edu.pe/2019/>
- UDEP. (22 de abril de 2016). *UDEP.edu.pe*. Obtenido de UDEP inaugura nuevo edificio de aulas en Campus Piura: <http://udep.edu.pe/hoy/2016/udep-inaugura-nuevo-edificio-de-aulas-en-campus-de-piura/>
- UDEP. (s/f). *udep.edu.pe*. Obtenido de Nuestro campus: <http://udep.edu.pe/internacional/udep/campus/>
- Villa., A. (30 de marzo de 2009). *Seguridad Cuatro*. Obtenido de Seguridad Cuatro Blog: <http://seguridadcuatro.blogspot.pe/2009/03/antipico-que-es-la-nfpa.html>
- Yanque M, J. (2005). *Mapa de niveles isoceráunicos*. Lima: Sc. App.
- Zapata, R. (8 de marzo de 2017). *El Comercio*. Obtenido de Truenos y relámpagos aterrorizaron anoche a piuranos: <https://elcomercio.pe/peru/piura/truenos-relampagos-aterroizaron-anoche-piuranos-videos-143489>

ANEXOS

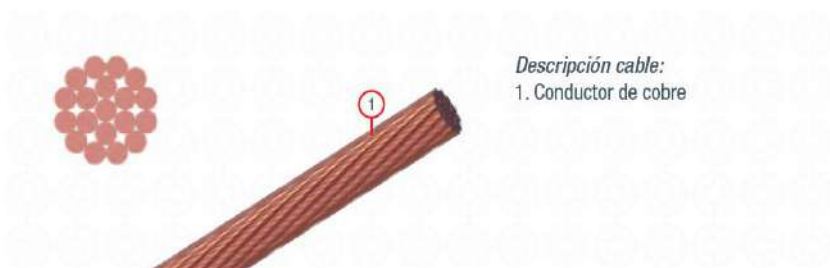
ANEXO A. Ficha técnica de cable de cobre desnudo

CONDUCTORES Y CABLES DEL PERÚ



COBRE DESNUDO (MM2)

Cobre recocido: Para conexiones a tierra, amarres, antenas de radio y TV, etc.
Cobre duro: Para redes de distribución y líneas de transmisión aéreas.



Descripción cable:
1. Conductor de cobre

Cables Desnudos

1. DESCRIPCION:

Conductor cableado concéntrico formado por 7, 19, 37 o 61 hilos (clase 2) de cobre desnudo en temple duro o suave.

Para la manufactura de estos conductores se emplea cobre refinado electrolíticamente que en el temple suave tiene una conductividad mínima (IACS) de 100 %.

2. TEMPERATURA DE OPERACION:

75° C

3. NORMA DE FABRICACION:

NTP 370.251

4. APLICACIONES:

Cobre recocido: Para conexiones a tierra, amarres, antenas de radio y TV, etc.
Cobre duro: Para redes de distribución y líneas de transmisión aéreas.

5. DATOS PARA LOS PEDIDOS:

Cable de cobre desnudo, temple recocido o duro y sección.



Instalación a la intemperie



Protección al medio ambiente

CONDUCTORES Y CABLES DEL PERÚ AV. LOS FRUTALES N° 334 ATE - LIMA - PERÚ
T. (+511) 713 6000 F. (+511) 713 6001 COMERCIAL@CEPER.COM.PE WWW.CEPER.COM.PE

DATOS CONSTRUCTIVOS							
Sección Nominal mm ²	N° Hilos	Diámetro del Conductor mm.	Peso Kg / Km	Capacidad de Corriente Amper Temp. 30°C	Recocido Resist. C.C a 20°C Ohm / Km	Duro	
						Carga de Ruptura Mínima KN	Resist. C.C a 20°C Ohm / Km
1,5	7	1,55	13,1	30	12,1	-	-
2,5	7	1,97	21,5	43	7,27	-	-
4	7	2,50	34,8	58	4,52	-	-
6	7	3,10	52,0	75	3,02	2,40	3,14
10	7	4,00	87,9	101	1,79	4,00	1,87
16	7	5,00	139	142	1,13	6,33	1,17
25	7	6,30	220	190	0,713	9,93	0,741
35	7	7,50	305	225	0,514	13,6	0,534
50	19	8,80	420	273	0,380	18,8	0,395
70	19	10,60	602	350	0,263	26,9	0,273
95	19	12,50	837	417	0,189	36,9	0,197
120	19	14,00	1053	486	-	46,7	0,156
120	37	14,00	1055	486	0,150	-	-
150	37	15,60	1304	567	0,122	58,0	0,126
185	37	17,50	1630	644	0,0972	71,9	0,101
240	61	20,00	2139	763	0,0740	95,6	0,0769
300	61	22,50	2693	885	0,0590	119,0	0,0613
400	61	25,40	3443	1020	-	152,2	0,0479
500	61	28,80	4418	1190	-	189,0	0,0373

Los datos de la tabla están sujetos a tolerancias normales de manufactura.

6. COEFICIENTE DE DILATACION LINEAL:

$1,69 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

7. MODULO DE ELASTICIDAD FINAL PARA CONDUCTORES DE COBRE DURO:

Cuerda de 7 y 19 hilos: 11950 Kg/mm²

Cuerda de 37 y 61 hilos: 11600 Kg/mm²

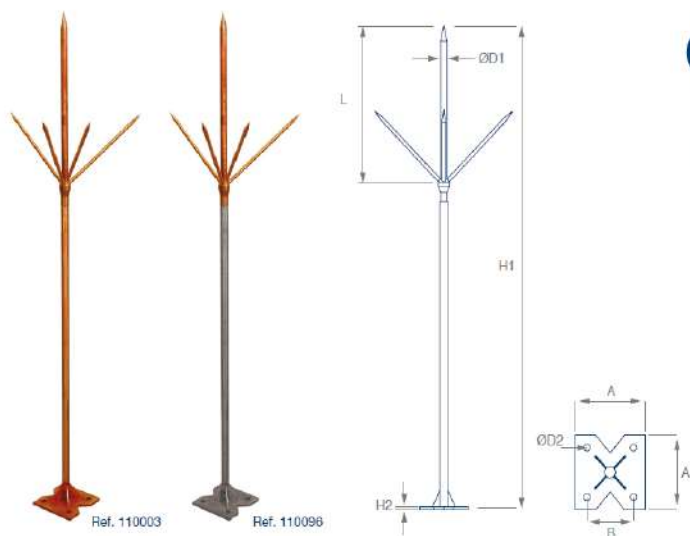


Protección a la intemperie



Protección al medio ambiente

ANEXO B: Ficha técnica del conjunto punta captadora y soporte



► **CONJUNTO PUNTA CAPTADORA + SOPORTE**

Conjunto formado por pararrayos de puntas (medidas especiales), con pie soporte de base plana de 1 m. y 2 m. de altura.

- Punta principal de L:500 mm y 4 puntas auxiliares.
- Base fabricada en acero cobreado o cincado.
- Puntas fabricadas en cobre.

► **aplicaciones**

Protección externa de SPCR (Sistemas de protección contra el rayo).
Su instalación está indicada para la protección externa de todo tipo de estructuras, ya sea como sistema de captación único, o como componente de mallas conductoras y sistemas de Jaula Faraday.
Dimensiones homologadas para su aplicación en subestaciones eléctricas.

► **funcionamiento**

Durante la formación de la tormenta se genera un campo electroatmosférico entre nube y tierra. Alrededor de la punta Franklin, se produce una ionización natural (efecto corona), resultado de la transferencia de energía. Este fenómeno es el principio de excitación para trazar un canal conductor que facilitará la descarga del rayo.

► **características y beneficios**

- Simplicidad de instalación.
- No es necesario instalar mástil ni anclajes.
- Gran resistencia.

► **especificaciones técnicas**

Descripción	Ref.	Material	H1 (mm)	L (mm)	H2 (mm)	D1 (mm)	A (mm)	B (mm)	D2 (mm)	Peso (g)
Punta CU 1000 con soporte acero CU	110003	Cu/acero cobreado	1584	480	10	20	170	113	18	5500
Punta CU 2000 con soporte acero CU	110099	Cu/acero cobreado	2584	480	10	20	170	113	18	8500
Punta CU 1000 con soporte acero Zn	110096	Cu/acero cincado	1584	480	10	20	170	113	18	5600
Punta CU 2000 con soporte acero Zn	110100	Cu/acero cincado	2584	480	10	20	170	113	18	8600

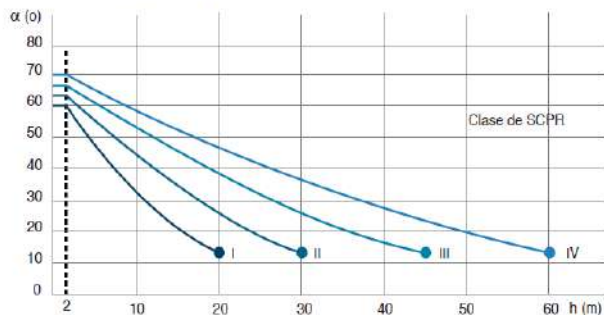
► instalación

Instalación en pórticos, cubiertas o tejados planos.

Fijación base a estructura mediante tornillos (Ø18 mm.).

En función de la estructura a proteger y el nivel de protección requerido, la Norma IEC 62305-3 establece los siguientes métodos de cálculo del área de protección:

a) Método ángulo de protección (α)



NOTA 1. No es aplicable para valores superiores a los marcados con ●. En estos casos sólo se aplican métodos de la esfera rodante y de la malla.

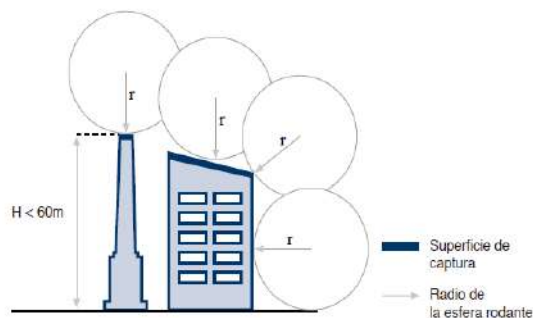
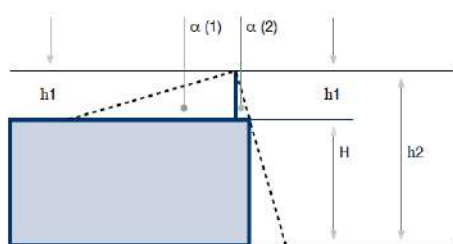
NOTA 2. h (m) es la altura del captador por encima del plano de referencia de la zona a proteger.

NOTA 3. El ángulo de protección no varía para valores de h inferiores a 2 m.

b) Método de la esfera rodante y malla:

Clase de SCPR	Radio de esfera rodante (m.)	Tamaño de la malla (m.)
I	20	5x5
II	30	10x10
III	45	15x15
IV	60	20x20

TABLA 2. Valores máximos de radio de la esfera rodante y tamaño de la malla para cada clase de SCPR.



► normas y ensayos

Normas de aplicación:

- IEC 62.305-3



DENA DESARROLLOS SL

Duero 5 | 08223 Terrassa | Barcelona | Spain

T 937 360 305 | T (+34) 937 360 314

F 937 360 312

central@ingesco.com



**CONJUNTO PUNTA
CAPTADORA + SOPORTE**

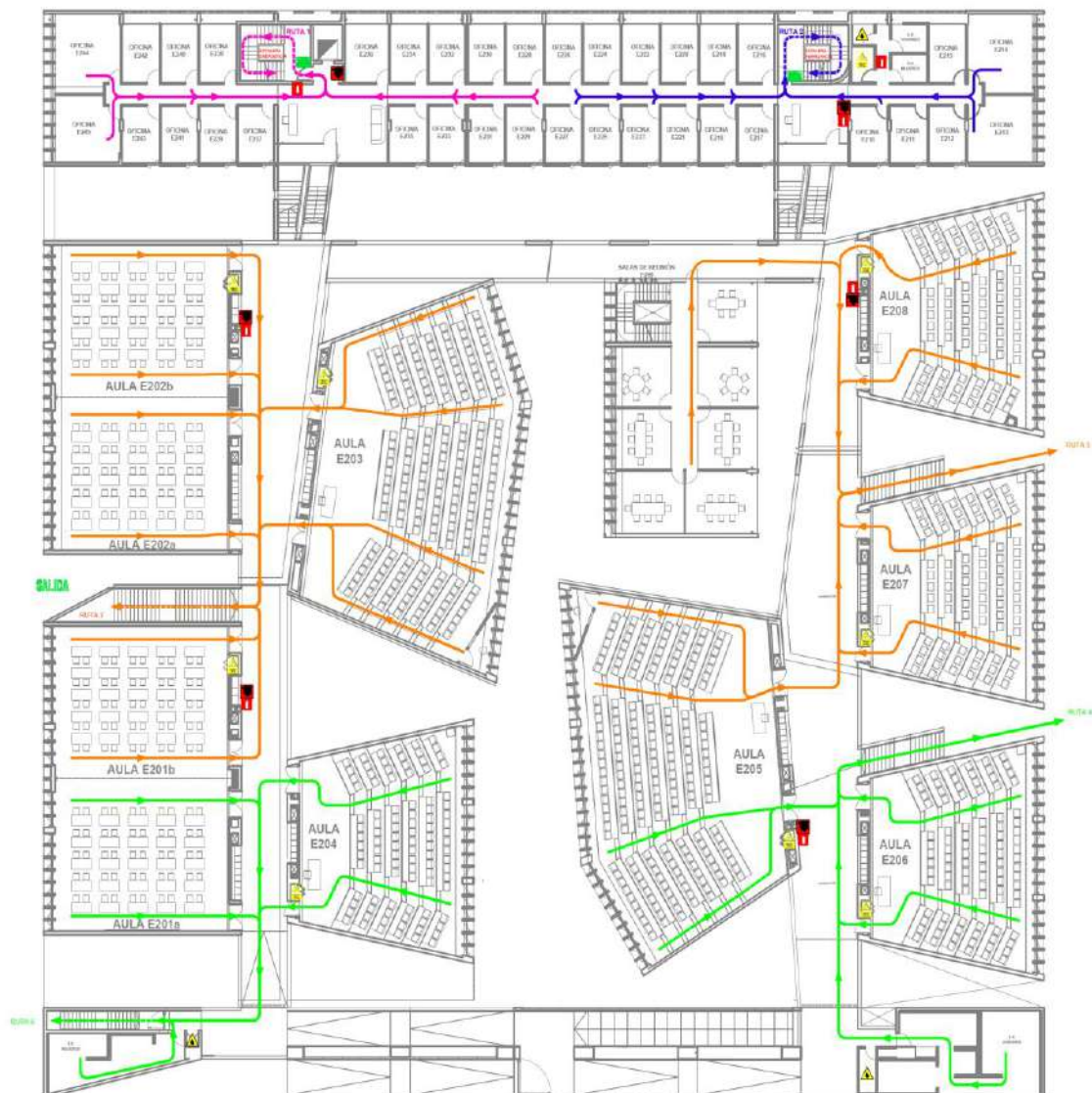
ingesco.com

ANEXO C: Mapa de riesgos y evacuación del primer piso del edificio E.



ANEXO D: Mapa de riesgos y evacuación del segundo piso del edificio E.

MAPA DE RIESGOS Y EVACUACIÓN EDIFICIO E - 2º NIVEL



ANEXO E: Mapa de riesgos y evacuación del tercer piso del edificio E.

