



Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Electrotecnia y Computación

Tesis Monográfica para optar al Título de Ingeniero
Eléctrico

Diseño de Protección Contra Descargas Atmosféricas en
el Nuevo Estadio Nacional Denis Martínez.

Autores:

Br. Jonathan Argelys Blanco Rocha

Br. Franklin Martin López José

Tutor:

Msc. Ing. Ramiro Arcia Lacayo

Managua, Nicaragua 6 de Diciembre de 2018



Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Electrotecnia y Computación

Tesis Monográfica para optar al Título de Ingeniero
Eléctrico

Diseño de Protección Contra Descargas Atmosféricas en
el Nuevo Estadio Nacional Denis Martínez.

Autores:

Br. Jonathan Argelys Blanco Rocha

Br. Franklin Martin López José

Tutor:

Msc. Ing. Ramiro Arcia Lacayo

Managua, Nicaragua 6 de Diciembre de 2018

Dedicatoria

De manera muy especial a:

Dios: por darnos la oportunidad de alcanzar este gran sueño y bendecirnos siempre con su infinita bondad y amor.

A nuestros padres: por guiarnos y apoyarnos incondicionalmente desde el inicio de nuestras vidas, contribuyendo en gran manera a nuestra preparación personal y profesional.

Br. Jonathan Argelys Blanco Rocha

Por sobre todas las cosas a Dios todo poderoso, que nos da la sabiduría para poder enfrentarnos con dedicación y esfuerzo a nuestras oportunidades y retos que a diario vivimos.

A nuestro Padres, hermanos y familiares que nos dieron su apoyo para alcanzar una de las metas que nos guiara a la culminación de nuestra carrera de Ingeniería Eléctrica.

A mis amigos que de una u otra manera me apoyaron para poder obtener los logros obtenidos hasta hoy.

A toda la comunidad educativa de la Universidad Nacional de Ingeniería, Recinto universitario Simón Bolívar, Facultad de Electrotecnia y Computación.

A todos ellos nuestro más sinceros y humildes respeto.

Br. Franklin Martin López José

Agradecimiento

A Dios: por brindarnos fortaleza, salud, tranquilidad e iluminar nuestras mentes en todo el periodo de estudio. A nuestros padres: por todo su apoyo, dedicación y esmero; formándonos en valores para ser mejores personas cada día.

A nuestro tutor: Ing. Ramiro Arcia Lacayo por su paciencia, dedicación y compromiso en la elaboración de este trabajo; sin sus consejos y ayuda no hubiese sido posible la realización del mismo.

A la Universidad Nacional de Ingeniería, y en especial a la Facultad de Electrotecnia y Computación, por permitirnos ser parte de una generación de triunfadores y gente productiva para el país.

Un agradecimiento especial para mí el amigo Franklin López que con su apoyo como pareja de monografía y a lo largo de todo el ciclo de estudio hemos terminado este trabajo monográfico. A todas aquellas personas que participaron directa o indirectamente, brindándonos información, ayuda y ánimos para poder lograr esta meta.

Br. Jonathan Argelys Blanco Rocha

Primeramente, existe un gran Agradecimiento hacia nuestro Dios que es donde emana nuestra vida, sabiduría y esfuerzo.

Agradezco a mis Padres Janet José Sánchez, Fernando López Flores, mis hermanos Walter, Carlos, Diego López José, A mis abuelos Marina Sánchez y Berta Flores (Q.E.P.D.) Claudio José, A mis tíos, Conny Claudia, Isaac y Rebeca José Sánchez. Ercilia, Claribel Freddy Flores, primos y familiares y a cada uno de mis compañeros de clases y amigos de vieja de Data que de uno u otra manera me apoyaron en esta Proceso de preparación a todos ellos gracias por su apoyo moral, enseñanzas y aliento no hubiera alcanzado mis objetivos.

Agradecimiento especial para mí amiga Lic. Jesica Karina Alfaro Espinoza gracias a su apoyo moral y profesional para la culminación de este trabajo monográfico.

Un agradecimiento especial para mí el amigo Jonathan Blanco que con su apoyo como pareja de monografía y a lo largo de todo el ciclo de estudio hemos terminado este trabajo monográfico.

Un agradecimiento muy especial al Ingeniero Ramiro Arcia por su apoyo como tutor, personal y profesional en la realización de este trabajo monográfico.

Mención especial a todas esas personas que nos apoyaron directa e indirectamente en el trabajo monográfico pero sin su apoyo moral, profesional, personal y económico no hubiera sido posible alcanzar nuestros objetivos deseados.

Br. Franklin Martin López José

Índice

Resumen.....	i
Capítulo 1 – Generalidades.	ii
Introducción	ii
Antecedentes	iv
Justificación	vi
Objetivos	viii
Objetivo General.....	viii
Objetivos Específicos	viii
Marco teórico	1
1.1 Tormenta Eléctrica.....	1
1.2 Formación de la tormenta Eléctrica.	1
1.2.1 Proceso de carga y descarga de la nube.	1
1.2.2 Mecanismo de electrización.	2
1.2.3 Inicio de fase activa.	2
1.2.4 Madurez de la fase activa.....	2
1.2.5 Fin de la fase activa.....	2
1.3 Teorías sobre la formación de descargas atmosféricas.	3
1.3.1 Teoría de Elster y Geitel.....	3
1.3.2 Teoría de los Brooks.	4

1.3.3 Teoría de Wilson.	4
1.3.4 Teoría de Simpson.	5
1.3.5 Teoría de Findeisen y Wichmann.	6
1.3.6 Teoría de Sir Basil Schonlan.	6
1.4 Características de las descargas atmosféricas.	8
1.4.1 Campos eléctricos de la atmosfera.	9
1.4.2 Estructura eléctrica de una tormenta.	11
1.4.3 Longitud de las descargas atmosféricas.	12
1.4.4 Valores de una descarga atmosféricas.	12
1.4.5 Valores más probables de corriente máxima y de pendiente máxima.	13
1.4.6 Tipos de descargas atmosféricas.	14
1.5 Efectos y consecuencias de las descargas atmosféricas.	15
1.5.1 Efectos de los rayos sobre el medio en que actúa.	15
1.5.2 Consecuencias térmicas del rayo.	16
1.5.3 Consecuencias dinámicas del rayo.	17
1.5.4 Consecuencias químicas del rayo.	18
1.5.5 Consecuencias acústicas del rayo.	18
1.5.6 Consecuencias eléctricas del rayo.	18
Capítulo 2 – Analisis de riesgo.	26
2.1 Ubicación de la estructura.	26

2.2 Determinación de la densidad de impactos de rayos sobre el suelo.	27
2.3 Calculo de superficie de captura equivalente de la estructura.....	28
2.4 Necesidad de la instalación del sistema de protección.....	29
2.4.1 Calculo frecuencia estimada N_d de rayo rayos directos sobre una estructura.....	29
2.4.2 Calculo frecuencia aceptada N_c de rayo rayos directos sobre una estructura.....	30
2.4.3 Resultados del análisis.	32
2.4.4 Eficiencia requerida.	33
2.4.5 Selección de nivel de protección.	33
Capítulo 3 – Selección de pararrayos	35
3.1 Velocidad de propagación de los trazadores o líderes.	35
3.2 Calculo de la ganancia del pararrayos.....	35
3.3 Calculo del radio de protección.....	36
3.4 Selección del pararrayos.	37
3.5 Determinar la zona o área de cobertura.	38
Capítulo 4 – Sistema de tierra.....	41
4.1 Calculo de sección transversal del conductor.....	42
4.2 Calculo de tensión de toque y paso.	42
4.3 Calculo de distancia entre conductores en paralelos.....	43

4.4	Calculo de la resistencia de red.....	44
4.5	Calculo del número de conductores paralelos en la malla.....	45
4.6	Calculo de la tensión de malla máxima.	46
4.7	Calculo de rediseño del sistema.	48
4.8	Malla propuesta.	53
4.9	Equipontencialidad del sistema de puesta a tierra.....	55
Capítulo 5 – Estudio economico		56
5.1	Cargos que integran el precio unitario.	57
5.1.1	Cargos directos.	57
5.1.2	Cargos indirectos.....	59
5.1.3	Utilidad.	59
Conclusiones		62
Recomendaciones		63
Glosario.....		64
Bibliografía		69
Anexos		72

Índice de Figuras

Figura 1. Muestra la formación de nubes de tormentas. Fuente: Wikipedia.	72
Figura 2. Comienzo de la creación de cargas positivas y negativas. Fuente: Biblioteca de Investigaciones - WordPress.com.	73
Figura 3. Inicio de electrificación de la nube tormenta o inicio de la fase activa. Fuente: Meteorología de Buenos Aires web.	73
Figura 4. Madurez de la fase activa de la tormenta. Fuente: Radar and lightning detection.....	74
Figura 5. Hundimiento de la nube de tormenta. Fuente: Cibernautita.....	74
Figura 6. Teoría de Elster y Geitel. Fuente: Google imágenes.	75
Figura 7. Teoría de Wilson. Fuente: Google imágenes.....	75
Figura 8. Nube según Simpson con altura e isoterma usuales. Fuente: (Castillo Herrera, 2014).....	76
Figura 9. Primer impulso de una descarga atmosférica. Fuente: (Castillo Herrera, 2014).....	76
Figura 10. Descarga atmosférica dentro de una misma nube. Fuente: Google imágenes.....	77
Figura 11. Descarga atmosférica de una nube hacia otra. Fuente: Google imágenes.	77
Figura 12. Descarga atmosférica de la nube hacia tierra. Fuente: Google imágenes.	78
Figura 13. Descarga atmosférica hacia la ionosfera. Fuente: Wikipedia.....	78

Figura 14. Descarga atmosférica de la nube hacia el aire. Fuente: Google imágenes.	79
Figura 15. Ubicación del nuevo estadio de béisbol Denis Martínez. Fuente: Google Maps.	79
Figura 16. Densidad de descargas atmosféricas. Fuente: National Lightning Safety Institute.....	80
Figura 17. Canal de descarga del rayo cuyo voltaje inducido resultante es muy significativo. Fuente: Disipadores de Rayos LEC.....	81
Figura 18. Pulso electromagnético que afecta a conductores soterrados. Fuente: (Ángeles Sánchez & Mora Galicia, 2010).....	81
Figura 19. Pulsos electroestáticos por una descarga rayo-tierra. Fuente: disipadoresderayoslec.blogspot.com.	82
Figura 20. Corrientes Transitorias de tierra. Fuente: disipadoresderayoslec.blogspot.com.	82
Figura 21. Radio de proteccion. Fuente: (NFC 17-102, 1995).	83
Figura 22. Zonas de proteccion de cada uno de los 4 pararrayos. Fuente: Fuente propia.	83
Figura 23. Demostración de interconexión de sistemas de tierra dentro de una edificación que garantice la equipontencialidad. Fuente: NMX-J-549 ANCE.....	84
Figura 24. Vista de los arreglos típicos para formar el electrodo de puesta a tierra que conecta a cada conductor de bajada. Fuente: (Maldonado Salas & Téllez Garrido, 2009).	84

Figura 25. Soldadura exotérmica utilizada para la conexión de los conductores de bajada y electrodos de puesta a tierra. Fuente: NMX-ANCE-2005.	85
Figura 26. Los cimientos de edificios o estructuras pueden utilizarse como electrodos de puesta a tierra. Fuente: NMX-549-ANCE-2005.	85
Figura 27. Representación gráfica de disposición geométrica de la malla para el diseño. Fuente: (IEEE 80-2000, 2000)	86
Figura 28. Vista lateral de niveles de profundidad a tomar en cuenta para la instalación del sistema de puesta a tierra. Fuente: (Poveda, Marlon).	86
Figura 29. Cargos que se integran en el precio unitario con sus porcentajes aproximados. Fuente: (Ángeles Sánchez & Mora Galicia, 2010).	87
Figura 30. Perfil de vista de ubicación de pararrayos situado sobre cubierta de techo detrás de home plate. Fuente: Fuente propia.	88
Figura 31. Perfil de vista de ubicación de pararrayos situado sobre cubierta de techo contiguo a right field. Fuente: Fuente propia.	89
Figura 32. Perfil de vista de ubicación de pararrayos situado sobre cubierta de techo contiguo a left field. Fuente: Fuente propia.	90
Figura 33. Ubicación de pararrayos situado sobre cubierta de techo contiguo a left field. Fuente: Fuente propia.	91
Figura 34. Pararrayos de la marca Helita modelo Pulsar 60. Fuente: Fuente propia.	92
Figura 35. Conductor de bajada sujetado a la estructura. Fuente: Fuente propia. ...	93
Figura 36. Medición de resistencia de suelo para efectuar la instalación del sistema de puesta a tierra. Fuente: Fuente propia.	94

Figura 37. Medición de resistencia de suelo. Fuente: Fuente propia.	94
Figura 38. Ejecución de obra para la instalación del sistema de puesta a tierra del pararrayos. Fuente propia.	95
Figura 39. Avance del 60% de la instalación del sistema de puesta a tierra. Fuente: Fuente propia.	95
Figura 40. Instalación de electrodo de tierra. Fuente: Fuente propia.	96
Figura 42. Dato técnico ABB Helita Pararrayos. Fuente: Fuente propia.	98

Índice de Tablas

Tabla 1 El valor máximo de la corriente I_{cresta} [kA]	13
Tabla 2 La variación máxima de la corriente en el tiempo.	14
Tabla 3 El valor máximo de la corriente I_K [kA].	14
Tabla 4 La variación máxima de la corriente en el tiempo.	14
Tabla 5 Datos del rayo de retorno de una descarga atmosférica.....	20
Tabla 6 Situación en la que se encuentra la estructura.	30
Tabla 7 Tipo de construcción de la estructura.	31
Tabla 8 Contenido de la estructura	31
Tabla 9 Ocupación de la estructura.	32
Tabla 10 Consecuencias sobre el entorno de la estructura.	32
Tabla 11 Nivel de protección a aplicar sobre la estructura.....	34
Tabla 12 Radios de protección del Pulsar.....	37
Tabla 13 Tabla de materiales empleados en el montaje del sistema de protección.	40
Tabla 14 Constantes del cobre	41
Tabla 15 Análisis de resultados del diseño.	54
Tabla 16 Presupuesto de la obra.	60
Tabla 17 Presupuesto de la obra.	61

Resumen

Para realizar el diseño se debió tener la información necesaria como el nivel ceraúnico del lugar donde se encuentra la estructura, así como factores de la estructura en sí que nos permitirán realizar el análisis de riesgo rigiéndonos por la norma NFC 17-102.

Posteriormente para la selección del pararrayos deben de tomarse criterios de montaje como son: la ubicación de las puntas, radio de protección en base a resultados del análisis de riesgo, naturaleza y sección de los materiales utilizados para los bajantes, trayectoria de los bajantes, fijaciones mecánica de los diferentes elementos de la instalación, respetar las distancias de seguridad y/o la presencia de uniones equipotenciales.

Todos estos criterios nos brindaran una zona de protección contra el rayo actuando de manera eficaz frente a cualquier eventualidad. Se realizó un sistema de tierra para facilitar la rápida evacuación y dispersión de la corriente del rayo. Se desarrolla el presupuesto de la obra para fines de montaje de los dispositivos y materiales empleados para dicho sistema de protección contra el rayo.

Capítulo 1.

Generalidades

Introducción

Una tormenta eléctrica es “una tormenta local producida por una nube cumulonimbos y que está acompañada por relámpagos y truenos”, según la definición del glosario de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). Las tormentas eléctricas ocurren en cualquier parte del mundo, siempre y cuando existan condiciones de calor y humedad.

Los daños causados por estas tormentas son variados pero relevantes. Los efectos de un rayo pueden ser ocasionados por un impacto directo o por causas indirectas. Un impacto directo puede tener consecuencias catastróficas para las personas, edificaciones, y animales; los daños por causas indirectas suelen ser más numerosos, acompañados de cuantiosas pérdidas económicas.

El rayo puede alcanzar fábricas, hogares, comercios, industrias y propagar sobretensiones a través de las líneas de transmisión de energía eléctrica, por las líneas de telecomunicaciones, y también a través de la estructura metálica de los edificios o antenas. Por lo cual es necesario que los equipos estén protegidos frente a todas estas posibilidades.

El propósito entonces es tratar de protegerse contra las descargas atmosféricas (rayos), controlando el paso de la corriente de las descargas eléctricas, y así prevenir lesiones a las personas y daños a la propiedad. La primera medida a tomar es interceptar la trayectoria del rayo y conducirlo a lo largo de un conductor de baja resistencia, con el

fin de que no se recaliente y que no produzca elevados niveles de voltajes durante la descarga.

Con tal fin, la instalación para protección contra rayos se debe iniciar con la colocación de un terminal aéreo de captación, de una adecuada bajante a tierra y un sistema de electrodos de puesta a tierra. El pararrayos es prácticamente en una barra metálica terminada en punta, donde se encuentra una bola de cobre o de platino, y se coloca verticalmente en lo alto de los edificios. En su extremo lleva un cable conductor conectado directamente al terreno (a tierra).

La construcción del nuevo Estadio Nacional Denis Martínez en la ciudad de Managua representa desafíos tanto a nivel de geología como nivel isoceraunico debido en gran parte al sitio donde se llevará a cabo dicho proyecto. En Managua las tormentas eléctricas toman lugar mayormente en invierno como consecuencia las posibilidades de descargas eléctricas aumentan.

El número de tormentas eléctricas en la zona del pacifico de Nicaragua alcanza las 336 tormentas/año, provocando de esta manera un inminente peligro por descargas atmosféricas en esta región.

Antecedentes

Desde hace muchos años, las descargas atmosféricas han sido una inquietud para la sociedad, ya que se ha buscado mediante los avances tecnológicos la protección de las zonas con altas posibilidades de presenciar este fenómeno natural. Los rayos son las descargas atmosféricas más comunes y pueden presentar una intensidad de hasta 400 kA según estudios hechos sobre este fenómeno.

El último estadio construido en la región Centro América es el estadio Nacional Rod Carew es un estadio de béisbol de la ciudad de Panamá, ubicado en la avenida de la Paz a 3km de la Vía Ricardo J. Alfaro, en vía al puente Centenario. Es uno de los 4 coliseos deportivos más importantes de la ciudad y del país, junto al estadio Rommel Fernández, la arena Roberto Durán y el hipódromo Presidente Remón.

Fue inaugurado el 10 de enero de 1999 y con capacidad de 27 000 espectadores alberga partidos de béisbol y otros eventos deportivos y conciertos.

Debido a la gran incidencias de rayos en Managua, lugares como el parque industrial portezuelo por su cercanía al lago Xolotlan , en la nave #52 se procedió a instalar un pararrayos sobre el techo de la nave con sistema PDC Nimbus 30, siendo una estructura de metal se realizó un anillo conectando la estructura del edificio a ella.

Igualmente en el parque industrial Pradexa ubicado en municipio de ciudad Sandino, se instaló un pararrayos sobre una torre de 12m debido a que el techo de la bodega con los 5m, del mástil del pararrayos no sobrepasaba la copa de los arboles lo que podía provocar, que descargas atmosféricas cayeran sobre los árboles y no en la punta del mástil.

En Nicaragua existen varias zonas con alto riesgo de descargas atmosféricas, en estas zonas es frecuente observar este tipo de actividad natural por lo que se torna prácticamente indispensable proteger un área definida con dispositivos de pararrayos, de esta manera se buscan proteger la integridad de las seres vivos, ya que un sobre voltaje de esta magnitud les causaría serios daños, de ahí la importancia de contar con estos equipos.

Justificación

No todos los rayos descargan a tierra existen diferentes tipos de descargas como lo son Rayo intra-nube, Rayo entre nubes y Rayo nube-tierra. Cuando este último ocurre, esa energía puede ser devastadora. Una subestación eléctrica, puede salir de operación por horas o días, debido a daños en el equipo, o un edificio estructural puede tener incendios originados por rayos, con peligrosos riesgos y elevados costos.

La ciudad de Managua en donde se desarrollara la obra de construcción del nuevo Estadio Denis Martínez pertenece a la zona del pacifico cuya actividad de tormentas eléctricas ocurren con frecuencia. Puesto que es imposible evitar que se produzcan las descargas eléctricas de origen atmosférico entre nubes y tierra nos vemos en la obligación de estudiar este fenómeno y disponer de medidas para mitigarlo.

A todo peligro se le puede asociar un riesgo, el cual resulta de una combinación de probabilidad de ocurrencia del peligro y la magnitud de las consecuencias de tal ocurrencia. La finalidad que se persigue con este estudio es analizar el estado actual del nuevo Estadio Denis Martínez frente a descargas atmosféricas, de cómo este fenómeno natural afectaría la integridad del edificio y personas de su inevitable incidencia, y prever medidas de seguridad que una vez ejecutado dicho análisis favorecerá a la protección de dicho estadio.

Estos eventos son estudiados desde hace mucho tiempo y las medidas de prevención están en un estado bien avanzado. La información obtenida del análisis efectuado, será aplicada para diseñar un sistema que nos permita proteger el estadio. La instalación de un pararrayos, técnicamente llamado Sistema de Protección contra Descargas

Atmosféricas (SPDA), es el medio más adecuado de proteger una edificación y las personas que estén en su interior.

Debido a esta necesidad, en el nuevo Estadio Nacional Denis Martínez es propicio el diseño y la instalación de un SPDA, ya que se tiene el compromiso, además de brindar la mejor comodidad a espectadores y deportistas, también se debe proveer de una protección al equipo instalado; es por esto que se dará un veredicto de la necesidad de instalación de éste sistema basándose en normas internacional y nacionales.

Cabe destacar que a través de la realización de esta guía, ingenieros, técnicos o cualquier persona con conocimiento en el tema, podrá acceder a la lectura de este trabajo monográfico y de esta manera servirá como referencia para futuros proyectos que se tenga planeado realizar en el campo de sistemas de protección contra descargas atmosféricas.

Objetivos

Objetivo General

- Diseñar la protección contra descargas eléctricas atmosféricas para el nuevo Estadio Nacional Denis Martínez.

Objetivos Específicos

- Determinar por medio del Análisis de Riesgo el Nivel de protección del pararrayos.
- Seleccionar el pararrayos adecuado.
- Diseñar el sistema de red de tierra que garantice la equipotencialidad.
- Determinar la zona o área de cobertura.
- Determinar el presupuesto para realizar el proyecto.

Marco teórico

Antes de adentrarnos en el tema de las descargas atmosféricas y los pararrayos es esencial que contemplemos algunos conceptos importantes para el desarrollo del proyecto, por lo que a continuación se desarrollarán brevemente algunas definiciones realmente importantes.

1.1 Tormenta Eléctrica

Una tormenta eléctrica es un fenómeno meteorológico que se produce cuando se conjugan las condiciones de humedad y calor creando una fuente de energía que se traduce en relámpagos y truenos.

Las características climáticas y montañosa de cada país determina el número y la intensidad de las tormentas que se producen (nivel ceraúnico), riesgo que varía dentro de un mismo país. El conocimiento de las zonas de riesgo es una información importante para determinar eficazmente el tipo de protección contra el rayo más adecuado.

1.2 Formación de la tormenta Eléctrica.

1.2.1 Proceso de carga y descarga de la nube.

Las nubes de una tormenta eléctrica son generalmente de tipo cumulonimbo, esta se reconoce por su forma de yunque y el color oscuro de su base, como se muestra en la Figura 1 (véase anexos), esta se encuentra a 3 Km de altura con respecto al suelo y la cima a 12 Km. El desarrollo de la misma está condicionado por la elevación del aire caliente procedente del suelo; durante esta ascensión, la masa de aire se carga de humedad hasta formar a la nube.

1.2.2 Mecanismo de electrización.

Se origina por las violentas corrientes ascendentes y descendentes que son características de estas nubes, al tomar una altura determinada se producen gotas de agua, algunas de ellas se convierten en cristales de hielo por las bajas temperaturas dentro de la nube; como las corrientes de aire son inestables, estas provocan que las partículas de agua y hielo choquen entre sí, creando cargas positivas y cargas negativas como se aprecia en la Figura 2 (véase anexos).

1.2.3 Inicio de fase activa.

Se genera cuando las cargas de signo opuesto se separan, como se aprecia en la Figura 3 (véase anexos); las cargas positivas compuestas de cristales de hielo se sitúan en la parte superior, mientras que las cargas negativas que comprenden a las gotas de agua se sitúan en la parte inferior de la nube, pasado esto la nube entra en una fase activa y los primeros rayos intranube aparecen.

1.2.4 Madurez de la fase activa.

En esta etapa la nube forma un enorme condensador con el suelo, después de media hora de formación, se comienzan a generar los rayos intra nube y con descarga a tierra; las primeras lluvias comienzan aparecer, como se ve en la Figura 4 (véase anexos).

1.2.5 Fin de la fase activa.

En esta última fase la nube disminuye sus dimensiones mientras que las descargas atmosféricas se intensifican como lo presenta la Figura 5 (véase anexos), esto es acompañado por fuertes precipitaciones de granizo y ráfagas de viento; o también es conocida como la fase de hundimiento donde la nube descarga varias centenas milímetros de agua.

1.3 Teorías sobre la formación de descargas atmosféricas.

El rayo una inmensa chispa eléctrica natural, llamada también descarga atmosférica; el arma más poderosa de la naturaleza, además de que tiene un promedio de concurrencia de 100 veces por segundo sobre la faz de la tierra, se le conoce más por sus efectos nocivos aun que son más los beneficios que proporciona.

Se desconoce el proceso exacto por el cual la atmosfera o una nube adquiere cargas eléctricas de tal magnitud que dan origen al rayo o descarga atmosférica. Se ha emitido varias teorías para explicar la acumulación de estas cargas, pero el problema es complejo y aun que se reproduce en el laboratorio, este no es significativo por los valores de corriente alcanzado, además de lo aleatorio de las condiciones necesarias para que ocurra la descarga de una tormenta.

1.3.1 Teoría de Elster y Geitel.

Esta teoría también se conoce con el nombre de teoría de la influencia eléctrica. En la nube se encuentran gotas de diferentes tamaños; las más grandes se precipitan y las más pequeñas son llevadas por el viento hacia arriba. Las gotas se polarizan por la acción del campo eléctrico existente, el cual, se llega a apreciar en la Figura 6 (véase anexos), donde se observa la dirección que toma hacia tierra. Esto conduce a la formación de cargas positivas en la parte inferior de la gota y cargas negativas en la parte superior de la misma. El roce de una gota grande con una pequeña, al caer, trae como consecuencia un intercambio de cargas.

En gotas más pequeñas predomina carga positiva y en las grandes negativas. Ambas gotas se desplazan en sentido opuesto. Mientras tanto en la nube, se acumulan poco a poco cargas positivas en la parte superior y cargas negativas en su parte inferior. El

campo eléctrico que así se forma favorece la separación de cargas por influencia eléctrica.

Estudios recientes le restan importancia a esta teoría, ya que el roce entre gotas parece ser importante solo en la formación de la lluvia y no en la distribución espacial de las cargas eléctricas.

1.3.2 Teoría de los Brooks.

Esta teoría explica la importancia que representan los cristales de hielo (granizo), en las partes superiores de las nubes y también en las regiones árticas. Simpson y Robinson describen la formación de cargas eléctricas al chocar un granizo con otro, permitiendo que el aire adquiera carga positiva y el hielo quede cargado negativamente.

Elster y Geitel opinan que la separación de cargas eléctricas se debe a la fricción entre vapor de agua con granizos o con gotas de agua. En las tormentas recién formadas con un gran cumulo de nubes y en las que no existen precipitaciones pluviales con temperaturas de 10°C pueden ocurrir descargas eléctricas en el interior de la nube.

1.3.3 Teoría de Wilson.

Conocida también como la ionización de la gota de lluvia esta teoría, asume al igual que la de Elster y Geitel, una influencia del campo eléctrico en la formación de la gota. Wilson reemplaza a la acción de la gota pequeña de la teoría anterior por la acción de los iones, simplificándose así el fenómeno de intercambio de cargas entre las gotas.

En la gota que cae se separan las cargas eléctricas por la acción del campo eléctrico. Entonces la parte superior de la gota se carga negativamente y la inferior de carga positiva, el viento, arrastra los iones hacia la nube, donde los negativos son atraídos por la carga positiva de la parte inferior de la gota (Figura 7) (véase anexos). Los iones

positivos son repelidos al mismo tiempo y transportados por el aire hacia la parte superior de la nube, evitando así la atracción de la mitad superior de la gota, la cual continúa su caída, solo con carga negativa. La nube queda cargada positivamente en su mitad superior y una negativa en la inferior.

Esta teoría tropieza con algunas dificultades que se derivan de observaciones prácticas. Así, por ejemplo, el tiempo medio de formación de una carga eléctrica de 1 Coulomb/km por la acción de un gradiente eléctrico de 1kV/cm, es de 170 min. Para la formación de la tormenta atmosférica esta carga resulta ser muy pequeña y con un tiempo de formación muy largo. Esto le resta importancia a la teoría de Wilson, aunque la misma contribuye a explicar la distribución de las cargas eléctricas en la nube.

1.3.4 Teoría de Simpson.

Simpson manifestó que la formación de cargas eléctricas en las nubes se debe a las corrientes de aire que se encuentran en su interior, las corrientes de aire ascendentes transportan vapor húmedo del mar o de la superficie terrestre, este vapor al encontrarse a determinada altura y bajo condiciones atmosféricas propicias se condensa transformándose en gotas de agua. Cuando se inicia la lluvia en su caída, las gotas encuentran corrientes de aire ascendentes que provocan el rompimiento de las mismas, formándose gotas más pequeñas, estas gotas por un procedimiento parecido vuelven a fraccionarse en tamaños menores, al ocurrir el rompimiento de las gotas, se desprenden iones negativos; generando así cargas eléctricas que se dispersan en la atmosfera y al mismo tiempo son llevados por las corrientes de aire ascendentes a la parte superior de la nube, en tanto la parte inferior de la nube se carga en forma positiva.

En la Figura 8 (véase anexos) se muestra la distribución de cargas en la nube según Simpson, la cual ha podido ser constatada en la práctica con la ayuda de globos sonda. Las partes inferiores de la nube denotan una temperatura promedio de $+4^{\circ}\text{C}$, la parte superior alcanza valores de hasta -32°C .

1.3.5 Teoría de Findeisen y Wichmann.

El hielo en la nube tiene importancia en la acumulación de cargas eléctricas que produce el rayo. La teoría de Findeisen y Wichmann, suponen que los cristales de hielo en caída desprenden astillas cargadas de electricidad negativa.

Estas astillas, debido a su reducido peso, quedarían flotando en el espacio, mientras que los “granos” de hielo, considerablemente más pesados en continuo crecimiento, prosiguen su caída, de esta manera hay una separación de cargas en la nube.

1.3.6 Teoría de Sir Basil Schonlan.

Según este científico la descarga atmosférica está vinculada con las nubes. Cuando una típica nube de tormenta comienza a formarse una masa de aire cálido asciende, esta masa transporta una considerable cantidad de humedad, en forma de vapor de agua. A medida que la masa se eleva, se va enfriando; entonces puede retener menos vapor de agua que cuando estaba más caliente. El vapor sobrante se condensa en diminutas gotas que forman nubes.

El agua generalmente se congela a cero grados centígrados, sin embargo, bajo ciertas condiciones permanece líquida a temperatura mucho más baja aun a -4 grados centígrados, en este estado se dice que el agua está sobre enfriada.

Las gotas se forman en las nubes de tormenta, se sobre enfrían, elevándose mucho más arriba que el nivel en que la atmósfera se encuentra a cero grados centígrados.

Finalmente, alcanza una altura tal, en que la temperatura desciende a los -40 grados centígrados, entonces las gotas se transforman en pequeños trozos de hielo. Algunas de las gotas al congelarse se unen a otras de esta manera forman pequeñas piedras de granizo que comienzan a caer a causa de su peso; pero continuamente chocan contra las gotas sobre enfriadas que ascienden, el agua de cada gota se congela sobre la piedra de granizo con la que choca, y gradualmente, estas piedras aumentan de tamaño. Al chocar contra cada gota, la piedra de granizo adquiere una carga negativa, sir Brasil estaba convencido de que millones de estos choques entre las gotas de agua y las piedras de granizo producen en la nube la carga eléctrica que origina el rayo.

Al mismo tiempo, una pequeña astilla de hielo se desprende de la gota de agua cuando esta se congela, la astilla lleva una carga positiva, las corrientes de aire ascendentes transportan estas astillas y sus cargas positivas a las partes más elevadas de la nube.

A medida que las astillas con cargas positivas se elevan en la nube, las piedras de granizo cargadas negativamente caen hacia la base, que es más caliente, entonces estas se derriten para transformarse en grandes gotas de agua.

Este proceso puede continuar por una hora, durante ese tiempo toda la nube es como un inmenso generador. Mientras se ha estado produciendo el proceso principal de carga, un efecto similar pero en menor escala se ha producido en la base de la nube, de bajo el polo negativo ahí es donde ocurre el disparo que desata el rayo.

La descarga salta de este receptáculo de electricidad positiva al polo negativo, situado un poco más arriba, entonces toda la carga positiva inferior, así como parte de la negativa

queda neutralizada, además del trayecto a través del cual ocurre la descarga el aire se ioniza, provocando que se comporte como un conductor.

Por la descendiente el resto de la carga negativa, que continua en su trayectoria hacia abajo, atraída por una carga positiva en la superficie de la tierra.

La descarga no salta en una enorme chispa, si no que se orienta guiada por variaciones locales en el campo eléctrico que tiene por delante. Puede formar ramas, que se bifurcan hacia uno y otro lado.

1.4 Características de las descargas atmosféricas.

El aislamiento de los sistemas eléctricos, está continuamente bajo esfuerzo y para que no se dañe o falle, debe limitarse al valor de las sobretensiones que se presenten durante el funcionamiento de dichos sistemas.

Las sobretensiones en cuestión, pueden ser de origen interno y de origen externo o atmosférico, siendo estas últimas las que mayores magnitudes alcanzan, aunque se presenten con menor frecuencia que las primeras.

Las descargas atmosféricas se deben principalmente a nubes cargadas a un potencial elevado, cuya polaridad es opuesta a la de tierra. Puede compararse el rayo con el salto de la chispa entre las placas de un condensador de enormes dimensiones, donde las nubes forman una placa, la superficie de la tierra otra y el aire su dieléctrico.

Cuando la carga de algunas nubes alcanza una elevada concentración y el gradiente de potencial supera la rigidez dieléctrica del aire interpuesto, se produce la ruptura, constituyendo el rayo a una corriente de aire ionizado.

Aunque la tensión y la intensidad de la corriente de un rayo son extremadamente grandes, la energía efectiva es relativamente pequeña del orden de 4 Kwh, puesto que

su duración es solo de unos cuantos microsegundos. El rayo es un suceso aleatorio, puede ocurrir durante una tormenta o bien, no ocurre cuando la carga eléctrica acumulada no es suficiente, así podemos ver tormentas con descargas atmosféricas o bien sin rayos.

Esto sucede sin que se tenga una frecuencia determinada, hay descargas con distintas configuraciones inclusive invertido el orden de signos.

La cantidad de corriente que tiene un rayo, es del orden de los kilos amperes, con un rango que abarca desde las decenas hasta las centenas, que se han podido medir, en las líneas y subestaciones eléctricas.

Pero la carga total liberada por un rayo, es relativamente pequeña por el tiempo tan corto de vida que es del orden de los microsegundos , así los valores de carga de una sola descarga es de 7 columbios y aun con las descargas sucesivas , estas no supera los 200 columbios.

El fenómeno no parece aislado, pero ocurre en promedio 100 veces por segundo, sobre la tierra y la magnitud del mismo hace que cuando toca una persona o una instalación no protegida, cause daños, pero las pérdidas que ocasiona , sobretudo en interrupciones de energía eléctrica hacen que tenga el nombre de dañino, aunque proporcione más beneficios, al ser el principal abastecedor de nitrógeno para la tierra y de ozono de la atmósfera, sin embargo, los daños existen y tiene probabilidad de causar muchos más.

1.4.1 Campos eléctricos de la atmosfera.

Redondeando la tierra existe en la atmósfera en condiciones normales de buen tiempo un campo eléctrico permanente con superficies equipotenciales concéntricas, cuyo

centro coincide con el de la tierra, siendo por lo tanto vertical el vector de intensidad de campo (E) en cada punto.

El sentido de este valor es tal que se dirige hacia el centro de la tierra, lo que indica que esta última posee una carga negativa, mientras que las distintas capas de la atmósfera son más positivas cuando más alejadas están de la superficie terrestre de tal forma que el gradiente eléctrico decrece con la altura.

Como consecuencia de la existencia de ese campo eléctrico permanente, los iones negativos existentes se dirigen hacia arriba, mientras que los positivos caen hacia la tierra, la resultante de estos dos desplazamientos iónicos es llamada corriente de inducción dirigida hacia abajo según el sentido convencional de la corriente, cuyo valor medio es 2×10^{-16} amperes por centímetro cuadrado lo que representa una corriente total entre atmósfera y tierra de unos mil amperes.

La corriente de inducción puede considerarse también permanente como el campo que la produce, variando muy poco tanto la situación geográfica como la estación, día y hora.

Independientemente de la corriente de inducción, existen corrientes de precipitación, llamada así por originarlas el transporte de cargas eléctricas, producida por las precipitaciones atmosféricas, dichas corrientes de precipitación es en general del mismo sentido que la de inducción, aportando también cargas positivas a la tierra.

Al contrario que esa última variable con las condiciones de tiempo y lugar, su valor medio resulta inferior, habiéndose estimado unos 400 amperes. Considerando la acción continua de estas dos corrientes, resulta a primera vista sorprendente que la carga negativa que posee la tierra permanezca constante y aproximadamente igual a 500,000 coulombios.

Sin embargo, este es un hecho incuestionable, demostrado por la experiencia que obliga a admitir la existencia de otros fenómenos compensatorios sobre los que se ha establecido multitud de hipótesis, de las cuales destacan las siguientes:

- Por efecto de altas temperaturas en el núcleo de la tierra. Escapa aire ionizado positivamente por los intersticios capilares de la corteza terrestre, que es elevado por corrientes conectivas a considerables alturas (efecto Ebert).
- La radiación tanto procedente de la tierra, como del sol y las estrellas, da lugar a la ionización de las moléculas del aire. Los electrones producidos se escapan de la atmosfera gracias a su gran movilidad originándose por tanto una acumulación de cargas positivas en ellas.
- Cuando las condiciones normales de buen tiempo se alteran por distintos fenómenos atmosféricos, tales como la lluvia, nieve, granizo, nubes tormentosas etc. Se producen casi siempre inversiones del campo eléctrico, aportando una gran cantidad de carga negativa a la tierra como consecuencia de los procesos siguientes:
 - Descargas continuas de electricidad positiva por las puntas de conductores conectados a tierra.
 - Descargas intermitentes y de gran magnitud de electricidad positiva, como consecuencia de caídas de rayos.

1.4.2 Estructura eléctrica de una tormenta.

El campo electrostático de una atmosfera, en buen tiempo y ausencia de nubes, es prácticamente uniforme y estable, dirigido hacia abajo, porque la superficie de la tierra tiene carga negativa y la atmosfera tiene carga eléctrica neta de signo positivo.

En medio de ese campo es de unos 120 volts por metro sobre el continente y unos 130 por metro sobre el océano, donde la contaminación ambiental es grande, estos pueden aumentar mucho y se han registrado valores de unos 350 volts por metro.

El gradiente de potencial eléctrico disminuye mucho con la altura a 10 km es apenas de un 3% de su valor en la superficie según las medidas hechas por los Estados Unidos, a los 20 km los valores de ese gradiente son sumamente pequeños, lo que demuestra que el aire a esas alturas es sumamente conductor.

Esta conductividad se explica porque las tormentas en la troposfera pueden afectar la transmisión de las ondas cortas que se reflejan en la ionosfera, ocasionando desvanecimientos que se puede utilizar para localizar, los ciclones del Caribe o los frentes fríos del norte.

1.4.3 Longitud de las descargas atmosféricas.

Estudios realizados por la Universidad Estatal de Nueva York, en Albany dice que los rayos varían en su longitud entre los 304.8 metros (1000 pies) hasta los 160 kilómetros, siendo el más común el de 1609 metros (1 milla).

1.4.4 Valores de una descarga atmosféricas.

Los valores que se pueden llegar a obtener de una descarga se pueden observar en la Figura 9 (véase anexos), donde se muestra la representación de la corriente en función del tiempo en gráficas y tablas.

Los valores que se pueden observar en la gráfica son:

- $I_{MAX} = 19\text{kA}$
- Tiempo para llegar a I_{MAX} , $t_1 \approx 10\mu\text{s}$
- Pendiente máxima (primer frente) $\Delta I/\Delta t = 14\text{kA}/2.5\mu\text{s} = 5.6\text{kA}/\mu\text{s}$

- Tiempo de caída al 50% de I_{MAX} , $t_2 \approx 54\mu s$
- Tiempo hasta que la corriente llega al valor aproximado de 200 a $t_3 \approx 2.2ms$
- Carga eléctrica transportada en t_1 , $Q_{S1} = \int I dt \approx 7C$
- Energía específica (entre 0 y 1300s), $W/R = \int I^2 dt \approx 41.500 W/\Omega$

Es bastante frecuente que el impulso no sea único sino que aparezcan varios impulsos posteriores, de menor valor máximo, llamados arcos subsiguientes. Pueden llegar a contabilizarse, con poca probabilidad de que ocurran, hasta diez impulsos en un solo rayo. Un valor de probabilidad media puede ser de cinco impulsos por descarga. La carga total transportada, entre todos los impulsos, puede estar en el orden de unos 20 o 25 coulomb.

1.4.5 Valores más probables de corriente máxima y de pendiente máxima.

Dada la gran variabilidad de cada uno de los parámetros eléctricos de una descarga, se recurre a representaciones que indican el porcentaje de probabilidad que tal valor sea superado en función de una escala de valores.

Tomamos como ejemplo los valores que proponen la CIGRE (Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas), y el IEEE (Institutos de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), para dos magnitudes muy significativas en la caída de una descarga.

Tabla 1
El valor máximo de la corriente I_{cresta} [kA]

I [kA]	3	4	5	10	30	40	50	100	200
Probabilidad [%]	99	98	96	85	40	30	20	6	1

Ley de repartición de la corriente de cresta (Castillo Herrera, 2014)

Tabla 2
La variación máxima de la corriente en el tiempo.

($\Delta I/\Delta t$)Max	10	20	50	80	100	200	300
Probabilidad	98	78	40	20	12	3	< 1

Ley de repartición de la pendiente máxima de la corriente (Castillo Herrera, 2014).

Tabla 3
El valor máximo de la corriente I_K [kA].

I_K [kA]	2	7	10	11	20	24	50	100
Probabilidad	99.	9	7	70	40	20	7	1
[%]	8	0	4					

Ley de repartición de la corriente de cresta (Castillo Herrera, 2014).

Tabla 4
La variación máxima de la corriente en el tiempo.

($\Delta I/\Delta t$)Max	2	5	10	20	50	100
[kA/ μ s]						
Probabilidad	99.7	96	82	58	20	5
[%]						

Ley de repartición de la pendiente máxima de la corriente (Castillo Herrera, 2014).

1.4.6 Tipos de descargas atmosféricas.

Según se muestra en las siguientes figuras, existen básicamente cuatro tipos de descargas atmosféricas:

- Descargas dentro de la nube (Figura 10) (véase anexos).
- Descargas entre nubes (Figura 11) (véase anexos).
- Descargas Nube – Tierra (Figura 12) (véase anexos).
- Descargas Nube – Ionósfera (Figura 13) (véase anexos).

- Descargas Nube – Aire (Figura 14) (véase anexos).

De todas ellas, la más perjudicial es la nube tierra, pues es la que puede producir daños a estructuras, animales y personas.

1.5 Efectos y consecuencias de las descargas atmosféricas.

El rayo es un fenómeno que nos parece aislado, el cual lo vemos únicamente en la época de lluvias, pero es un evento que se repite en un promedio de 100 veces por segundo sobre la tierra, así la posibilidad de que cause daños es de valor apreciable.

No hay duda acerca del peligro que implican los rayos y sus efectos asociados. Incendios, lesiones o pérdida de la vida, daños y destrucción a propiedades, pérdidas significativas de tiempo y de dinero por salidas de operación, debidas a daños en los equipos, todo esto convierte a los rayos en una seria amenaza.

En tanto que los efectos directos de un rayo son obvios, los efectos secundarios pueden resultar devastadores. Esto resulta especialmente cierto para líneas de energía e instalaciones con equipo electrónico que es muy sensible.

1.5.1 Efectos de los rayos sobre el medio en que actúa.

El rayo que impacta en una instalación u objeto, produce efectos de naturaleza variada caprichosa, los cuerpos no conductores, se rompen a menudo, como por ejemplo los árboles, mientras que los conductores se funden completamente, por ejemplo, un conductor de calibre 14, aislado con una cubierta de goma puede fundirse por una descarga de poca duración pero de gran intensidad, esto se puede comprobar por la cantidad de incendios de fábricas en horas no laborables después de una tormenta eléctrica y las causas son:

- Corto circuito como si no existiera una coordinación de protección.

- Una descarga con una sucesión de un máximo de corriente superpuesta a un componente continuo, puede provocar un incendio, estos casos también se han repetido en laboratorios con modelos a escala, aunque con las limitaciones de corriente que tiene la reproducción de un rayo artificial.

1.5.2 Consecuencias térmicas del rayo.

La energía térmica que se desarrolla en la descarga del rayo depende, de acuerdo con la ley de Joule, del cuadrado de la corriente y de la resistencia del medio encontrado por aquella, además, naturalmente, el tiempo que dura la descarga por lo que la expresión de la cantidad de calor producida adopta la forma:

$$W = R \int I^2 dt$$

Donde:

- W: Energía transformada en calor (expresada en Joule, si la corriente se mide en amperes y el tiempo en segundos; la energía puede expresarse también en calorías; 1 caloría = 4.186 Joule.)
- I = valor instantáneo de la corriente circulante en amperes.
- R= resistencia del medio por el que circula la energía en ohm.

Carece, por tanto de importancia fundamental la resistencia del medio que encuentra el rayo en su camino para descargarse a tierra, dado que fijado el valor de la corriente, depende de la diferencia de potencial entre nube y tierra, la energía térmica desarrollada será más grande, cuando mayor sea la resistencia del medio por donde circula.

En esa forma la descarga de un rayo a través de un material de un conductor de energía eléctrica y de sección suficiente, no desarrolla generalmente cantidades apreciables de calor.

En caso de materiales que son malos conductores, tienen gran interés en el examen de aquellos en que la descarga atraviesa materiales con elevado contenido de agua, porque el calor generado provoca la evaporación instantánea del agua contenida, la cual se evapora o se disocia de sus elementos, provocando un fenómeno de explosión, como se ha observado en árboles, postes de madera y muros húmedos que son impactados por un rayo.

También es necesario hacer notar que los rayos de gran intensidad pero poca duración, provocan una destrucción de materiales pero no llega a producir ignición, (lo que resalta la importancia de los pararrayos activos), mientras que los de corriente modesta pero de gran duración provocan fácilmente la ignición de los materiales.

En general, la peligrosidad del rayo que cae sobre materiales inflamables es alta, porque como ya se vio, a la descarga principal suceden descargas sucesivas.

Los aviones estacionados, se deben conectar firmemente a tierra para evitar esta posibilidad, igualmente cuando se abastecen de combustible para evitar que la descarga de electrostática pueda iniciar la ignición. La misma regla se debe seguir en transportes depósitos de combustibles.

1.5.3 Consecuencias dinámicas del rayo.

La energía liberada por un rayo no es muy elevada, sin embargo, al ser liberada en un tiempo muy corto (100 a 120 microsegundos), la potencia puesta en juego alcanza valores de millares de kilowatts, por lo que las consecuencias pueden ser importantes.

La descarga de retorno de un rayo, produce entorno a la columna de gases fuertemente ionizados que constituyen el recorrido de la descarga, una onda de presión de dimensiones limitadas en las que se generan presiones elevadas que pueden destruir

todo cuanto rodea al conductor principal; en el interior de chimeneas y habitaciones, se pueden producir presiones tan elevadas que produzcan una explosión.

El campo magnético que se forma, puede deformar estructuras y ventanas metálicas, o el conductor de cable sufre una expansión por el campo que se forma entre hilo e hilo del cable, por lo que se debe evitar la sujeción por presión únicamente.

1.5.4 Consecuencias químicas del rayo.

Las descargas atmosféricas son el principal abastecedor de nitrógeno para la tierra y el rayo lo inyecta directamente al terreno; también se forma ozono alrededor del canal del rayo, el cual protege a la tierra de los rayos ultravioleta, también por la intensidad de corriente, produce efectos galvánicos por donde circulan en forma unidireccional.

1.5.5 Consecuencias acústicas del rayo.

Este es debido a la brusca elevación de presión (entre 2 y 3 Atmósferas) del canal de la descarga contactada por las fuerzas electrodinámicas durante la duración del relámpago.

La duración del trueno está en función de la longitud del canal ionizado. La propagación por las frecuencias elevadas, de las componentes espectrales engendradas por la onda de choque que se hace perpendicularmente al canal, mientras que para frecuencias bajas, ésta es omni-direccional, de donde las diferentes formas de estruendo o chasquido recogidos globalmente por un observador, que sigue la distancia y la orientación de los canales sucesivos del relámpago.

1.5.6 Consecuencias eléctricas del rayo.

Las descargas atmosféricas pueden ser de mucho daño tanto en los hogares como en las industrias dependientes de equipo, es importante conocer acerca del tema, ya que

esa es la forma en que comenzamos a prevenir accidentes relacionados con estos fenómenos naturales.

El relámpago se define como el resultado de un canal ionizado de una descarga eléctrica atmosférica; un rayo es una sobre corriente en ese canal. Hay cinco diferentes efectos secundarios que acompañan a un relámpago. Estos son:

- Pulsos Electromagnéticos (EMP)
- Pulsos Electrostáticos
- Corrientes Transitorias de Tierra
- Carga Electroestática
- Sobretensiones

1.5.6.1 Pulsos electromagnéticos.

Los pulsos electromagnéticos, son el resultado de los campos electromagnéticos transitorios que se forman por el flujo de corriente, a través del canal de descarga del rayo. Después de que se establece el canal de descarga del rayo entre la nube y la tierra, llega a formarse un camino tan conductivo como un conductor eléctrico.

La corriente de neutralización comienza a fluir rápidamente, en relación directa con la impedancia en el canal de descarga y la carga eléctrica de la nube de tormenta. La relación de crecimiento de estos pulsos de corriente, varía en órdenes de magnitud. Ellos han sido medidos en niveles de arriba de 510kA por microsegundo. Un promedio práctico, podría ser de 100kA por microsegundo. Las corrientes que fluyen a través de un conductor, producen un campo magnético en relación a las mismas. Ya que estas corrientes de descarga crecen rápidamente y alcanzan corrientes pico de cientos de miles de amperes, los pulsos magnéticos que ellos crean pueden ser muy significativos.

El voltaje inducido resultante (PEM) dentro de cualquier grupo donde existen varios cables que corren paralelamente, puede también ser muy significativo (figura 15) (véase anexos).

A medida que las nubes se cargan eléctricamente, aparece un paso líder hacia abajo en la base de la nube de tormenta. Conforme el paso líder descendente se acerca a la tierra, otro paso líder ascendente lo alcanza, y entonces ocurre el rayo de retorno. Un descomunal aumento de carga acompaña a este rayo de retorno, la cual actúa como una gigantesca antena de onda viajera, generando potentes ondas de pulsos electromagnéticos. Por lo que, los PEM de una descarga eléctrica atmosférica, pueden propagarse a grandes distancias y afectar grandes áreas (Tabla 5).

Tabla 5
Datos del rayo de retorno de una descarga atmosférica.

Corriente 1 de retorno	5 kA – 200 kA
di/dt	7.5 kA/s – 500 kA/s
Velocidad	1/3 la velocidad de la luz
Longitud (altura de las nubes de tormenta)	3 – 5 Km sobre la superficie terrestre

Nota. Fuente:(Ángeles Sánchez & Mora Galicia, 2010)

Cualquier línea de transmisión o de datos aérea, también sufrirá o será afectada por las interferencias de los PEM, derivados de una descarga eléctrica atmosférica, a pesar de que esté blindada. Los PEM de un rayo, tienen un amplio espectro y la mayor parte de su energía está en la banda de baja frecuencia. De ahí que, los PEM de un rayo puedan penetrar el blindaje y causar interferencias en el sistema.

Los PEM también tienen relación con los efectos secundarios que resultan del flujo de corriente en el sistema de tierras. En esta situación, el rápido cambio de corriente en relación al tiempo (di/dt) crea un campo magnético, el cual será inducido a cualquier línea subterránea que pase cerca, o vaya paralela en cualquier tramo del sistema de tierras.

Resumiendo, la cercanía de cables o alambrado subterráneo que se cruce o corra paralelamente, da como resultado la transferencia de energía. Esa energía no siempre causa daño en la acometida del servicio eléctrico; sin embargo, siempre resultará muy alta y será suficiente para dañar a los circuitos de las líneas de datos (Figura 17) (véase anexos).

1.5.6.2 Pulsos electrostáticos.

Los transitorios atmosféricos o pulsos electrostáticos, son el resultado directo de la variación del campo electrostático que acompaña a una tormenta eléctrica.

Cualquier conductor suspendido sobre la superficie de la tierra, está inmerso dentro de un campo electrostático y será cargado con un potencial en relación a su altura (tantas veces la altura por la intensidad del campo), sobre la superficie de la tierra. Por ejemplo, una línea de distribución o telefónica aérea, a una altura promedio de 10 metros sobre la tierra, en un campo electrostático medio, durante una tormenta eléctrica, se cargará con un potencial de entre 100 kV y 300 kV con respecto a la tierra. Cuando ocurre la descarga, esa carga deberá moverse hacia abajo en una línea, buscando un camino a la superficie de la tierra. Cualquier equipo conectado a esa línea, proveerá el camino hacia la tierra. A menos que ese camino esté protegido adecuadamente, será destruido durante el proceso de la descarga a tierra para neutralizarse. Este fenómeno es conocido como transitorio atmosférico inducido. La elevación y caída de voltaje electrostático, también está relacionado con los pulsos electrostáticos (Figura 18) (véase anexos).

De acuerdo con la teoría electromagnética, las cargas estáticas, se acumulan en la superficie de cualquier objeto sobre la tierra. La densidad de carga es proporcional a la

magnitud de esos campos electrostáticos. A mayor densidad de carga, mayor es el riesgo de una terminación o alcance de un paso líder.

Una estructura metálica vertical inmersa en estos campos electrostáticos, especialmente, aquellas que terminan en forma de punta, tienen una considerable diferencia de potencial con respecto a la tierra. Si la estructura no está aterrizada, puede causar arcos eléctricos y en algunos lugares con clasificación de alto riesgo, puede iniciarse un incendio o bien, alterar el funcionamiento o incluso dañar al equipo electrónico, generalmente, muy sensible.

1.5.6.3 Corrientes transitorias de tierra.

La corriente transitoria de tierra es el resultado directo del proceso de neutralización que sigue a un impacto de rayo. El proceso de neutralización, es consumado por el movimiento de la carga a lo largo o cerca de la superficie de la tierra, desde el punto donde se induce la carga, hasta el punto donde termina el rayo.

Cualquier conductor enterrado o cercano a esa carga, proveerá un camino más conductivo desde el punto donde se inicia, al punto donde termina el rayo. Esto induce un voltaje en relación con la carga, que se maneja en esos conductores, lo cual otra vez está relacionado con la cercanía a donde el rayo se impactó. A este voltaje inducido se le llama corriente transitoria de tierra y aparece en alambres conductores, tuberías y otras formas de conductores.

Si los conductores están blindados, los alambres internos experimentarán la primera inducción de la corriente que fluye por el blindaje. Aunque el proceso de descarga es muy rápido (20 microsegundos) y la relación de crecimiento al pico es tan pequeña como 50 nanosegundos, el voltaje inducido será muy alto (Figura 19) (véase anexos).

La terminación de un rayo de retorno en la tierra puede causar los efectos siguientes:

- Puede causar arcos a través de la tierra a cables o sistemas de tierra. (Normalmente se considera un gradiente de ruptura de 50 kV/m. Por ejemplo, la resistencia al pie de una torre de energía es de 10 Ohm, la corriente del rayo de retorno es 200 kA, y la distancia de separación mínima es de 40 metros).
- La corriente de sobrecarga, puede correr por la tierra paralela al sistema de tierras existente, lo cual originará una distribución de elevación de potencial de tierra no uniforme en el sistema de tierra. Por ejemplo, dos alambres de tierra de 10 metros enterrados con una resistencia de aterrizaje de 31.8 Ohm, están separados a 5 metros. Cuando fluye una corriente de 75 amperes en uno de los electrodos de tierra, los otros electrodos tendrán una elevación de voltaje de aproximadamente 188 volts.

1.5.6.4 Carga estática.

La causa más común de incendios en instalaciones donde se manejan productos inflamables relacionados con rayos, es el fenómeno conocido como carga estática resultando arcos eléctricos secundarios. Para entender el riesgo de este fenómeno, es necesario entender cómo se forma la carga estática y como resultan los arcos secundarios provocando el incendio. La nube de tormenta induce la carga estática en cualquier estructura inmersa en la tormenta. La carga estática (amperes-segundo) está relacionada con la carga en la nube de tormenta.

Debido a que la mayoría de estructuras y equipos utilizados son metálicos que son conductores eléctricos, se cargan eléctricamente, resultando una diferencia de potencial

entre el cuerpo metálico y la tierra física del lugar. La tierra en condiciones normales, tiene carga eléctrica de polaridad negativa con respecto a la ionosfera. Cuando aparece una nube de tormenta entre la ionosfera y la tierra, la carga positiva es inducida sobre la superficie de la tierra, neutralizando la carga negativa y cargándose rápidamente con carga eléctrica de polaridad positiva.

El aterrizaje no tendrá una influencia significativa en el potencial del fenómeno y la protección contra rayos convencional no puede prevenir la Carga Estática (CE) / Arcos Secundarios (AS), porque no hay un camino de descarga confiable y disponible.

1.5.6.5 Sobretensiones.

Las descargas atmosféricas pueden ser de mucho daño tanto en los hogares como en las industrias dependientes de equipo, es importante conocer acerca del tema, ya que esa es la forma en que comenzamos a prevenir accidentes relacionados con estos fenómenos naturales.

Existen 3 tipos de sobre voltajes:

- Sobrevoltaje por carga estática:

Se dan cuando existen nubes localizadas sobre las líneas de transmisión o las instalaciones, las nubes se ven desplazadas por el viento. Este caso es el menos peligroso. Ya que están protegidos por medio del hilo de guarda que siempre se encuentra conectado a tierra, evitando así el valor de ruptura de los gradientes.

- Sobrevoltaje por descarga indirecta:

Se presentan cuando caen rayos cercanos en las instalaciones y producen efectos de inducción electromagnética y electroestática que generan transitorios en las instalaciones. Este es el más común de los sobrevoltajes, es decir que es el que se

presenta más seguido y puede llegar a ser muy peligroso, ya que van desde los 100 kV a los 200 kV, con intensidades de corriente de 25 kA a 100 kA. Estos sobrevoltajes son los que más afectan a las instalaciones de media y baja tensión.

- Sobrevoltaje por descarga directa:

Pueden llegar a ser los más letales, ya que una descarga atmosférica posee una enorme cantidad de energía, sin embargo se dan con muy poca frecuencia. Estas descargas pueden llegar alcanzar en muy poco tiempo los 100 kA, prácticamente en forma instantánea.

Capítulo 2

Análisis de riesgo.

Para el diseño se deberá de realizar un estudio previo, en el cual se debe elegir el nivel de protección, ubicación del o los pararrayos, el trazado de o de las bajantes y la ubicación de la puesta a tierra. Se utilizara la norma NFC 17-102 para efectuar el diseño de la protección contra descargas eléctricas atmosféricas para el nuevo estadio nacional Denis Martínez.

Se recomienda tener en cuenta la estructura desde el momento de diseño del sistema de protección contra el rayo, ya que de lo contrario su eficacia puede reducirse.

2.1 Ubicación de la estructura.

El estadio nacional Dennis Martínez es un estadio de béisbol ubicado en la ciudad de Managua como se muestra en la *Figura 15*, cuya construcción se llevó a cabo a partir de 2016, cuando comenzaron los trabajos ejecutados por el consorcio constructor.

La zona geográfica en la que se encuentra el estadio es propicia a impactos de rayos, debido a que se encuentra cerca de la colina de tiscapa; lugar con grandes incidencias de caídas de rayos.

En los alrededores del estadio se encuentra edificios de igual y menor altura como tal es el caso con respecto a los puntos cardinales: al norte con la micro presa de sedimentación, al sur con la universidad nacional de ingeniería, al este con la dirección general de ingresos, UPANIC, un hospital y al oeste con una discoteca y centro cultural nicaragüense norteamericano.

2.2 Determinación de la densidad de impactos de rayos sobre el suelo.

Existen dos formas de representar la actividad de rayos en el planeta tierra y que tienen utilidad tanto en lo que respecta a estimación de variables meteorológicas, como en actividades de protección:

- Nivel Ceraúnico (N_k)
- Densidad de Rayos a Tierra (N_g)

Se han obtenido en función de medidas y estadísticas, ciertas formulaciones que permiten establecer una relación entre el nivel ceraúnico y la densidad de rayos a tierra (rayos/Km²- año).

En nuestro caso de estudio se tomara un promedio del número de rayos/km² del mapa mostrado en la Figura 16, ya que en nuestro país el instituto de estudios territoriales (INETER), encargado de brindar un mapa de nivel ceraúnico nacional no se encontraba disponible por el momento, así también en el código de instalaciones eléctricas de Nicaragua (CIEN) no se encontró información. A continuación para efectos de análisis la fórmula para el cálculo es (NFC 17-102, 1995, pág. 36):

$$N_g = 0.04N_k^{1.25}$$

$$N_g = 0.04(115)^{1.25}$$

$$N_g = 15.06 \quad \text{numero de impactos al año por km}^2$$

Donde:

N_g : densidad de impacto del rayo sobre terreno.

N_k : es el nivel ceraúnico en días de tormenta al año.

2.3 Calculo de superficie de captura equivalente de la estructura.

Una vez establecido la densidad de impactos de rayos sobre el suelo, se determina la superficie de captura equivalente de la estructura única, definida como la superficie en el suelo que tiene la misma probabilidad anual de rayos directos que la estructura.

Las dimensiones del estadio son las siguientes:

- Largo = 271 m
- Ancho = 240 m
- Altura = 27 m
- Altura torre de iluminación = 35 m.

Debido a que el estadio cuenta con una parte prominente (torres de iluminación), deberá calcularse la superficie equivalente para estas. Se suman las dos superficies para obtener el área total. La expresión definida para la superficie equivalente (NFC 17-102, 1995, pág. 37):

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

$$A_e = 271 \text{ m} * 240 \text{ m} + 6(27 \text{ m})(271 \text{ m} + 240 \text{ m}) + 9\pi(27)^2$$

$$A_e = 168,433.98 \text{ m}^2$$

Área de la superficie equivalente de las torres de iluminación (NFC 17-102, 1995, pág. 38):

$$A_e = 9\pi H^2$$

$$A_e = 9\pi(35)^2$$

$$A_e = 34,636.05 \text{ m}^2$$

Área total de superficie equivalente:

$$A_e = 168,433.98 \text{ m}^2 + 34,636.05 \text{ m}^2$$

$$A_e = 203,070.03 \text{ m}^2$$

Donde:

- L = Largo de la estructura
- W = Ancho de la estructura
- H = Altura de la estructura

2.4 Necesidad de la instalación del sistema de protección.

Será necesaria la instalación de un sistema de protección contra el rayo cuando la frecuencia estimada de impactos N_d , sea mayor que la frecuencia aceptada N_c (NFC 17-102, 1995, pág. 36).

2.4.1 Calculo frecuencia estimada N_d de rayo rayos directos sobre una estructura.

La frecuencia estimada de impactos directos N_d sobre una estructura es evaluada a partir de la expresión:

$$N_d = N_g * A_e * C_1 * 10^{-6}$$

$$N_d = (15.06) * (203,070.03) * (0.5) * 10^{-6}$$

$$N_d = 1.529 \text{ no. impacto al año}$$

Donde:

N_g = densidad anual media de rayos a tierra correspondiente a la región donde se sitúa la estructura

A_e = es la superficie de captura equivalente de la estructura única (en m^2) definida como la superficie en el suelo que tiene la misma probabilidad anual de rayos directos que la estructura.

C_1 = Situación relativa de la estructura (NFC 17-102, 1995, pág. 37)

Tabla 6
Situación en la que se encuentra la estructura.

Situación relativa de la estructura	C_1
Estructura situada en un espacio donde hay otras estructuras o árboles de la Misma altura o más alto.	0.5
Estructura rodeada de estructura más bajas.	0.75
Estructura aislada.	1
Estructura aislada situada sobre una colina o promontorio.	2

Nota. Fuente: Tabla B2 determinación de coeficiente C_1 (NFC 17-102, 1995).

2.4.2 Calculo frecuencia aceptada N_c de rayo rayos directos sobre una estructura.

La frecuencia aceptada N_c es evaluada a partir de la expresión:

$$N_c = \frac{5.5 * 10^{-3}}{C_2 * C_3 * C_4 * C_5}$$

$$N_c = \frac{5.5 * 10^{-3}}{(1) * (1) * (1) * (1)}$$

$$N_c = 5.5 * 10^{-3} \text{ no. impacto sobre estructura}$$

Donde:

C_2 representa el tipo de construcción.

C_3 representa el contenido de la estructura.

C_4 representa la ocupación de la estructura.

C_5 representa las consecuencias de una fulminación.

Tabla 7
Tipo de construcción de la estructura.

Tipo de construcción	Tejado	metal	Común	inflamable
Estructura				
Metal		0.5	1	2
Común		1	1	2.5
Inflamable		2	2.5	3

Nota. Fuente: Tabla B5 determinación de coeficiente C_2 (NFC 17-102, 1995).

Tabla 8
Contenido de la estructura

Contenido de la estructura	
Sin valor o no inflamable	0.5
Valor común o normalmente inflamable	1
Gran valor o particularmente inflamable	2
Valor excepcional, irremplazable o muy inflamable, explosivo	3

Nota. Fuente: Tabla B6 determinación de coeficiente C_3 (NFC 17-102, 1995).

Tabla 9
Ocupación de la estructura.

Ocupación de la estructura	
No ocupada	0.5
No ocupada normalmente	1
De difícil evacuación o riesgo de pánico	3

Nota. Fuente: Tabla B7 determinación de coeficiente C_4 (NFC 17-102, 1995).

Tabla 10
Consecuencias sobre el entorno de la estructura.

Consecuencias sobre el entorno	
Sin necesidad de continuidad en el servicio y ninguna consecuencia sobre el entorno	1
Necesidad de continuidad en el servicio y ninguna consecuencia sobre el entorno	2
Consecuencia para el entorno	5

Nota. Fuente: Tabla B8 determinación de coeficiente C_5 (NFC 17-102, 1995).

2.4.3 Resultados del análisis.

Se comparan los valores N_c y N_d .

Si $N_d \leq N_c$, el sistema de protección contra el rayo no es teóricamente necesario.

Si $N_d > N_c$, un sistema de protección contra el rayo debe ser instalado.

Como resultado del análisis de riesgo al estadio tenemos:

$$N_d > N_c$$

$$1.529 > 5.5 * 10^{-3}$$

Por lo tanto es necesario instalar un sistema de protección contra el rayo.

2.4.4 Eficiencia requerida.

Cuando sea necesario disponer de una instalación de protección contra el rayo, ésta tendrá al menos la eficiencia (E) determinada por la siguiente expresión (NFC 17-102, 1995):

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d}$$

$$E = 1 - \frac{5.5 * 10^{-3}}{1.529}$$

$$E = 0.99$$

2.4.5 Selección de nivel de protección.

El nivel de protección determina el radio de protección de los pararrayos, la distancia de seguridad (interconexión de las masas) y la periodicidad de las verificaciones.

La siguiente tabla determina el nivel de protección correspondiente a la eficiencia requerida:

Tabla 11
Nivel de protección a aplicar sobre la estructura.

Eficiencia calculada	Nivel de protección correspondiente	I(kA) Corriente máxima de cresta	D(m) Distancia de cebado
Nivel I más			
E > 0.98	medidas complementarias	-	-
0.95 < E < 0.98	Nivel I	2.8	20
0.80 < E < 0.95	Nivel II	9.5	45
0 < E < 0.80	Nivel III	14.7	60

Nota. Fuente: Tabla B10 determinación del nivel de protección (NFC 17-102, 1995).

Para este estadio el nivel de protección es de **Nivel I más medidas complementarias**.

Las medidas complementarias serán efectuadas en la obra. Las medidas adicionales de protección son, por ejemplo:

- Las medidas que limitan la tensión de paso o de contacto
- Las medidas que limitan la propagación del fuego,
- Las medidas que pueden reducir los efectos de las sobretensiones inducidas por la descarga sobre los equipos sensibles.

Capítulo 3

Selección de pararrayos.

Dependiendo de la altura y características del edificio a proteger se define el nivel de riesgo y en función de este nivel (calculado en el capítulo anterior) se deberá seleccionar la capacidad ionizante, radio de protección y los demás accesorios del pararrayos.

En dependencia del perímetro total del techo se deberá colocar cada dispositivo, y cada uno cuenta con dos bajadas (definido en esta obra las trayectorias en dependencia de la arquitectura).

3.1 Velocidad de propagación de los trazadores o líderes.

Recientes experimentos realizados, provenientes de la naturaleza, muestran que las velocidades medias de los trazadores ascendente y descendente son comparables durante la fase de aproximación. La relación de las velocidades v_a/v_d es aproximadamente 1 (entre 0.9 y 1.1).

Supondremos aquí que $V = V_a = V_d = 1\text{m}/\mu\text{s}$ (valor medio medido de las velocidades de los trazadores) donde:

- V_a = velocidad del trazador ascendente
- V_d = velocidad del trazador descendente
- V = velocidad común.

3.2 Calculo de la ganancia del pararrayos.

La ganancia de longitud del trazador ascendente Δ_L es determinada por:

$$\Delta_L = v * \Delta_t$$

$$\Delta_L = (1 \text{ m}/\mu\text{s}) * (60\mu\text{s})$$

$$\Delta_L = 60 \text{ m}$$

Donde:

- ΔL = Longitud del trazador ascendente (m). Distancia de captación del rayo (Es decir la distancia recorrida por los iones hacia el rayo)
- V = Velocidad común, que por lo general es de 1 m/ μ s.
- Δt = Tiempo del trazador (μ s). Es el avance en el cebado obtenido en las pruebas de evaluación 60 μ s

El Δt se obtiene realizando los ensayos indicados en las normas UNE 21186:2011 o NFC 17-102:2011, y deben certificarse por parte de un laboratorio de alta tensión acreditado.

3.3 Calculo del radio de protección.

Este depende de la altura (h) del pararrayos en relación con la superficie a proteger, de su avance del cebado y del nivel de protección elegido, para calcular este radio de protección se utiliza la siguiente formula, la cual es apreciada de una manera gráfica en la Figura 21 (véase anexos):

$$R_p = \sqrt{2Dh - h^2 + \Delta L(2D + \Delta L)}$$

$$R_p = \sqrt{2(20m)37m - 37^2m + 60m(2(20m) + 60m)}$$

$$R_p = 78.18 \text{ m.}$$

En donde:

- R_p = Radio de protección (m).
- h = Altura de la punta del pararrayos en relación a plano horizontal que pasa por el vértice del elemento a proteger (m): 37mts sobre nivel de campo.
- D = Nivel de protección: 20 m para el nivel I
- ΔL = Longitud del trazador ascendente (m). : 60 m

La fórmula anterior es aplicable para alturas mayores a 5 m.

3.4 Selección del pararrayos.

Entendiendo los puntos anteriores se procederá a buscar un pararrayos igual o mayor a las siguientes características:

- Velocidad de propagación de los trazadores 60m.
- Tiempo del trazador $60\mu\text{s}$.
- Nivel I de protección.
- Radio de protección con un mínimo de 78.18 m
- Altura de mástil de 7 m o más.

Tabla 12
Radios de protección del Pulsar

Radios de protección del Pulsar										
Nivel de protección		I (D = 20 m)			II (D = 45 m)			III (D = 60 m)		
Pulsar		Pulsar 30	Pulsar 45	Pulsar 60	Pulsar 30	Pulsar 45	Pulsar 60	Pulsar 30	Pulsar 45	Pulsar 60
h(m)	Radios de protección RP (m)									
2		19	25	32	25	32	40	28	36	44
3		28	38	48	38	48	59	42	57	65
4		38	51	64	50	65	78	57	72	87
5		48	63	79	63	81	97	71	89	107
6		48	63	79	64	81	97	72	90	107
8		49	64	79	65	82	98	73	91	108
10		49	64	79	66	83	99	75	92	109
15		50	65	80	69	85	101	78	95	111
20		50	65	80	71	86	102	81	97	113
45		50	65	80	75	90	105	89	104	119
60		50	65	80	75	90	105	90	105	120

Nota. Fuente: Modelos de pararrayos de la marca Helita (ABB Helita, s.f, pág. 39).

Según la tabla 12 se selecciona el pararrayos modelo pulsar 60 nivel 1 con un mástil de 8mts. (Esto debido a las torres de iluminación instaladas en el borde del techo del edificio las cuales tienen como altura 4 metros.) Con un radio de protección de 79mts.

3.5 Determinar la zona o área de cobertura.

Una vez seleccionado el tipo de pararrayos a instalar y calculado el radio de protección, se ubican de manera preliminar las puntas de los pararrayos PDC que se toman como origen y se trazan áreas virtuales de cobertura en el nivel a proteger de tal manera que no queden sitios o zonas desprotegidas, este proceso generalmente es gráfico e iterativo.

El diseño del sistema es con 4 puntas con dispositivo de cebado (Helita Pulsar 60), tres de los cuales están ubicados en la cubierta principal y otro en la estructura de la pantalla y son reforzados por puntas de cobre instaladas como protección en los postes de iluminación del campo.

Es importante mencionar que no se podrá instalar equipos de comunicación u otras estructuras metálicas que sobrepasen la altura máxima de montaje del dispositivo de captura del pararrayo.

Por consiguiente, se deberá determinar su colocación en función de las estructuras del edificio: mástiles portabanderas, postes o antenas.

Se puede eventualmente elevar el pararrayos mediante un mástil de extensión.

Se selecciona el pararrayos modelo pulsar 60 nivel 1 a una altura de 8 metros esto debido a las torres de iluminación instaladas en el borde del techo del edificio las cuales tienen como altura 4 metros.

Debido a que no todo el edificio tiene techo y los tiene diferentes niveles de techo, se procedió colocar primeramente el pararrayos que dará cobertura al área del center fielder, el cual fue colocado sobre una estructura que cubre la pantalla gigante electrónica.

Seguidamente fue colocado el pararrayos que está ubicado sobre el techo de home plate dándonos un 50%, de área de cobertura. Los 2 restantes pararrayos fueron colocados en el techo del área de tercera base y primera base quedando un 100% de cobertura en el edificio.

En la Figura 22 (véase anexos) se muestra la ubicación y cobertura de los pararrayos. Según la ubicación de los pararrayos, esto permitirá que las puntas sobrepasen las torres de iluminación, de esta manera no se tendrá problema en desvío de descargas atmosféricas, debido a que será el punto más alto.

El pararrayos debe generalmente superar como mínimo en 2 metros los puntos altos del edificio a proteger. Se logra una cobertura del 100% del estadio con 4 Pararrayos PDC, con un radio de protección de 79mts.

El pararrayos estará unido a tierra con dos bajantes como mínimo ubicados en fachadas opuestas siempre que sea posible. Los conductores de bajada deben instalarse por el exterior del edificio, evitando la proximidad de conducciones eléctricas y de gas.

Su trayectoria debe ser lo más rectilínea posible, siguiendo el trayecto más corto a tierra, evitando cualquier acodamiento. Debido al carácter impulsional del rayo, los bajantes deben respetar los materiales y dimensiones indicados en la norma IEC 62561-2. Siendo los materiales más recomendados: los indicados en la Tabla 13. El bajante a tierra debe estar correctamente fijado y tensado, tomando como referencia 3 abrazaderas por metro de conductor. Proteger la parte inferior del bajante mediante un tubo de protección de 2 m como mínimo. Se recomienda la instalación de un contador de rayos por encima del tubo de protección, para realizar la verificación y mantenimiento de la instalación.

Tabla 13

Tabla de materiales empleados en el montaje del sistema de protección.

Material	Formato	Sección mínima mm ²
Cobre	Cable	50 (Ø1,7 mm por hilo)
Cobre	Redondo	50 (Ø8 mm)
Cobre	Platina	50 (Espesor mínimo 2 mm)

Nota. Fuente: Materiales normados a nivel internacional (IEC 62651, 2006).

Los bajantes de cada pararrayo rematan a mallas mejoradas las cuales se definirán en la ubicación de la obra considerando la mejor área y el flujo de personas. Según la Tabla 13 y tomando en consideración el mercado local se procedió a seleccionar como bajante la platina de cobre de 2 mm cubierta de cinta estañada esto debido a que en el producto de mayor inventario en el mercado local.

Capítulo 4

Sistema de tierra.

Como se puede verificar no hay una norma que describa el diseño del sistema de tierras para los pararrayos, ya que la norma NFC 17-102 solo hace pequeñas referencias acerca de ello, es por eso que en este trabajo se propuso el diseño empleando la norma IEEE 80-2000.

- Características del suelo y de la malla:
- Resistencia del terreno = 45 Ω -m.
- Dimensión de la malla = 10 m x 10 m.
- Profundidad de la malla = 0.5 m.
- Corriente promedio del rayo = 20 kA.
- Duración de la exposición al flujo de corriente = 0.2 segundos.

El material que se emplea es cobre, esto por sus propiedades físicas y químicas; los conductores de cobre cuentan con una conductividad del 97%, teniendo este material los siguientes valores:

Tabla 14
Constantes del cobre

Descripción	Conductividad (%)	α_r Factor a 0 °C (1/°C)	K_0 a 0 °C (0 °C)	Temperatura de fusión T_m (°C)	ρ_r 20 °C ($\mu\Omega$ - cm)	Factor T_{cap} [J/(cm ³ - °C)]
Cobre duro	97.0	0.0038	24	1084	1.7	3.42
		1	2		8	

Nota. Fuente: Constantes de materiales empleados para red de tierras (IEEE 80-2000, 2000).

4.1 Cálculo de sección transversal del conductor.

Para conocer la sección transversal del conductor del sistema de puesta a tierra, en función del incremento de la temperatura, la magnitud de la falla, el tiempo de duración de la falla y conociendo las constantes del material, puede ser determinada con la siguiente expresión:

$$A_r = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{T_{cap} \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

$$A_r = \frac{20}{\sqrt{\left(\frac{3.24 \times 10^{-4}}{0.2(0.00381)(1.78)}\right) \ln\left(\frac{242 + 1084}{242 + 30}\right)}}$$

$$A_r = 32.51 \text{ mm}^2$$

El conductor resultante es # 2 AWG.

4.2 Cálculo de tensión de toque y paso.

Una vez calculado el calibre del conductor, se calcula las tensiones de toque y paso mediante las siguientes expresiones:

$$E_{\text{toque } 70 \text{ kg}} = [1000 + 1.5(C_s)(\rho_s)] \left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}\right)$$

$$E_{\text{paso } 70 \text{ kg}} = [1000 + 6(C_s)(\rho_s)] \left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}\right)$$

Donde:

- t_s = Duración de la exposición al flujo de corriente
- C_s = Factor que relaciona el valor de la resistividad de la capa superficial ρ_s , con el valor de la resistividad del terreno ρ el cual se calcula mediante la expresión:

$$C_s = 1 - \left[\frac{0.09 \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \right]}{2(h_s) + 0.09} \right]$$

$$C_s = 1 - \left[\frac{0.09 \left[1 - \left(\frac{45}{45} \right) \right]}{2(0.10) + 0.09} \right]$$

$$C_s = 1$$

Donde:

- ρ_s = Resistividad de material de la capa superficial.

Volviendo a calcular la tensión de paso y toque tenemos:

$$E_{toque\ 70\ kg} = [1000 + 1.5(1)(45)] \left(\frac{0.157}{\sqrt{0.2}} \right)$$

$$E_{toque\ 70\ kg} = 374.76\ V$$

$$E_{paso\ 70\ kg} = [1000 + 6(1)(45)] \left(\frac{0.157}{\sqrt{0.2}} \right)$$

$$E_{paso\ 70\ kg} = 445.85\ V$$

4.3 Calculo de distancia entre conductores en paralelos.

Se considera que la malla forme un cuadrado, debido a que las dimensiones del área donde se desea instalar así lo permiten. El número de mallas sobre el eje x y eje y es:

$$\frac{Eje\ X}{Eje\ Y} = \frac{10\ m}{10\ m}$$

Por lo que tentativamente se consideran 10 mallas en eje X y 10 mallas en el eje Y; y para calcular la separación entre conductores se emplea la siguiente expresión:

$$D = \frac{2(l_1)(l_2)}{L_t - l_1 - l_2}$$

Donde:

- D = Separación entre conductores (m).
- l_1 = Largo de la red (m).
- l_2 = Ancho de la red (m).
- L_t = Longitud total (m).

Definiendo L como:

$$L_c = L_t = [(\# \text{ de conductores en } x)(\text{Eje } X)] + [(\# \text{ de conductores en } Y)(\text{Eje } Y)]$$

$$L_c = [(11)(10)] + [(11)(10)]$$

$$L_c = 220 \text{ m}$$

Por lo tanto la distancia entre conductores es:

$$D = \frac{2(10)(10)}{220 - 10 - 10}$$

$$D = 1 \text{ m}$$

4.4 Cálculo de la resistencia de red.

Para el cálculo de la resistencia de la red, se emplea la expresión:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{10A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \left(\sqrt{\frac{20}{A}} \right)} \right) \right]$$

$$R_g = 45 \left[\frac{1}{220} + \frac{1}{\sqrt{10(100)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \left(\sqrt{\frac{20}{100}} \right)} \right) \right]$$

$$R_g = 2.79 \Omega$$

En donde:

- R_g = Resistencia de la red de tierras (Ω).
- h = Profundidad de la red de tierra (m).

- ρ = Resistividad del terreno (Ω/m).
- L_t = Longitud total de la red, incluyendo los conductores horizontales y verticales (m).
- A = Área de la superficie ocupada por la red de tierras (m^2).

4.5 Calculo del número de conductores paralelos en la malla.

Para poder determinar el número de conductores en paralelos y por tratarse de una malla cuadrada solo se calculara el valor de n_a , los demás valores ya están preestablecidos.

La longitud total del perímetro se calcula con la siguiente expresión:

$$L_p = 2l_1 + 2l_2$$

$$L_p = 2(10) + 2(10)$$

$$L_p = 40$$

El número de conductores paralelos “n” en una red dada o irregular, se representa por el número de conductores paralelos en una red rectangular equivalente:

$$n = (n_a)(n_b)(n_c)(n_d)$$

$$n = (11)(1)(1)(1)$$

$$n = 11$$

En donde:

$$n_a = \frac{2(L_c)}{L_p}$$

$$n_a = \frac{2(220)}{40}$$

$$n_a = 11$$

- L_c = Longitud total de los conductores horizontales en la red de tierras (m).

- L_p = Longitud de los conductores en la periferia de la red de tierras (m).
- $n_b = 1$, para redes cuadradas.
- $n_c = 1$, para redes cuadradas y rectangulares.
- $n_d = 1$, para redes cuadradas, rectangulares y con forma de L.

4.6 Calculo de la tensión de malla máxima.

Factor de ajuste de peso y efectos internos en la red, que es “1” para redes de tierra que cuentan con electrodos verticales a lo largo de su perímetro y/o en las esquinas.

Considerando los electrodos para el diseño se emplean las siguientes expresiones:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$$

$$K_{ii} = \frac{1}{[2(11)]^{2/11}}$$

$$K_{ii} = 0.57$$

Calculamos el factor de ajuste de peso y profundidad de la red. Para la siguiente expresión h_0 es considerado con un valor unitario, tomado como referencia:

$$k_h = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{h_0}\right)}$$

$$k_h = \sqrt{1 + \left(\frac{0.5}{1}\right)}$$

$$k_h = 1.22$$

El cálculo del diámetro del conductor de la red, se realiza con la siguiente expresión.

El área del conductor del calibre 2 AWG es de 33.60 mm²

$$d_r = \sqrt{\frac{4(A_r)}{\pi}}$$

$$d_r = \sqrt{\frac{4(33.60)}{\pi}}$$

$$d_r = 6.54 \text{ mm} \cong 0.0654 \text{ m}$$

El factor K_m puede ser calculado mediante la expresión (IEEE 80-2000, 2000):

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16(h)(d_r)} + \frac{(D + 2h)^2}{8(D)(d_r)} - \frac{h}{4d_r} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(1)^2}{16(0.5)(0.0654)} + \frac{(1 + 2(0.5))^2}{8(1)(0.0654)} - \frac{0.5}{4(0.0654)} \right) + \frac{0.57}{1.22} \ln \left(\frac{8}{\pi(2(11) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0.31 \text{ v}$$

El factor de ajuste de geometría o irregularidad de la red (K_i), en función del número de conductores en paralelo (n), es determinado por la siguiente expresión (IEEE 80-2000, 2000):

$$K_i = 0.644 + 0.148(n)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148(11)$$

$$K_i = 2.27$$

Ahora se utilizara la siguiente expresión para calcular la tensión de malla máxima.

$$E_m = \frac{\rho(I_g)(K_m)(K_i)}{L_m}$$

$$E_m = \frac{45(20 \times 10^3)(0.31)(2.27)}{220}$$

$$E_m = 2878.77 \text{ v}$$

Una vez calculada la tensión de malla máxima, se procede a realizar la comparación de esta misma con la tensión de toque calculada con anterioridad.

$$E_{malla} > E_{toque 70kg}$$

$$2878.77 V > 374.76 V$$

Como se puede observar la tensión de malla es mayor que la tensión de toque, por lo que se debe de realizar un rediseño del sistema de puesta a tierra.

4.7 Cálculo de rediseño del sistema.

Antes de empezar a realizar el nuevo diseño, se debe verificar que la longitud del conductor de la red es menor que la longitud mínima requerida, esto es para que la tensión máxima de malla sea menor que la tensión de toque, esto será empleando la ecuación:

$$L_c = \frac{\rho(K_m)(K_i)(I_g)(\sqrt{t_s})}{157 + 0.235(C_s)(\rho_s)}$$

$$L_c = \frac{45(0.31)(2.27)(20 \times 10^3)(\sqrt{0.2})}{157 + 0.235(1)(45)}$$

$$L_c = 1690.19 m$$

Analizando los resultados, se puede ver que la longitud calculada es mucho mayor a la longitud mínima del conductor, esto representa un gran costo en la instalación del sistema, si se ve desde una parte económica.

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{L_{mínima calculada}} & < & \mathbf{L_{total propuesta}} \\ 1690.19 m & < & 220 m \end{array}$$

Por lo tanto es recomendable utilizar un método diferente, el cual consiste en colocar una capa de grava de 15 cm de espesor sobre la superficie del sistema, esta capa tiene una resistividad de 3000 Ω -m. Se calcula de nuevo el factor que relaciona el valor de la resistividad de la capa superficial ρ_s , con el valor de la resistividad del terreno ρ el cual se calcula mediante la expresión:

$$C_s = 1 - \left[\frac{0.09 \left[1 - \left(\frac{45}{3000} \right) \right]}{2(0.15) + 0.09} \right]$$

$$C_s = 0.77$$

Hecho esto se procede a calcular nuevamente la tensión de toque:

$$E_{toque\ 70\ kg} = [1000 + 1.5(0.77)(3000)] \left(\frac{0.157}{\sqrt{0.2}} \right)$$

$$E_{toque\ 70\ kg} = 1567.49\ V$$

Así mismo se calcula nuevamente la tensión de paso:

$$E_{paso\ 70\ kg} = [1000 + 6(0.77)(30500)] \left(\frac{0.157}{\sqrt{0.2}} \right)$$

$$E_{paso\ 70\ kg} = 5216.79\ V$$

Se modifican las dimensiones de las mallas y el número de conductores para el eje X y el eje Y se tiene que:

$$\frac{Eje\ X}{Eje\ Y} = \frac{10\ m}{10\ m}$$

Para calcular la separación entre conductores se emplea la siguiente expresión:

$$L_c = L_t = [(\# \text{ de conductores en } x)(Eje\ X)] + [(\# \text{ de conductores en } Y)(Eje\ Y)]$$

$$L_t = [(10.01)(10)] + [(10.01)(10)]$$

$$L_c = 200.18\ m$$

Pero en este caso no se debe de olvidar que se está contemplando la longitud de los electrodos. Se proponen 90 electrodos, para reducir la tensión máxima de malla, puesto que si este número de electrodos variaba 50-89, la última condición no se cumplirá por lo que la longitud total es:

$$L_t = L_c + L_R$$

$$L_t = 200.18 + [(90_{\text{varillas}})(3 \text{ m})]$$

$$L_t = 470.18 \text{ m}$$

Separación entre conductores viene dada por la expresión:

$$D = \frac{2(l_1)(l_2)}{L_c - l_1 - l_2}$$

$$D = \frac{2(10)(10)}{200.18 - 10 - 10}$$

$$D = 1.11 \text{ m}$$

Se calcula nuevamente la resistencia de la red considerando la nueva longitud total:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{10A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \left(\sqrt{\frac{20}{A}} \right)} \right) \right]$$

$$R_g = 45 \left[\frac{1}{470.18} + \frac{1}{\sqrt{10(100)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \left(\sqrt{\frac{20}{100}} \right)} \right) \right]$$

$$R_g = 2.68 \Omega$$

Recordando que la dimensión de la malla y el número de conductores en los ejes no se modificó, el valor de “n” permanece idéntico.

$$n_a = \frac{2(L_c)}{L_p}$$

$$n_a = \frac{2(200.18)}{40}$$

$$n_a = 10.01$$

$$n_b = 1; n_c = 1; n_d = 1$$

$$n = (n_a)(n_b)(n_c)(n_d)$$

$$n = (10.01)(1)(1)(1)$$

$$n = 10.01$$

Los valores que se utilizaron para el cálculo del factor de espaciamiento para la tensión de la malla son los mismo, a excepción de $K_{ii} = 1$.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16(h)(d_r)} + \frac{(D + 2h)^2}{8(D)(d_r)} - \frac{h}{4d_r} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(1.11)^2}{16(0.5)(0.0654)} + \frac{(1.11 + 2(0.5))^2}{8(1.11)(0.0654)} - \frac{0.5}{4(0.0654)} \right) + \frac{1}{1.22} \ln \left(\frac{8}{\pi(2(10.01) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0.30 \text{ V}$$

Se calcula el valor del factor de corrección por geometría:

$$K_i = 0.644 + 0.148(n)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148(10.01)$$

$$K_i = 2.13$$

Se calcula de la tensión máxima de la malla pero con una modificación ya que se emplearan varillas en las esquinas o a largo del perímetro, por lo que la tensión de malla es:

$$E_m = \frac{\rho(I_g)(K_m)(K_i)}{L_c + \left(1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{(L_x)^2 + (L_y)^2}} \right) \right) * L_R}$$

$$E_m = \frac{45(20 \times 10^3)(0.30)(2.13)}{200.18 + \left(1.55 + 1.22 \left(\frac{3}{\sqrt{((10)^2 + (10)^2)}} \right) \right) * [(90)(3)]}$$

$$E_m = 835.23 \text{ V}$$

Nuevamente se comparan las tensiones:

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{E_{malla}} & < & \mathbf{E_{toque 70kg}} \\ 835.23 \text{ V} & < & 1567.49 \text{ V} \end{array}$$

Se puede observar que la tensión de malla del rediseño es de menor que la tensión de toque calculada en el rediseño, lo cual nos indica que el diseño es aceptable.

Con este paso se verifica que la longitud total de la red propuesta sea mayor que la longitud mínima requerida.

$$L_c = \frac{\rho(K_m)(K_i)(I_g)(\sqrt{t_s})}{157 + 0.235(C_s)(\rho_s)}$$

$$L_c = \frac{45(0.30)(2.13)(20 \times 10^3)(\sqrt{0.2})}{157 + 0.235(0.77)(3000)}$$

$$L_c = 367.50 \text{ m}$$

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{L_{minima calculada}} & < & \mathbf{L_{total propuesta}} \\ 367.50 & < & 470.18 \end{array}$$

Como se puede ver, la longitud del conductor de la red es menor a la que se propuso, se puede seguir con el procedimiento de diseño.

Ahora se calcula la longitud efectiva de los conductores de la red:

$$L_s = 0.75(L_c) + 0.85(L_R)$$

$$L_s = 0.75(200.18) + 0.85(270)$$

$$L_s = 379.64 \text{ m}$$

El factor de espaciamento para la tensión de paso se calcula si se considera un potencial de paso a un metro fuera de la esquina, más alejada de la red y al conductor enterrado a un profundidad de 0.5 m, se tiene que:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(h)} + \frac{1}{D+h} + \left(\frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right) \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{1.11 + 0.5} + \left(\frac{1}{1.11} (1 - 0.5^{10.01-2}) \right) \right]$$

$$K_s = 0.80$$

Se calcula nuevamente la tensión de paso máxima de la red:

$$E_s = \frac{\rho(K_s)(K_i)(I_g)}{L_s}$$

$$E_s = \frac{45(0.80)(2.13)(20 \times 10^3)}{379.64}$$

$$E_s = 4039.61 \text{ V}$$

$$E_s < E_{\text{paso } 70 \text{ kg}}$$

$$4039.61 < 5216.79 \text{ V}$$

4.8 Malla propuesta.

Se ha obtenido un diseño satisfactorio. En este punto el sistema de puesta a tierra a instalarse en el sitio deberá cumplir con las normas y certificaciones vigentes. A continuación se muestra la Tabla 15 donde se muestra el resultado del diseño.

Tabla 15
Análisis de resultados del diseño.

	Primer Diseño	Segundo diseño
$E_{paso\ 70kg}$	445.85 V	5,216.79 V
$E_{toque\ 70kg}$	374.76 V	1,567.49 V
E_m	2,878.77 V	835.23 V
L_c	1,690.19 m	367.50 m
R_g	2.79 Ω	2.68 Ω

Nota. Comparación de resultados (fuente propia).

Según los resultados obtenidos la malla para la red de tierra tendrá las siguientes características:

- Dimensiones = 10 m x 10 m.
- Profundidad a ubicar la malla = 0.5 m.
- Numero de electrodos = 90.
- Distancia entre conductores = 1.11 m.
- Conductor seleccionado = 2 AWG.
- Tipos de conexiones = Soldadura exotérmica.
- Capa superficial de grava = 3000 Ω -m.
- Profundidad de la capa superficial = 0.15 m.
- Caja de registro = 0.35 m x 0.35 m x 0.35 m.

Se puede observar la disposición geométrica final del diseño de malla a tierra en la Figura 27 (véase anexos), así como también se observa en la Figura 28 (véase anexos) los niveles de profundidad en los que se ubicaran los diferentes elementos que componen al sistema de puesta a tierra.

4.9 Equipontencialidad del sistema de puesta a tierra.

En la medida de lo posible, la unión equipotencial se realizará mediante conductores de equipontencialidad en el punto de mayor proximidad entre el conductor de bajada o el pararrayos por el que pasa la corriente del rayo y el elemento que se encuentra al mismo potencial situado sobre la estructura en sus paredes o en el interior de las mismas. Se debe integrar, incluir e interconectar todo los sistemas de puesta a tierra que en la estructura se encuentren (instalación eléctrica, tierra de telecomunicaciones, equipo electrónicos sensibles, etc.) y de esta manera disminuir la posibilidad de arcos eléctricos entre los elementos del sistema de protección contra el rayo y elementos conductores cercanos a este.

Capítulo 5

Estudio Económico.

Actualmente, el país cuenta con la experiencia necesaria para diseñar e implantar en los contratos de obras mecanismos de ajuste de costos ágiles y de fácil aplicación pero lo que es increíble es que esta experiencia no se aplica en ocasiones a su tiempo, ni adecuadamente a las empresas constructoras. Es por eso que si alguna persona física o una empresa tienen por objeto realizar una obra tiene las siguientes alternativas:

- Por concurso: Se invita a dos o más empresas constructoras a concursar sobre X proyecto y el criterio de adjudicación es, para el que presente el precio más bajo, tomando en cuenta la seriedad de la empresa.
- Por asignación: En este tipo de contratación, el cliente decide quien construirá la obra en base al catálogo de precios que el mismo impone.

En relación con la forma de pagos de contratos, utiliza cualquiera de las 3 clases de contrato siguientes:

- **Por precios unitarios**: En el contrato aparecerán los conceptos a realizar, la unidad, los volúmenes de obra y precios unitarios de cada concepto.
- **Por precio alzado o fijo**: En este se fija el importe total de la obra, el contratista tiene que realizar la obra con el mismo importe independientemente si en el periodo de ejecución los materiales, mano de obra o equipo sufren incrementos en sus costos.
- **Por administración**: Se caracteriza principalmente porque la utilidad del contratista se obtendrá aplicando un porcentaje sobre la cantidad total otorgada.

El tipo de contratación más usual en la construcción es por precios unitarios y por el tipo de pagos es por administración, el precio alzado de hecho se descarta debido al índice inflacionario.

Una de las etapas de gran importancia dentro de la planeación de la obra eléctrica es la elaboración de los precios unitarios para tener un presupuesto global de la obra.

Este capítulo tiene como objetivo evaluar todos los factores y elementos que intervienen en la ejecución de los trabajos correspondientes, así como también al personal, equipo, materiales, gastos de administración, de campo, de oficina, así como también los impuestos y contribuciones.

5.1 Cargos que integran el precio unitario.

Los cargos que integran el precio unitario son:

- Cargos directos
- Cargos indirectos
- Utilidad
- Cargos adicionales

En la Figura 29 (véase anexos) se representan estos cargos y el porcentaje aproximado con el que participan para la integración del precio unitario:

5.1.1 Cargos directos.

Son los cargos aplicables al concepto de trabajo que se derivan de las erogaciones por materiales, mano de obra, maquinaria, herramienta, instalaciones y por patentes en su caso, efectuadas exclusivamente para realizar dicho concepto de trabajo.

5.1.1.1 Cargo directo por materiales.

Es el correspondiente a las erogaciones que hace el contratista para adquirir o producir todos los materiales necesarios para la correcta ejecución del concepto de trabajo que cumpla con las normas de construcción y especificaciones de la dependencia o entidad, con excepción de los considerados en los cargos por maquinaria. Los materiales que se usan podrán ser permanentes o temporales. Los primeros son los que se incorporan y forman parte de la obra, los segundos son los que se consumen en uno o varios usos y no pasan a formar parte integrante de la obra.

5.1.1.2 Cargos por mano de obra.

Es el que se deriva de las erogaciones que hace el contratista, por el pago de salarios al personal que interviene exclusiva y directamente en la ejecución del concepto de trabajo que se trate, incluyendo al cabo o primer mando.

Los factores que afectan al salario base por jornada para obtener el salario real que es lo que la empresa erogara por jornada trabajada y la afectación de estos factores agrupados se le conoce como factor de salario real, y es la relación entre los días pagados, incluyendo prestaciones y los días trabajados.

5.1.1.3 Cargo por herramienta de mano.

Este cargo corresponde al consumo por desgaste de herramientas de mano utilizadas en la ejecución del concepto de trabajo.

5.1.1.4 Cargo directo por maquinaria.

Es el que se deriva del uso correcto de las maquinas consideradas como nuevas y que sean las adecuadas y necesarias para la ejecución del concepto de trabajo, de

acuerdo a lo estipulado en las normas y especificaciones de construcción de la dependencia o entidad y conforme al programa de trabajo establecido.

El cargo directo por maquinaria se compone de:

- Cargos fijos.
- Cargos por consumos.
- Cargos por salarios para la operación.

5.1.2 Cargos indirectos.

Corresponden a los gastos generales necesarios para la ejecución de los trabajos no incluidos en los cargos directos que realiza el contratista, tanto en sus oficinas centrales como en la obra, y que comprenden entre otros, los gastos de administración, organización, dirección técnica, vigilancia, supervisión, financiamiento, imprevistos, transporte de maquinaria y, en su caso prestaciones sociales correspondientes al personal directivo y administrativo.

Los cargos indirectos se expresan como un porcentaje del costo directo de cada concepto de trabajo. Dicho porcentaje se calculara sumando los importes de los gastos generales que resulten aplicables y dividiendo esta suma entre el costo directo total de la obra de que se trate.

5.1.3 Utilidad.

La utilidad quedará representada por un porcentaje sobre la suma de los cargos directos más indirectos del concepto de trabajo. Lo cual dará como resultado la ganancia que tendrá la empresa ya pagada todas las actividades y prestaciones.

Dentro de este cargo queda incluido el impuesto sobre la renta que por ley debe pagar el contratista.

Tabla 16
Presupuesto de la obra.

Presupuesto								
Suministro e Instalación de Pararrayos Estadio Nacional Denis Martínez								
UNI								
Descripción	U/M	Cantidad	Materiales	Mano Obra	Transporte	Equipo	C Unitario	C. Total
Pre liminares								C\$ 21,168.00
Excavación manual para red de tierra una profundidad de 0.50mt del N.P.T.	m3	86.40	C\$ -	C\$ 245.00	C\$ -	C\$ -	C\$ 245.00	C\$ 21,168.00
Red de tierra								C\$ 174,956.52
Suministro e instalación de cable 2# para red de tierra	m	432.00	C\$ 148.15	C\$ 110.27	C\$ 5.93	C\$ -	C\$ 264.35	C\$ 114,197.47
Suministro e instalación de 90 varilla 5/8x10'' para puesta a tierra unido al cable 2 AWG con soldadura exotérmica cadweld 115(Varilla/cable). Incluye pozo de visita con tubo PVC Ced.40 4''• Dimensiones = 10 m x 10 m. (Profundidad a ubicar la malla = 0.5 m. Numero de electrodos = 90. Distancia entre electrodos = 1.11 m.)	unidad	12.00	C\$ 2,710.64	C\$ 1,084.26	C\$ 27.60	C\$ 250.65	C\$ 4,073.15	C\$ 48,877.75
compactación con brinquina de terreno	m2	43.20	C\$ -	C\$ 150.00	C\$ -	C\$ 44.03	C\$ 194.03	C\$ 8,382.10
Relleno manual de excavación con material extraído del sitio	m2	43.20	C\$ -	C\$ 70.00	C\$ -	C\$ -	C\$ 70.00	C\$ 3,024.00
Limpieza final de sitio con desalojo.	GL	1.00	C\$ -	C\$ 475.20			C\$ 475.20	C\$ 475.20

Nota. Fuente: Presupuesto para la instalación de pararrayos en el estadio nacional Denis Martínez (fuente propia).

Tabla 17
Presupuesto de la obra.

Pararrayos y accesorios								C\$ 1259,625.80
Suministro e instalación de caja de registro con barra de cobre equipotencial	unidad	4.00	C\$ 10,778.36	C\$ 4,311.34	C\$ 106.73		C\$ 15,196.43	C\$ 60,785.74
Suministro e instalación de contadores de descarga, 2CTHOCCF2004	unidad	4.00	C\$ 14,677.38	C\$ 5,870.95	C\$ 106.73		C\$ 20,655.06	C\$ 82,620.26
Suministro e instalación de cinta estañada, como bajante, incluye accesorios para su instalación y protección	ml	640.00	C\$ 1,141.20	C\$ 12.50	C\$ 45.65	C\$ 210.34	C\$ 1,409.69	C\$ 902,200.32
Suministro e instalación de junta de control	unidad	4.00	C\$ 1,299.70	C\$ 600.00	C\$ 51.99		C\$ 1,951.69	C\$ 7,806.75
Suministro e instalación de mástil incluye accesorios(Base, extensión de mástil, etc.),2CTH070002R0000	unidad	4.00	C\$ 20,993.96	C\$ 8,397.58	C\$ 106.73	C\$ -	C\$ 29,498.27	C\$ 117,993.10
Suministro e instalación de pararrayos Pulsar 60,2CTH030004R0000	unidad	4.00	C\$ 74,510.04	C\$ 29,804.02	C\$ 106.73		C\$ 104,420.79	C\$ 88,219.63
SUMATORIA								C\$ 1455,750.32
ADMINISTRATIVOS							7%	C\$ 101,902.52
INDIRECTOS							10%	C\$ 145,575.03
UTILIDADES							5%	C\$ 72,787.51
SUBTOTAL								C\$ 1776,015.38
IVA							15%	C\$ 266,402.30
IR							2%	C\$ 5,328.00
GRAN TOTAL C\$								C\$ 2047,745.68
GRAN TOTAL U\$							U.C. 32.18	\$ 63,634.11

Nota. Fuente: Presupuesto para la instalación de pararrayos en el estadio nacional Denis Martínez (fuente propia).

Conclusiones

Se concluyó que el edificio presenta amenazas de impacto directo del rayo sobre la estructura durante una tormenta eléctrica, y debido a su naturaleza de servicio existente, se tiene un riesgo potencial real de accidentes que termine ocasionando un incendio del inmueble o pérdida de vidas humanas.

El análisis de riesgo desarrollado para la protección del estadio nos orienta la instalación de un sistema de protección contra el rayo debido al peligro que representa dicho fenómeno a la integridad de la estructura y sus ocupantes.

El pararrayos propuesto modelo Pulsar 60 nivel 1 a una altura de 8 metros nos garantiza de acuerdo al fabricante una zona de cobertura de los elementos expuestos a descargas atmosféricas.

El sistema de puesta a tierra diseñado proveerá un camino por el cual la corriente del rayo se disperse hacia tierra y se deberá integrar, incluir e interconectar todos los sistemas eléctricos y electrónicos dentro de la instalación para garantizar la equipotencialidad del sistema de puesta a tierra.

El presupuesto da como resultado un costo económico aproximado del valor del proteger ante descargas atmosféricas todo el estadio. En dependencia de los valores actuales del mercado y las marcas distribuidas. Tomando en consideración todos los costos en que se puede incurrir al momentos de la instalación.

Podemos concluir con el estudio realizado en el Estadio Nacional Denis Martínez que el pararrayos recomendado en su instalación significara una gran protección para todos los equipos y personas. Alargando la vida útil de los equipos electrónicos de última tecnología que en él se instalaron.

Recomendaciones

Antes de ubicar un sistema de protección es importante informarse de las principales características de la zona a proteger, ya que en varias ocasiones las características del área seleccionada determinan los dispositivos a utilizarse.

En el diseño del pararrayos es vital tomar en cuenta la distancia entre dispositivos, ya que marca una diferencia importante entre la zona a proteger y los sectores que pueden quedar expuestos a una descarga.

Realizar una inspección del sistema eléctrico de protección contra tormentas eléctricas cada año o después de cada temporada lluviosa en dependencia de la actividad atmosférica que se produjo con el objeto de determinar sus condiciones de montaje y eléctricas.

Implementar y difundir una guía general de seguridad personal con el objetivo de lograr comportamientos seguros durante tormentas eléctricas en la instalación.

En caso de instalarse elementos adicionales que sobresalgan de la superficie de los techos, tales como líneas de vida, aire acondicionado o chimeneas, posteriores a este diseño, se debe rediseñar el sistema eléctrico de protección contra tormentas eléctricas, ya que dichos elementos afectan la efectividad del mismo.

Cabe recalcar que para una completa protección (protección integral), se debe instalar junto con el sistema de protección contra tormentas eléctricas supresores de pico para proteger a equipos eléctricos y electrónicos que se encuentren en el interior de la estructura.

Glosario

Campo eléctrico atmosférico: Un término cuantitativo, denotando la fuerza o intensidad del campo eléctrico de la atmósfera en cualquier punto específico en el espacio y en el tiempo.

Electrificación de la nube: El proceso por medio del cual se cargan eléctricamente las nubes.

Rayo intra nube: Una descarga de rayo que ocurre entre una zona cargada positivamente y una zona cargada negativamente, cuando ambas cargas se encuentran en la misma nube.

Estratificación del suelo: Disposición en capas verticales y horizontales de las rocas sedimentarias.

Descarga eléctrica atmosférica (Rayo): Descarga eléctrica de corriente muy alta cuya longitud de trayectoria se mide en kilómetros.

Relámpago: Descarga eléctrica atmosférica completa, de nube a tierra, o de tierra a nube, se le llama relámpago.

Descarga eléctrica de Tierra a Nube: Una descarga eléctrica de rayo en la cual el proceso del paso líder original empieza en forma ascendente desde algún objeto sobre la tierra, de manera opuesta a la mayoría de las más comunes descargas de Nube a Tierra.

Interferencia: Interferencia es cualquier perturbación eléctrica o electromagnética extraña que tiende a alterar la recepción de las señales deseadas o produce respuestas indeseables en un circuito o sistema.

Sistema de puesta a tierra (S.P.T): Comprende el conjunto de elementos interconectados, enterrados en el suelo dentro de un área específica, como electrodos horizontales (conductores desnudos), verticales (varillas de tierra).

Material superficial: Material instalado encima del suelo, el cual consiste (sin ser limitativo) en roca triturada, asfalto o algún material hecho por el hombre.

Resistividad del suelo: La resistividad eléctrica o resistencia específica del suelo, es la resistencia de un volumen que tenga un área con sección transversal y longitud unitarias.

Tensión de paso: Diferencia de potencial máxima que se aplicará a una persona entre sus pies, cuando en el instante de una falla se encuentre caminando en un área con una diferencia de potencial en la superficie.

Tensión transferida: Caso especial de tensión de contacto donde una tensión es transferida hacia dentro o hacia fuera de la subestación.

Tierra: Conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra.

IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).

Emplazamiento: se puede emplear para aludir a la ubicación o el establecimiento geográfico o físico de algo. En este sentido, se llama plano de emplazamiento al esquema que exhibe la orientación, la forma y el asentamiento de un edificio o de una serie de construcciones.

Erogar: es distribuir, repartir bienes o caudales. Otro significado de erogar en el diccionario es también gastar el dinero.

CIGRE: Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas.

Bajante: Parte de la instalación exterior de protección contra el rayo, destinada a conducir la corriente del rayo desde la punta captora a la toma o puesta a tierra.

SEPTE: Se compone del sistema eléctrico de protección contra tormentas eléctricas implementado en un edificio destinado a salvaguardar.

Cebado: Fenómeno físico comprendido entre la aparición de los efluvios del efecto corona y la propagación continua del trazador ascendente.

Ceraúnico: Es el número de días promedio, por año con tormenta eléctrica en una región específica.

Equipotencial: Que pone al mismo potencial.

Ionización: Es la producción de iones en un gas o un electrolito.

Mástil: Soporte de sujeción donde se coloca una punta captora.

Corriente de rayo: Aquella que circula al punto de incidencia, asociada con el impulso de retorno.

Densidad de rayos a tierra: Numero de rayos promedio por km² por año en un lugar determinado.

Área equivalente de captura (A_e): Área sobre la superficie del suelo, que tiene la misma frecuencia anual de rayos directos de una estructura.

Angulo de protección: Espacio adyacente a una terminal aérea (horizontal o vertical) que es sustancialmente inmune a sufrir la incidencia de un rayo directo.

Distancia de seguridad: espacio mínimo requerido entre dos partes conductoras dentro del espacio a protegerse, para evitar la generación de arcos eléctricos peligrosos.

Líder escalonado ascendente: Canal ionizado a través del cual se realiza el movimiento de la carga inducida en tierra (o algún objeto metálico sobre tierra) hacia la punta del líder descendente y está formado por descargas discontinuas en el aire. El líder ascendente es de polaridad opuesta a la carga del líder descendente. Nota: el líder escalonado ascendente es algunas veces referido simplemente como líder ascendente.

Líder escalonado descendente: Canal ionizado a través del cual se realiza el movimiento de la carga de la nube a tierra y está formado por descargas discontinuas en aire. Nota: el líder escalonado descendente es algunas veces referido simplemente como líder descendente.

Probabilidad de daño: Posibilidad de que la corriente de rayo cause daño a la estructura, edificio o instalación.

Punto de incidencia: Punto en donde el rayo hace contacto con la tierra, a una estructura o a los elementos constitutivos de un sistema de protección contra tormentas eléctricas. Nota: un rayo puede tener uno o más puntos de incidencia.

Resistividad superficial: Resistividad promedio de la capa superficial del suelo.

Riesgo de daño: Probables pérdidas anuales promedio (humanas o materiales) en una estructura debido a los efectos del rayo. Nota: este dispositivo es conocido como supresor de picos, supresor de transitorio, supresor de sobretensiones o supresor de sobretensiones transitorias. Existen supresores para corriente alterna, corriente continua, radio frecuencia, entre otros.

Terminales aéreas: elementos aéreos metálicos cuya función es recibir la descarga del rayo ofreciendo un punto de incidencia con el fin de evitar daños a la estructura a proteger.

Bajante: Elemento metálico de unión que proporciona una trayectoria de baja impedancia desde las terminales aéreas hasta el sistema de puesta a tierra.

Conductor de unión: Elemento metálico utilizado para realizar las conexiones entre las partes metálicas a conectarse y la barra de unión.

Unión equipotencial: Es aquella unión correspondiente a la parte de un SEPTE cuyo fin es reducir las diferencias de potencial causadas por la circulación de la corriente del rayo.

Barra de unión: Elemento metálico para conectar partes metálicas (pertenecientes a la instalación o ajenas a ella), líneas eléctricas y de comunicaciones y otros cables a un SEPTE.

Electrodo de puesta a tierra: Elemento metálico enterrado que establece una conexión eléctrica a tierra.

Registro para prueba: Punto accesible del sistema de puesta a tierra, SPT.

Armado de acero interconectado: Partes de acero dentro de la estructura considerada como eléctricamente continuas.

PEM: Pulso electromagnético.

Transitorios: Onda que viaja por los conductores y tiene su límite temporal.

CE: Carga electrostática.

AS: Arcos secundarios.

Iterativo: Repetitivo

Bibliografía

1. Tesis

[1.1] Alfaro Córdoba, Marco. (2012). *Análisis y diseño de la instalación de un pararrayos en zonas de riesgo de descarga atmosféricas según las normas NFPA 70, NFPA 780 e IEC 62305*. [Versión electrónica]. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Recuperado de: http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb2012/pb2012_040.pdf

[1.2] Rocha Ramírez, Isauro Marcos. (s.f). *Ingeniería aplicada para la selección de pararrayos y sistemas de tierra*. [Versión electrónica]. México: Universidad Veracruzana.

Recuperado de: https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-07-19_10-04-32107430.pdf

[1.3] *Actualización del sistema contra descargas atmosféricas en las torres del eou* [Versión electrónica]. (s.f). (n/a) México. Recuperado de:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/286/A9.pdf?sequence=9>

[1.4] Castillo Herrera, María Mireya. (2014). *Sistema de protección contra descargas atmosféricas en edificios aplicando la norma NMX-J-549*. [Versión electrónica]. México:

Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de:

<https://es.scribd.com/document/354126545/tesis-sistema-de-pararrayos-pdf>

[1.5] Martínez Contreras, David Pablo. (2011). *Diseño de la protección contra descargas atmosféricas en un tanque de almacenamiento de productos inflamables*.

[Versión electrónica]. México: Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de:

https://kipdf.com/martinez-contreras-david-pablo_5ab2af321723dd419ce4f63c.html

[1.6] Ángeles Sánchez, Jesús Moisés y Mora Galicia, Luis David. (2010). *Implementación del método de volumen de colección para la protección contra descargas eléctricas atmosféricas en la TGDL Poza Rica*. [Versión Electrónica]. México: Universidad Veracruzana. Recuperado de: <https://www.researchgate.net>

[1.7] Maldonado Salas, Rigoberto y Téllez Garrido, Jafet. (2009). *Diseño de un sistema externo de protección contra tormentas eléctricas para un edificio comercial aplicando la norma NMX-J-549-ANCE-2005*. [Versión Electrónica]. México: Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/3519/DISENODEUNSISTEMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

2. Informes

[2.1] ABB Helita. (s.f). *Protección contra el rayo [Versión electrónica]*. Francia. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/.../Catalogo-Tecnico-proteccion-contra-el-rayo-pdf>

[2.2] Ceeesa / Mass@tierra Zapopan. (s.f). *ABC de los sistemas de puesta a tierra y pararrayos*. México Recuperado de: https://zonaemec.files.wordpress.com/2017/02/4_2-tierra-fc3adsica-y-apartarrayos-completo.pdf

[2.3] AFNOR NFC17-102. (1995). *Protección de las estructuras y de las zonas abiertas contra él rayo mediante pararrayos con dispositivo de cebado*. Francia. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/192440988/Norma-Nfc-17102-Dib>

[2.4] UNE 21.186. (1996). *Protección de estructuras, edificaciones y zonas abiertas mediante pararrayos con dispositivos de cebado*. España. Recuperado de: www.pararrayosupresores.com.mx/pdf/normatividad/norma-une-21186.pdf

[2.5] NMX-J-549-ANCE. (2005). *Sistema de protección contra tormentas eléctricas*. México. Recuperado de: www.totalground.com/archivos/.../CAP%206%20de%20NMX-549-ANCE-2005.pdf

3. Sitio Web

[3.1] Autoridad nacional de los servicios públicos (ASEP). (s.f). *Guía para la protección contra descargas atmosféricas (rayos) [Versión electrónica]*. Panamá. Recuperado de: www.asep.gob.pa/electric/info_clientes/Rayos.pdf

[3.2] World Wide Lightning Location Network (WWLLN). (s.f). *Actividad de rayos para la Tierra. [Versión Electrónica]*. Estados Unidos. Recuperado de: <http://wwlln.net/>

[3.3] Global Hydrology Resource Center (GHRC). (s.f). *Lightning & Atmospheric Electricity Research. [Versión Electrónica]*. Recuperado de: <https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/index.html>

Anexos

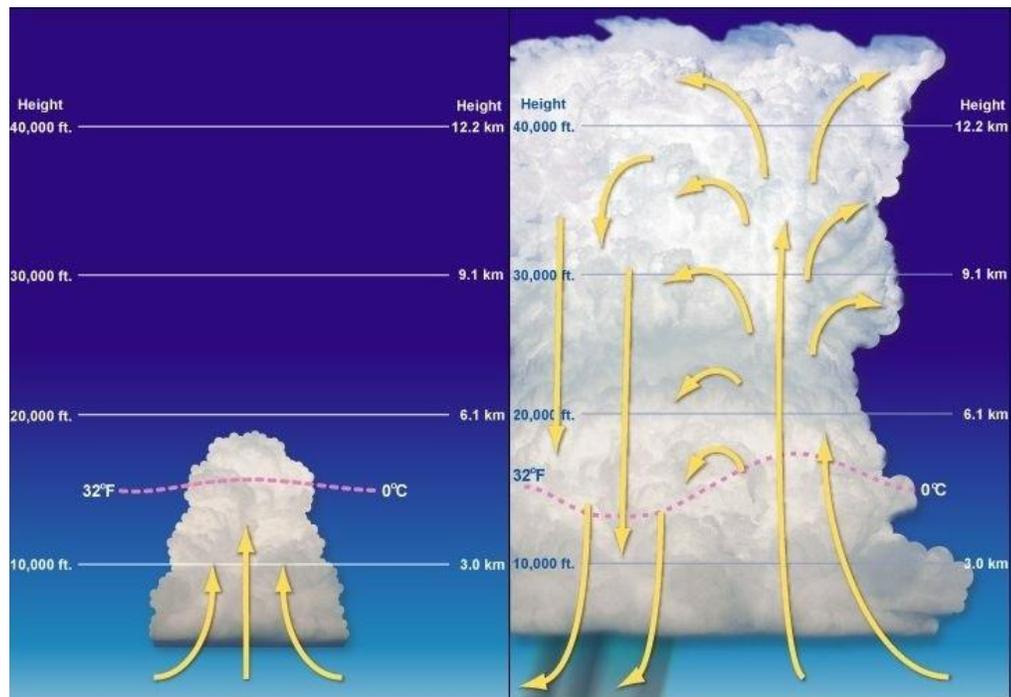


Figura 1. Muestra la formación de nubes de tormentas. Fuente: Wikipedia.



Figura 2. Comienzo de la creación de cargas positivas y negativas. Fuente: Biblioteca de Investigaciones - WordPress.com.

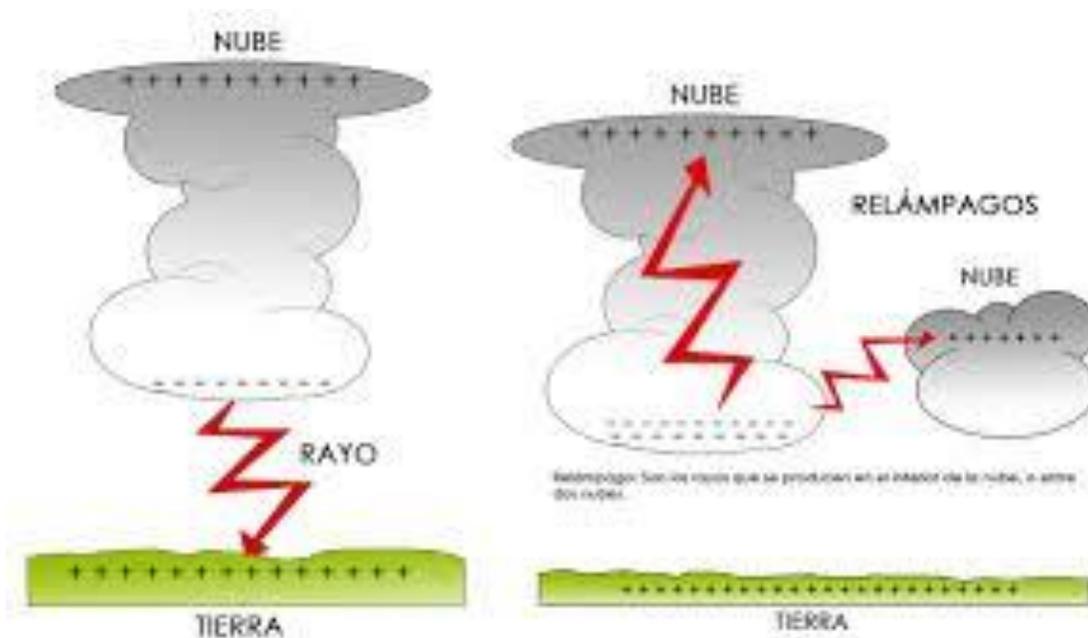


Figura 3. Inicio de electrificación de la nube tormenta o inicio de la fase activa. Fuente: Meteorología de Buenos Aires web.

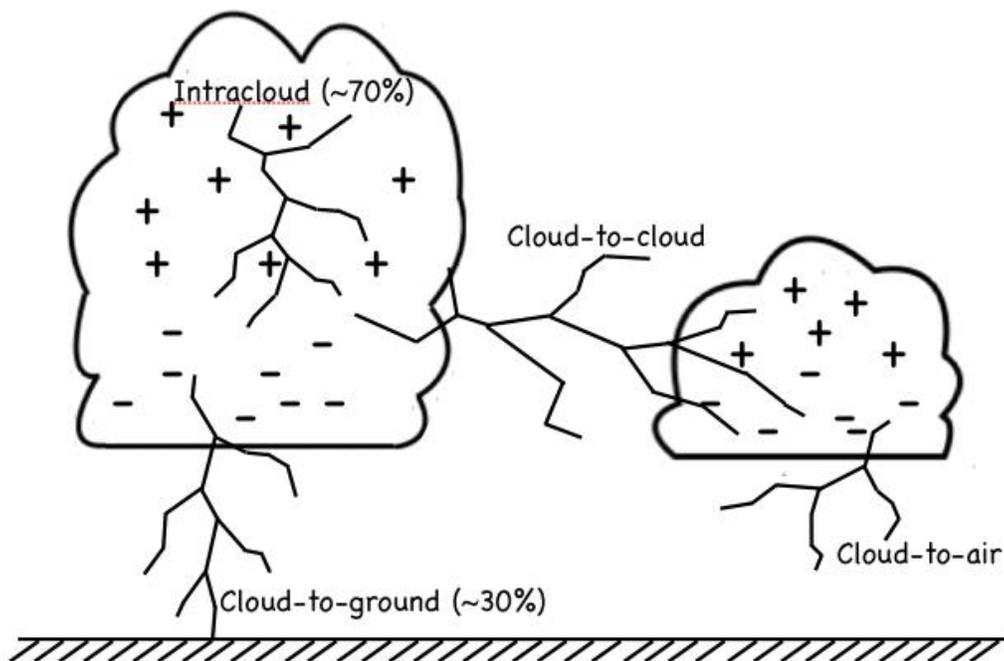


Figura 4. Madurez de la fase activa de la tormenta. Fuente: Radar and lightning detection.

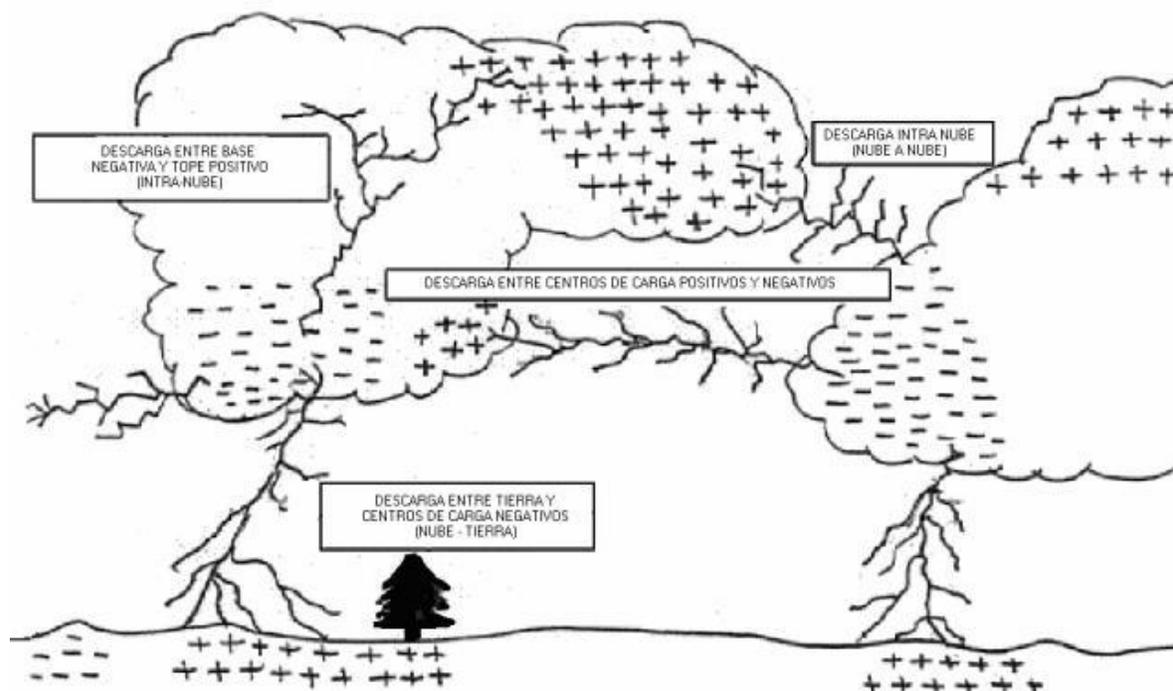


Figura 5. Hundimiento de la nube de tormenta. Fuente: Cibernautita.

MODELO INDUCTIVO DE ELSTER-GEITEL

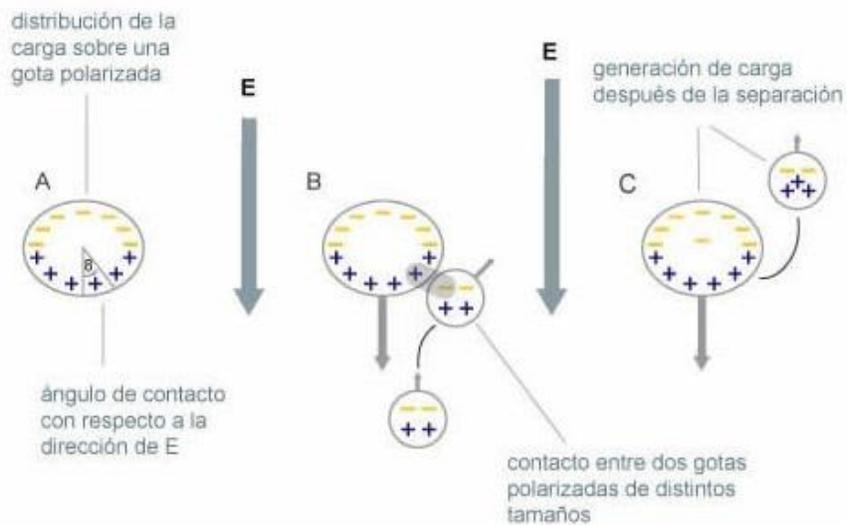


Figura 6. Teoría de Elster y Geitel. Fuente: Google imágenes.

MODELO INDUCTIVO DE WILSON

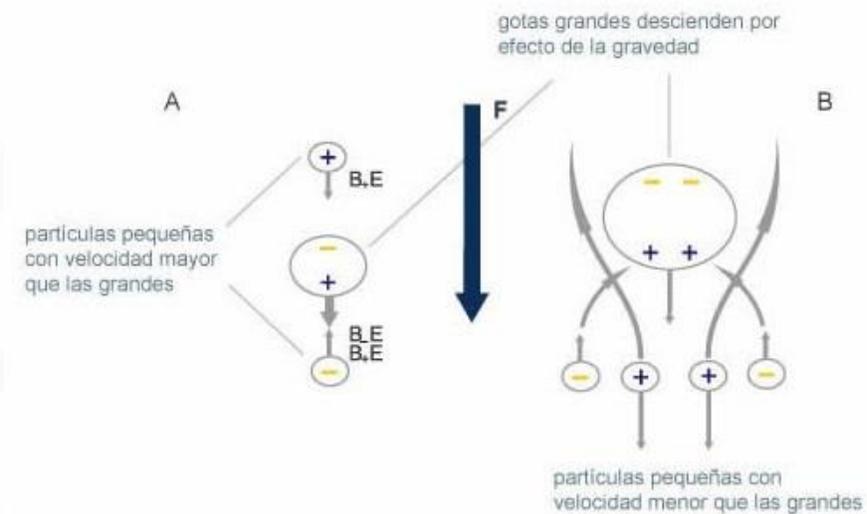


Figura 7. Teoría de Wilson. Fuente: Google imágenes.

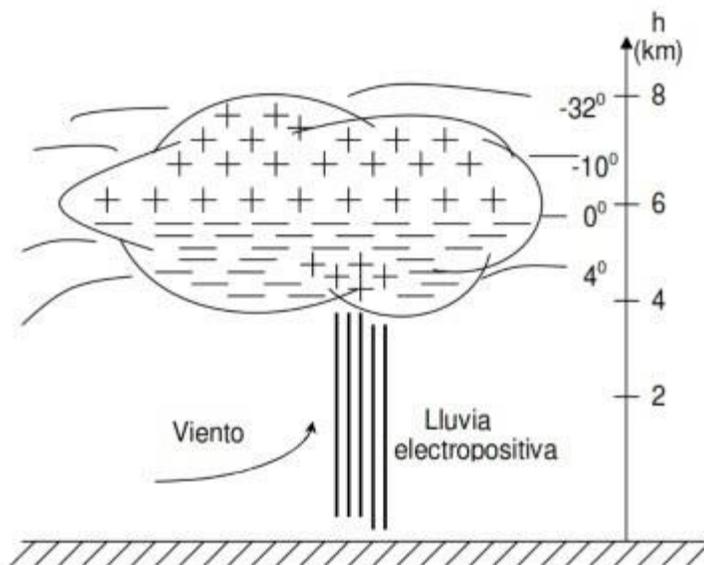
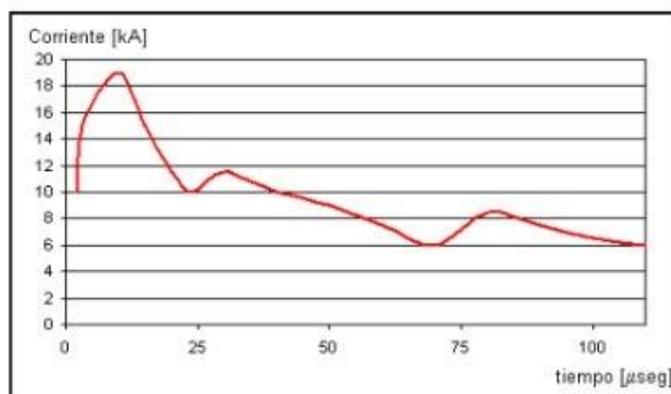


Figura 8. Nube según Simpson con altura e isoterma usuales. Fuente: (Castillo Herrera, 2014).

t [μ seg]	I [kA]
2	10
3	15
10	19
15	15
20	11,5
24	10
30	11,5
40	10
50	9
60	7,5
70	6
80	8,5
90	7,5
100	6,5
110	6



t [μ seg]	I [kA]
0	19
80	8,5
100	6,5
110	6
200	6
400	5,5
600	5
800	3
1000	2,8
1200	2,1
1400	1,5
1600	2
1800	1,5
2000	1
2200	0,5

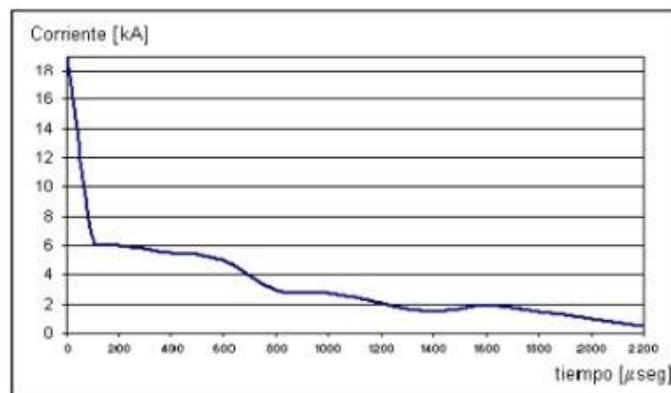


Figura 9. Primer impulso de una descarga atmosférica. Fuente: (Castillo Herrera, 2014).



Figura 10. Descarga atmosférica dentro de una misma nube. Fuente: Google imágenes.



Figura 11. Descarga atmosférica de una nube hacia otra. Fuente: Google imágenes.



Figura 12. Descarga atmosférica de la nube hacia tierra. Fuente: Google imágenes.

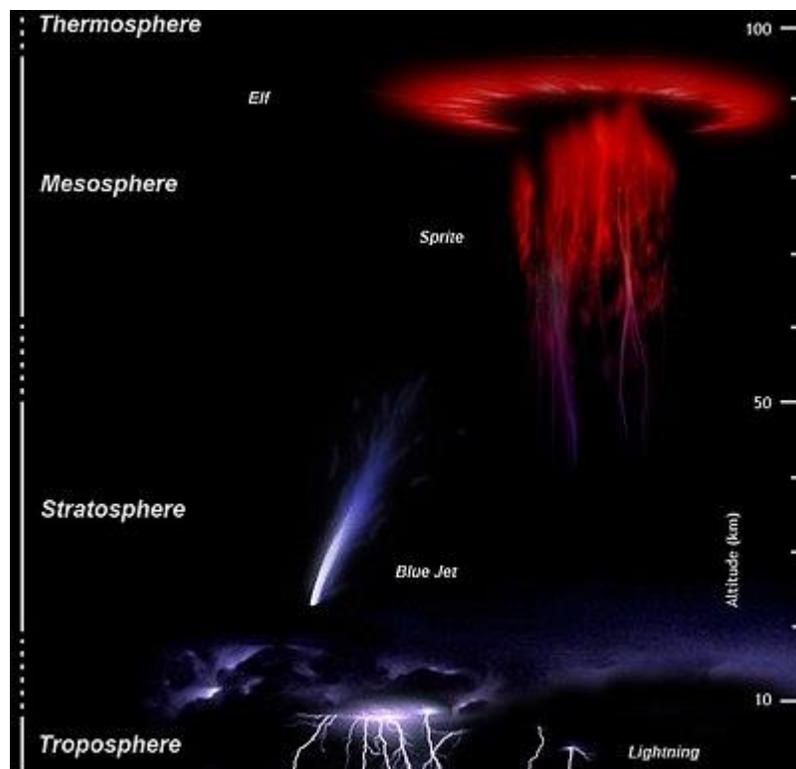


Figura 13. Descarga atmosférica hacia la ionosfera. Fuente: Wikipedia.



Figura 14. Descarga atmosférica de la nube hacia el aire. Fuente: Google imágenes.



Figura 15. Ubicación del nuevo estadio de béisbol Denis Martínez. Fuente: Google Maps.

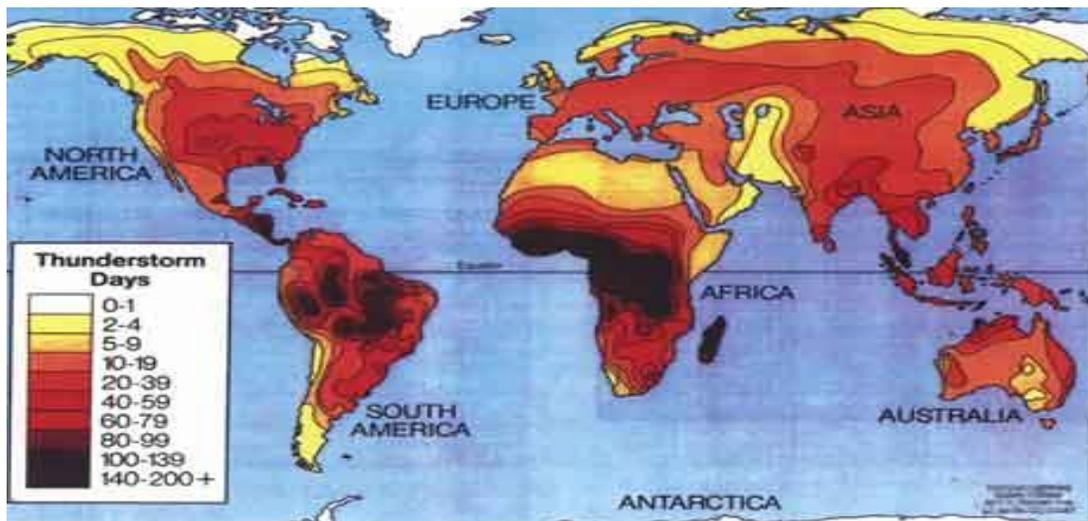


Figura 16. Densidad de descargas atmosféricas. Fuente: National Lightning Safety Institute.

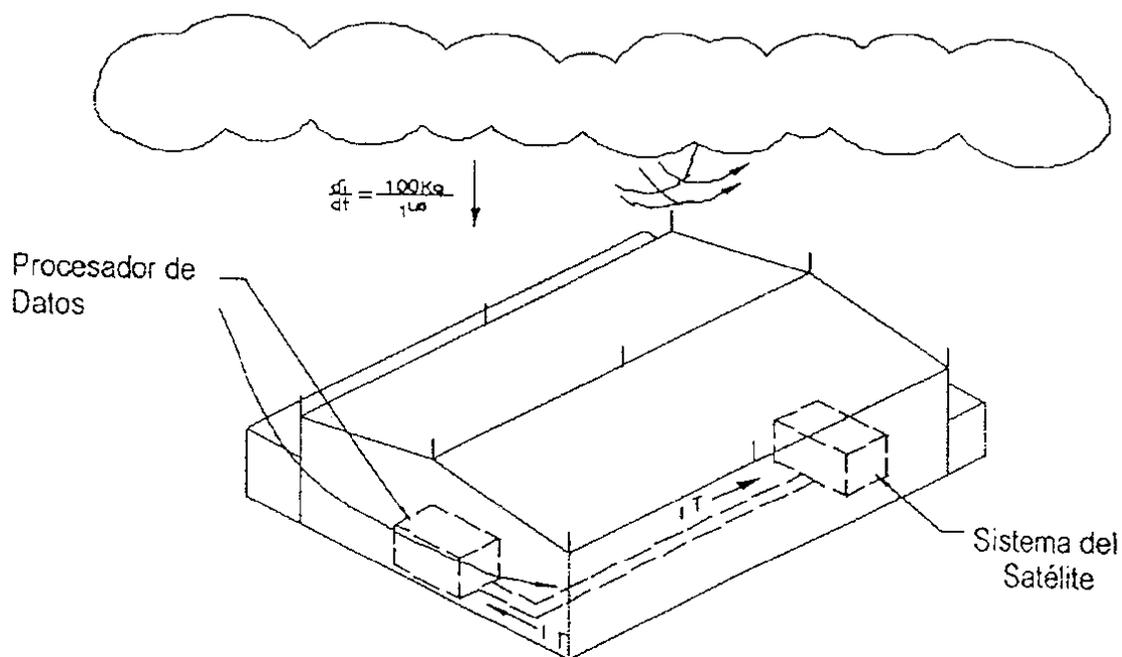


Figura 17. Canal de descarga del rayo cuyo voltaje inducido resultante es muy significativo. Fuente: Disipadores de Rayos LEC.

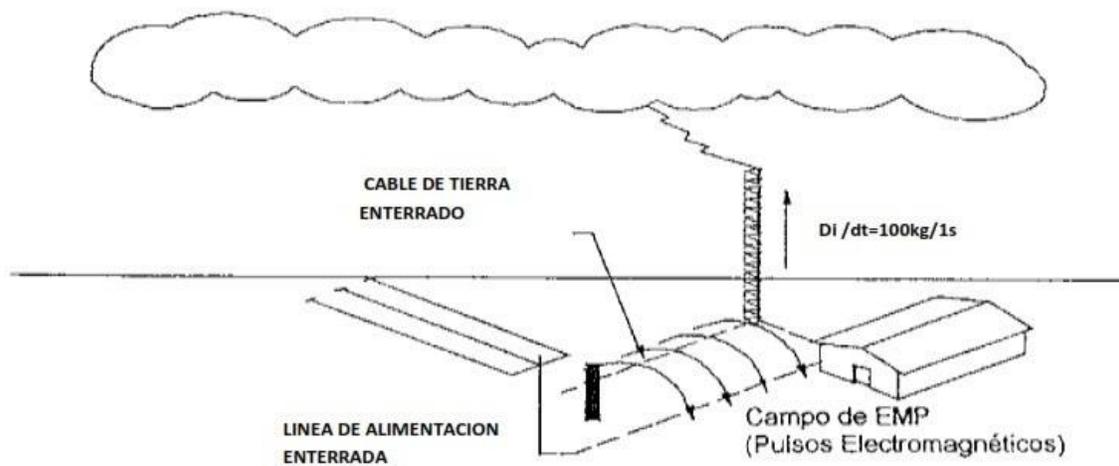


Figura 18. Pulso electromagnético que afecta a conductores soterrados. Fuente: (Ángeles Sánchez & Mora Galicia, 2010)

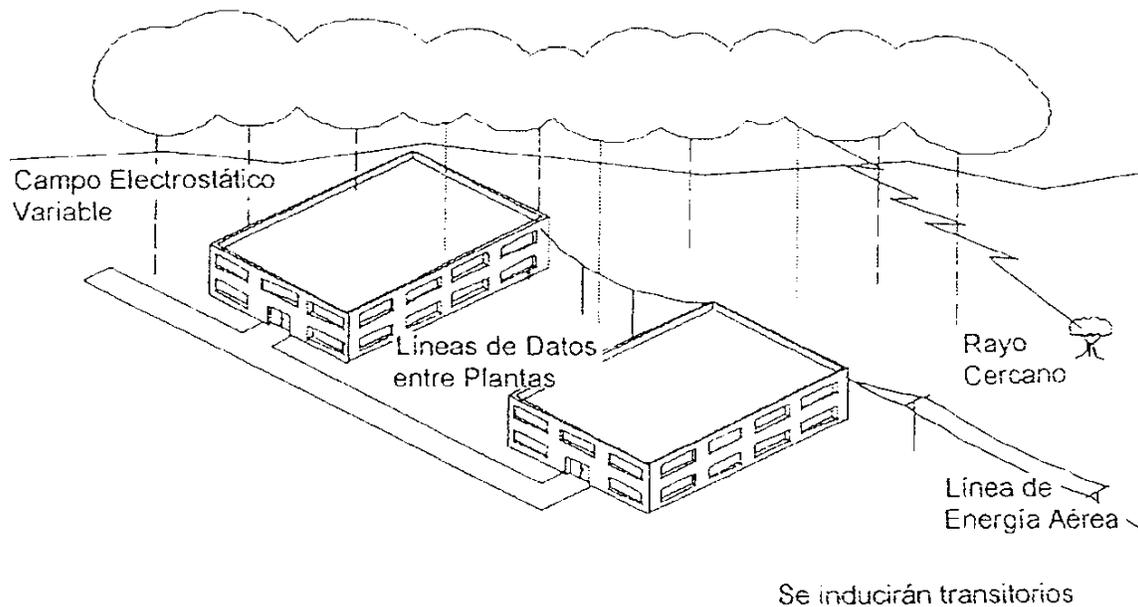


Figura 19. Pulsos electrostáticos por una descarga rayo-tierra. Fuente: disipadoresderayoslec.blogspot.com.

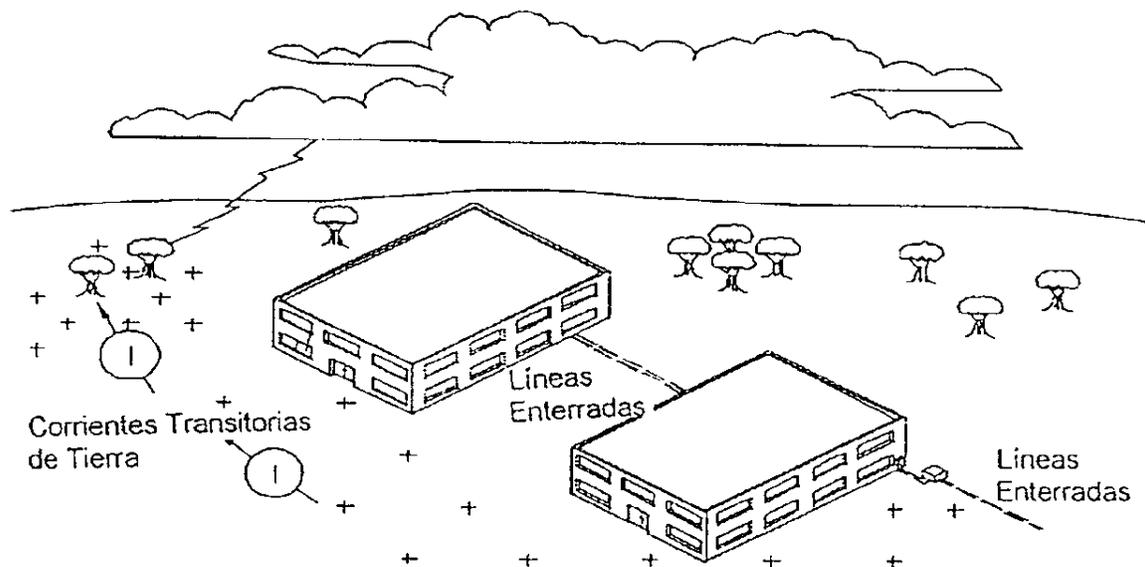


Figura 20. Corrientes Transitorias de tierra. Fuente: disipadoresderayoslec.blogspot.com.

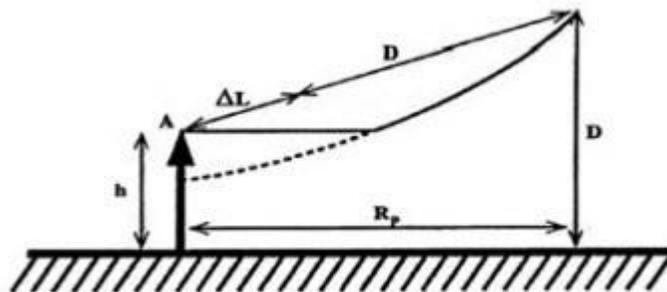


Figura 21. Radio de protección. Fuente: (NFC 17-102, 1995).

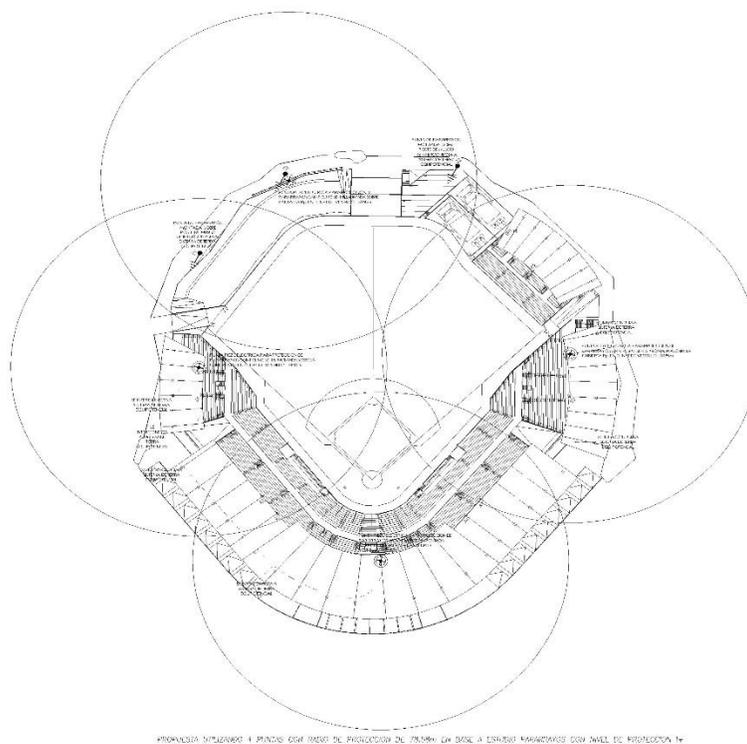


Figura 22. Zonas de protección de cada uno de los 4 pararrayos. Fuente: Fuente propia.

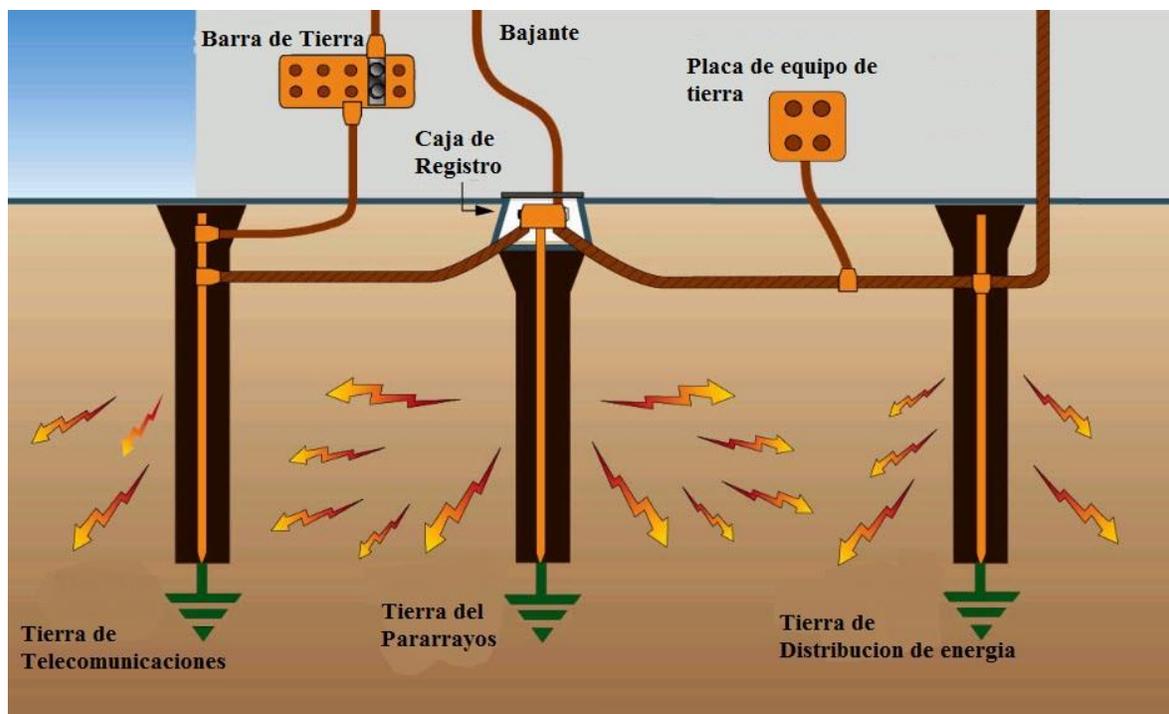


Figura 23. Demostración de interconexión de sistemas de tierra dentro de una edificación que garantice la equipotencialidad. Fuente: NMX-J-549 ANCE.

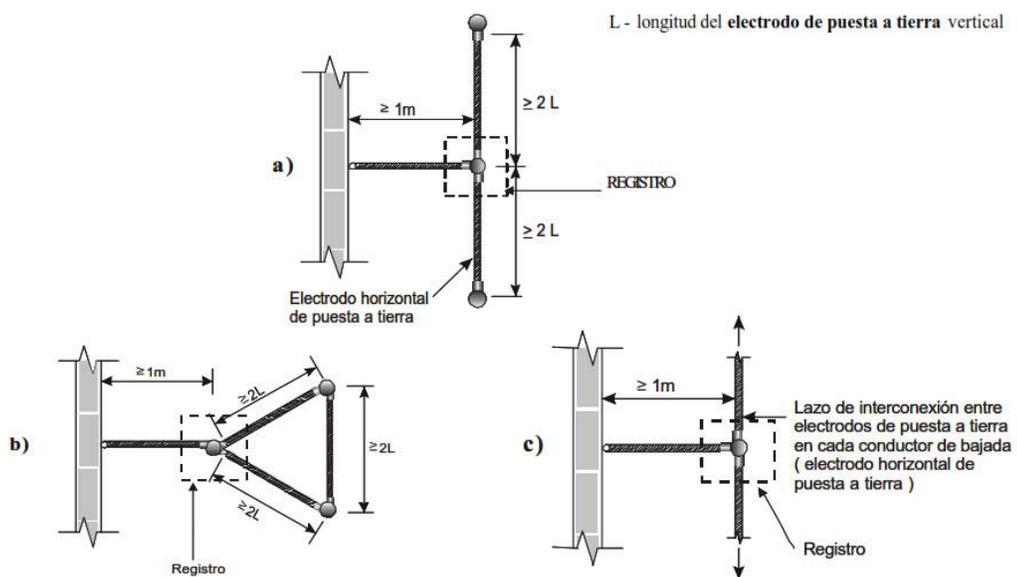


Figura 24. Vista de los arreglos típicos para formar el electrodo de puesta a tierra que conecta a cada conductor de bajada. Fuente: (Maldonado Salas & Téllez Garrido, 2009).

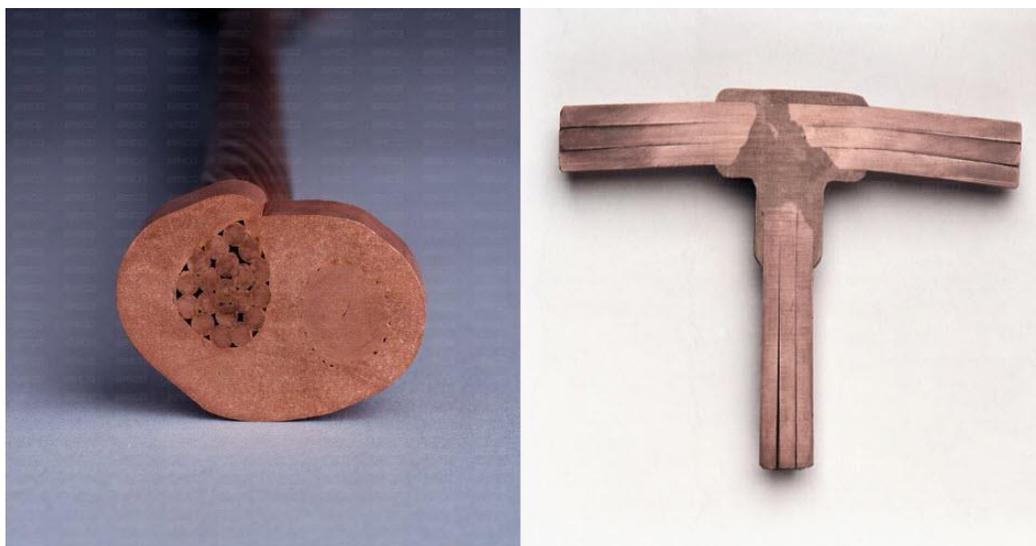


Figura 25. Soldadura exotérmica utilizada para la conexión de los conductores de bajada y electrodos de puesta a tierra. Fuente: NMX-ANCE-2005.



Figura 26. Los cimientos de edificios o estructuras pueden utilizarse como electrodos de puesta a tierra. Fuente: NMX-549-ANCE-2005.

Geometría de la Malla de puesta a tierra

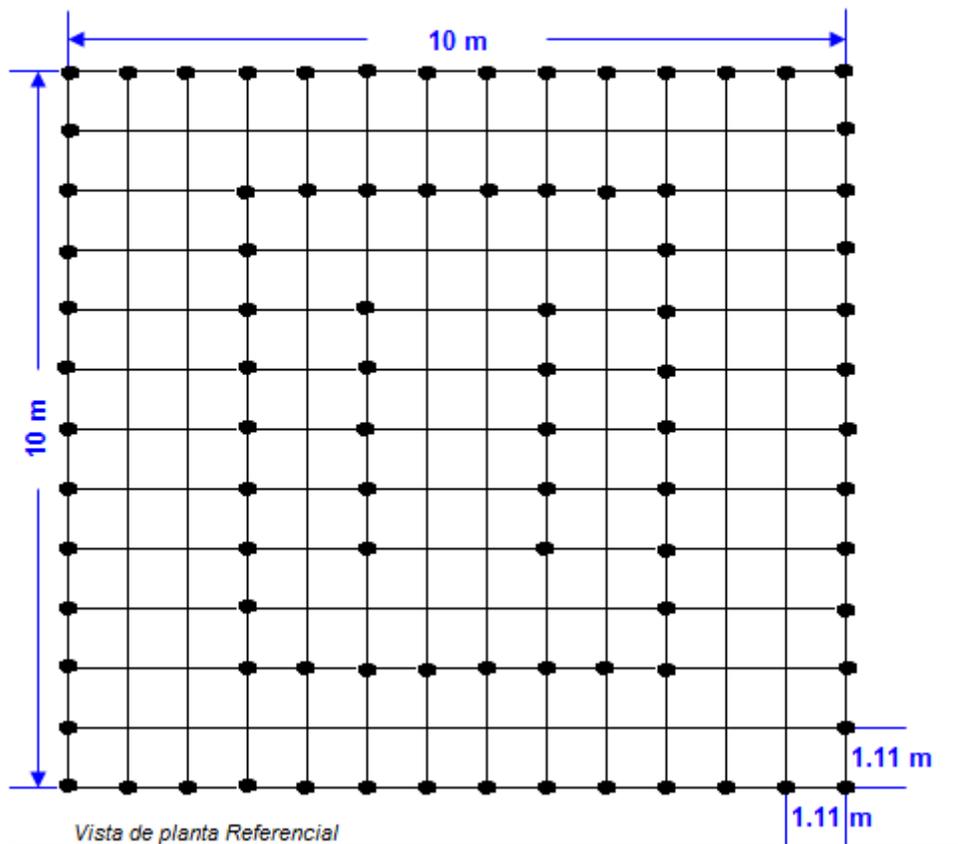


Figura 27. Representación gráfica de disposición geométrica de la malla para el diseño. Fuente: (IEEE 80-2000, 2000) .

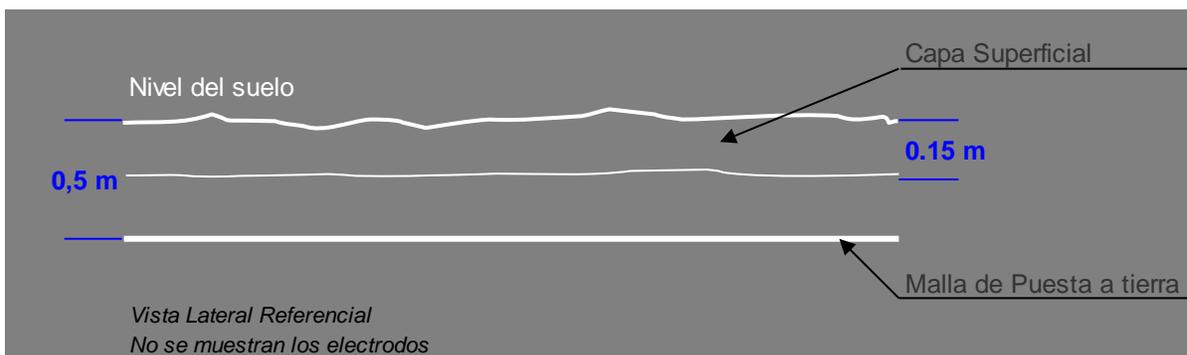


Figura 28. Vista lateral de niveles de profundidad a tomar en cuenta para la instalación del sistema de puesta a tierra. Fuente: (Poveda, Marlon).

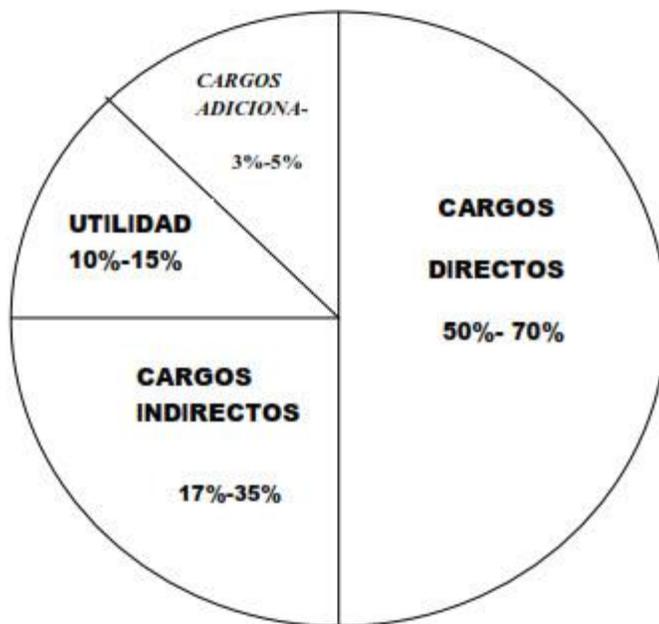


Figura 29. Cargos que se integran en el precio unitario con sus porcentajes aproximados. Fuente: (Ángeles Sánchez & Mora Galicia, 2010).

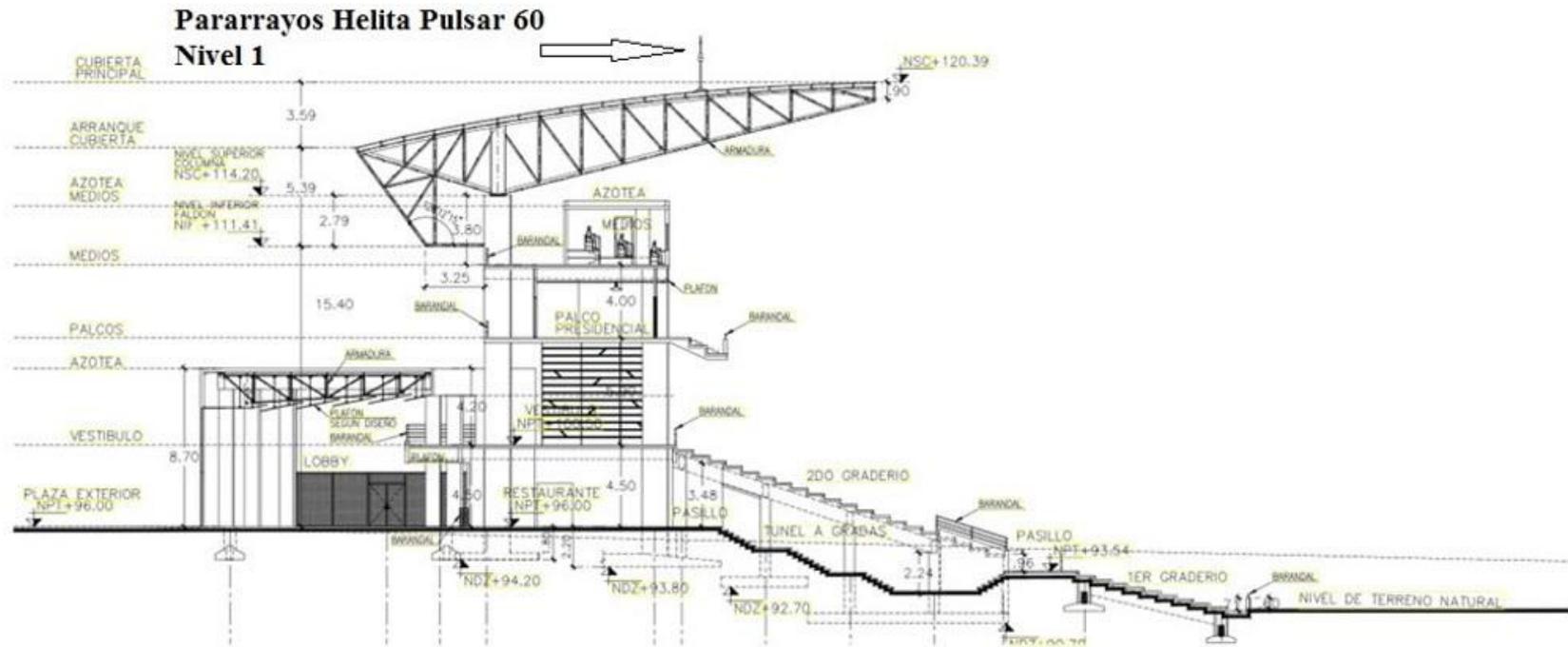


Figura 30. Perfil de vista de ubicación de pararrayos situado sobre cubierta de techo detrás de home plate. Fuente: Fuente propia.

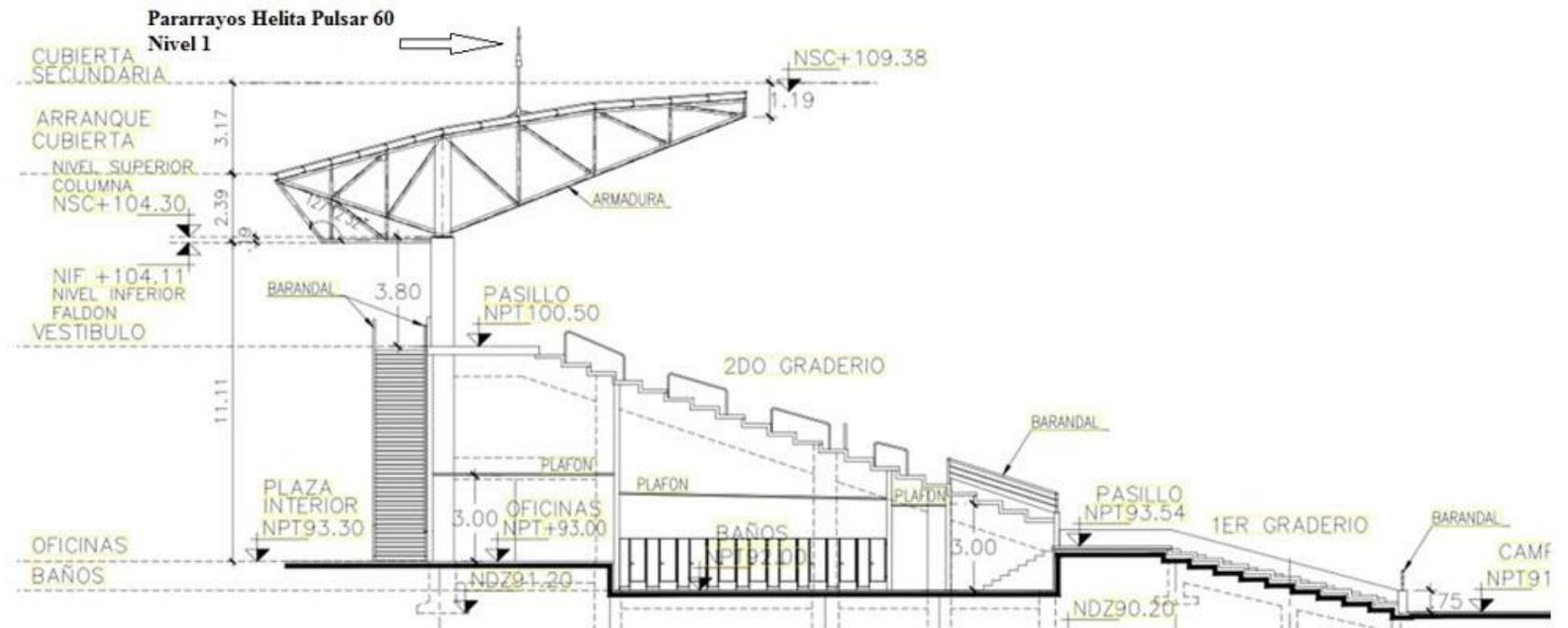


Figura 31. Perfil de vista de ubicación de pararrayos situado sobre cubierta de techo contiguo a right field. Fuente: Fuente propia.

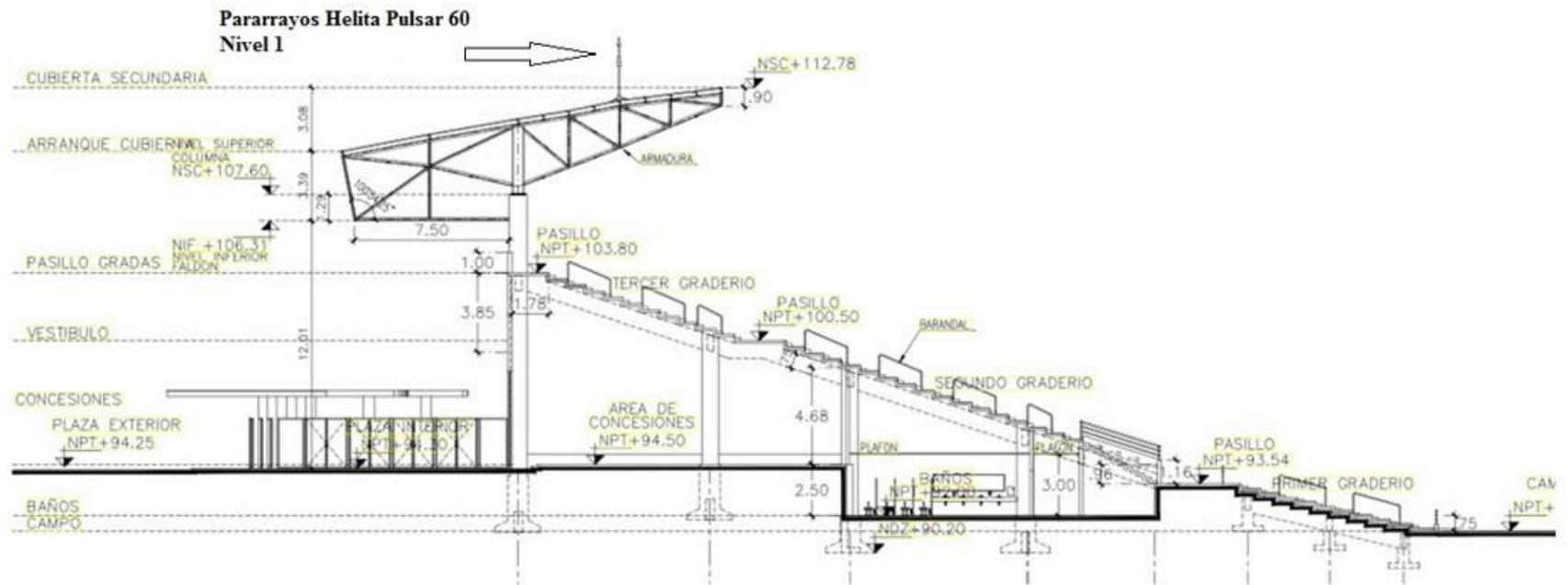


Figura 32. Perfil de vista de ubicación de pararrayos situado sobre cubierta de techo contiguo a left field. Fuente: Fuente propia.



Figura 33. Ubicación de pararrayos situado sobre cubierta de techo contiguo a left field. Fuente: Fuente propia.



Figura 34. Pararrayos de la marca Helita modelo Pulsar 60. Fuente: Fuente propia.



Figura 35. Conductor de bajada sujetado a la estructura. Fuente: Fuente propia.



Figura 36. Medición de resistencia de suelo para efectuar la instalación del sistema de puesta a tierra.
Fuente: Fuente propia.



Figura 37. Medición de resistencia de suelo. Fuente: Fuente propia.



Figura 38. Ejecución de obra para la instalación del sistema de puesta a tierra del pararrayos. Fuente propia.



Figura 39. Avance del 60% de la instalación del sistema de puesta a tierra. Fuente: Fuente propia.



Figura 40. Instalación de electrodo de tierra. Fuente: Fuente propia.



Figura 41. Instalación de electrodo de tierra. Fuente: Fuente propia.