



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño del sistema de protección
contra descargas atmosféricas de
la estación de medición, regulación
y control de gas natural "City Gate
Nucor"**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Alberto Ricardo Osorio Cruz

ASESOR DE INFORME

Ing. Alberto Cortez Mondragón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	1
2.1 Objetivo general	1
2.2 Objetivos específicos	1
3. Marco teórico	2
3.1 Antecedentes.....	2
3.2 Normatividad.....	5
3.2.1. Normas internacionales	5
3.2.2. Marco normativo en México	6
3.3 Descargas atmosféricas.....	7
3.3.1. Etapas de formación del rayo	7
3.3.2. Clasificación de los rayos de nube a tierra	9
3.3.3. Proceso de descarga del rayo negativo.....	10
3.3.4. Distribuciones probabilísticas de la corriente pico de rayo negativo	10
3.3.5. Distancia de impacto del rayo (r_s).....	12
3.4 Perturbaciones transitorias en baja tensión debido a descargas atmosféricas	13
3.4.1. Acoplamiento y propagación de los transitorios	14
3.4.2. Categorías de exposición y formas de onda estandarizadas IEEE	17
3.5 Valoración de riesgo por impacto directo de rayo a una estructura	19
3.6 Métodos de protección externa contra descargas atmosféricas	23
3.6.1. Método de la esfera rodante	23
3.6.2. Método de la malla (jaula de Faraday).....	26
3.6.3. Método del ángulo de protección	27
3.6.4. Protección mediante terminales con dispositivo de cebado	27
3.7 Sistemas de protección externa contra descargas atmosféricas.....	29
3.7.1. Terminales aéreas	29
3.7.2. Conductores de bajada	30
3.7.3. Puesta a tierra	33
3.8 Sistemas de protección externa contra descargas atmosféricas en áreas peligrosas.....	38
3.9 Sistema de protección interna contra descargas atmosféricas	39
3.9.1. Unión equipotencial.	39
3.9.2. Puesta a tierra al interior del edificio o estructura.....	39

3.9.3. Dispositivos de protección contra transitorios	39
4. Antecedentes del proyecto	43
5. Definición del proyecto	46
5.1 Localización.....	46
5.2 Estructura a proteger: Estación “City Gate Nucor”	46
5.3 Objetivo	47
5.4 Alcance	47
6. Metodología de diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas	50
7. Participación profesional.....	51
8. Diseño del Proyecto (resultados obtenidos).....	51
8.1 Especificaciones del sistema de protección contra descargas atmosféricas	51
8.1.1. Objetivo.....	51
8.1.2. Normas y estándares aplicables.....	52
8.1.3. Descripción del sistema de protección	52
8.1.4. Clasificación de edificios, estructuras y materiales de acuerdo al estándar NFPA-780 52	
8.1.5. Consideraciones de diseño del sistema de protección.....	52
8.1.6. Materiales	54
8.1.7. Dispositivos de Protección contra transitorios (SPDs)	55
8.2 Memoria técnica del sistema de protección contra descargas atmosféricas	56
8.2.1. Objetivo.....	56
8.2.2. Métodos de cálculo y ecuaciones	56
8.2.3. Cálculos y resultados.....	59
9. Conclusiones	67
10. Bibliografía.....	68
Apéndice A. Frecuencia media anual permitida de rayos directos sobre estructuras comunes y niveles de protección recomendados.....	69
Apéndice B. Electrodo de puesta a tierra, arreglos típicos y cálculo de resistencia a tierra.....	70
Apéndice C. Evaluación de riesgos por impacto de rayo.....	72
Apéndice D. Estudio de resistividad del terreno	73
Apéndice E. Sistema general de puesta a tierra	74
Apéndice F. Sistema externo contra descargas atmosféricas (Hoja 1)	75
Apéndice G. Sistema externo contra descargas atmosféricas (Hoja 2).....	76
Apéndice H. Diagrama unifilar	77

1. Introducción

Las descargas cercanas o directas por corriente de rayo a una instalación o estructura afectarán de forma directa o indirecta al sistema eléctrico, provocando daños o fallos. En el ámbito industrial, las pérdidas por impacto directo se pueden presentar en las siguientes afectaciones: Paradas de producción o de servicios, daño a equipos de instrumentación, de control y de telecomunicaciones, accidentes laborales de los trabajadores, incendios, etc.

Aunque las descargas atmosféricas son fenómenos aleatorios cuya formación es imposible de evitar, es posible reducir en gran medida el riesgo de daño a la instalación con un correcto diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas, el cual comprende y analiza el uso de elementos para captar, conducir y disipar la corriente de rayo, además de implementar uniones equipotenciales, blindaje electromagnético, puesta a tierra y protección contra transitorios.

La instalación en estudio es la “City Gate Nurcor”, la cual suministra gas natural a la planta Nucor-JFE, localizada en el estado de Guanajuato. En este lugar se puede presentar la incidencia de descargas eléctricas, así que será necesario el diseño e implementación del sistema de pararrayos para poder preservar la seguridad del personal, así como, la integridad del equipo eléctrico dentro de la instalación para poder operar de manera continua y así garantizar la distribución de gas natural al usuario Nucor-JFE.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar el sistema de protección integral contra descargas atmosféricas de la “City Gate Nucor” en base al marco normativo vigente.

2.2 Objetivos específicos

- Generar la memoria de cálculo del sistema de protección contra descargas atmosféricas de acuerdo a los códigos, estándares y normas vigentes.
- Generar los planos de ingeniería del sistema de protección contra descargas atmosféricas los cuales deberán contar mínimo con: Detalles de instalación y/o constructivos, notas de los detalles constructivos y lista de materiales.

3. Marco teórico

3.1 Antecedentes

La comprensión de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas requiere una reseña histórica, ya que los mismos se han ido desarrollando conforme al surgimiento de nuevas investigaciones científicas.

Benjamín Franklin en 1752 llevó a cabo su experimento del cometa, el cual demostró que las nubes están cargadas eléctricamente y que el rayo es una descarga del tipo electrostático, como consecuencia inventó el primer pararrayos e implementó el primer sistema de protección en casas, graneros e iglesias; el sistema consistió en una punta delgada de latón montada a una varilla metálica enterrada en el suelo cuya longitud sobrepasaba los dos metros la parte más alta del edificio. Franklin originalmente pensó que el pararrayos descargaría silenciosamente una nube de tormenta y, por lo tanto, evitaría la iniciación del rayo, sin embargo, más tarde se dio cuenta que si no podía evitar la ocurrencia de un rayo entonces los pararrayos ofrecerían un punto de conexión preferido para el rayo y luego un camino seguro para disipar la corriente de rayo en la tierra. Es de esta última manera que los pararrayos, a menudo denominados pararrayos Franklin, realmente funcionan.

En 1775, el físico alemán Lichtenberg propuso impedir la caída de rayos sobre una casa colocando alambre de púas como hilo de guarda. La experiencia fue mostrando que la eficacia de la protección residía en el funcionamiento de la punta del pararrayo como punto preferencial de impacto desde donde se podía conducir la corriente a tierra en forma controlada. Los esfuerzos entonces se concentraron en la determinación de las áreas de protección de las puntas Franklin, tarea en la cual participaron conocidos físicos del siglo XIX como Gay-Lussac, Oliver J. Lodge y William H. Preece quienes plantearon las bases del método del ángulo de protección.

En 1838, James Clerk Maxwell sugirió que los sistemas de varillas Franklin atraían más rayos que el área circundante. Propuso que un edificio de pólvora se cerrara completamente con metal de suficiente espesor, formando lo que ahora se conoce como una jaula de Faraday. Si un rayo cayera sobre un edificio cerrado con metal, la corriente se limitaría al exterior del recinto metálico y ni siquiera sería necesario conectarlo a tierra. En el último caso, el rayo simplemente produciría un arco desde el recinto a tierra; el efecto de jaula de Faraday lo proporcionan los coches y aviones totalmente metálicos. Los edificios modernos con estructura de acero con barras de refuerzo de metal en los cimientos de hormigón conectados al acero del edificio proporcionan una buena aproximación a una jaula de Faraday, sin embargo, a medida que aumenta el espacio entre conductores, disminuye la

eficacia de la protección contra rayos. En la práctica, a menudo se utilizan los sistemas convencionales de protección los cuales consisten en una combinación de las puntas Franklin y el concepto de jaula de Faraday.

Otro de los esfuerzos por mejorar el sistema de protección fue realizado por el físico húngaro Szillard (1914) quien planteó la posibilidad de aumentar la zona de captura de un pararrayos agregando cerca de su punta una fuente radiactiva, normalmente radio o americio. Debido al peligro potencial que implica una sustancia radioactiva, el uso de pararrayos radioactivos está prohibido, la prohibición (1985) estimuló que en Francia se desarrollaran dispositivos para aumentar el área de captura de las descargas atmosféricas, estos dispositivos se les conoce como dispositivos ESE (Early Streamer Emission), o bien, en español PDCs (Pararrayos con Dispositivo de Cebado).

En 1918, Nikola Tesla afirmó que la carga liberada por muchas puntas era insignificante comparada con la carga inducida en el terreno por la tormenta eléctrica y que las puntas Franklin provocaban una ionización que favorecía la formación del rayo, propuso prevenir la formación del rayo con una de sus patentes, la cual consistía en un dispositivo en forma de sombrilla, que por su forma no intensificaba el campo en sus proximidades y por lo tanto hacía más difícil la ionización previa a la formación de una guía ascendente¹. Una estructura cubierta por esas sombrillas no presentaría ante el rayo puntos para la formación preferencial de la guía ascendente ya que los bordes y puntas estarían cubiertos, y por lo tanto disminuiría la probabilidad de su formación. En caso de formarse el rayo el dispositivo funcionaría como una protección convencional. Actualmente los sistemas destinados a prevenir la formación de rayos se les conoce como Sistemas de Transferencia de Carga (CTS – Charge Transfer Systems) o Sistemas Disipativos (DAS - Dissipative Array Systems) y se ha demostrado que estos sistemas no son capaces ni de evitar los rayos ni de desviarlos, sin embargo, un sistema CTS completo con sus terminales aéreas, conductores de bajadas, puesta a tierra y protecciones complementarias pueden constituir un sistema de protección convencional pero a un costo mucho más alto.

Fue a partir del siglo XX que las investigaciones se enfocaron en comprender el origen, características y variaciones del fenómeno del rayo. El físico inglés Wilson (1920), con base en una serie de mediciones formuló la hipótesis del “Circuito eléctrico global”, ésta plantea que la atmósfera terrestre constituye un aislador eléctrico de muy buena calidad y que dentro de la atmósfera se encuentran dos muy buenos conductores: la superficie de la tierra en la parte inferior y la ionosfera en

¹ Guía ascendente o líder ascendente: Canal ionizado a través del cual se realiza el movimiento de carga eléctrica.

la superior, además planteó que las descargas atmosféricas son generadores de tensión las cuales mantenían una diferencia de potencial entre la tierra y la ionosfera.

El físico inglés Whipple (1929), uno de los discípulos de Wilson, planteó el siguiente corolario: “Existe una diferencia de potencial debida a los rayos, pero no está uniformemente distribuida alrededor del globo terráqueo, sino que está concentrada en tres zonas de convección profunda tropical: Suramérica Tropical, Centro de África y el continente marítimo (Sureste Asiático y parte de Australia). La mayor actividad de rayos se presenta en la zona continental y no en la zona marítima”. Lo anterior se logró comprobar hasta la llegada de las mediciones por satélite.

Con base en los principios de Wilson y Whipple, se hicieron las primeras estimaciones del nivel ceraúnico² en diferentes regiones del mundo, este dato se utilizaría para determinar la densidad de rayos a tierra.

El investigador K. Berger (1975), publicó los resultados de mediciones de diversas amplitudes de la corriente de rayo, el conjunto de datos obtenido por Berger fue digitalizado y analizado nuevamente por Anderson & Eriksson (1980). El estudio sirvió para determinar y normalizar los parámetros del rayo, con énfasis particular en aquellos parámetros requeridos para aplicaciones en ingeniería.

En México en el año de 1977, las descargas atmosféricas se convirtieron en la razón de la salida de operación de las líneas de transmisión de energía eléctrica. La información con que se contaba en ese momento no era suficiente para determinar la mejor manera de abatir las fallas ocasionadas por el fenómeno del rayo.

Con el objetivo de determinar la mejor metodología de protección para las líneas de transmisión, Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó uno de los estudios más importantes a través del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). El estudio consistió en determinar la densidad de rayos a tierra y sus características estadísticas durante todo un ciclo solar³ (de 1983 a 1993). El resultado fue el mapa de isodensidades de rayos a tierra de la República Mexicana. En la práctica la densidad de rayos a tierra es utilizado para determinar la frecuencia anual promedio de impactos directos por rayo a una estructura, datos que sirven para dimensionar los sistemas de protección contra descargas atmosféricas.

² Nivel ceraúnico: Se define como el número de días tormentosos al año, un día tormentoso es aquel en el que por lo menos se escucha un trueno.

³ Ciclo solar: La duración de un ciclo solar es de aproximadamente 11 años, cuando se cumple un ciclo solar se dice que un fenómeno meteorológico puede repetirse con una alta probabilidad.

Hoy en día, los sistemas externos de protección contra descargas atmosféricas están divididos en dos categorías: Sistemas convencionales y no convencionales. Los sistemas convencionales utilizan puntas franklin y el concepto de Faraday cuyo rendimiento ha sido validado durante muchas décadas y por prácticamente todas las normas y estándares actuales. Por otro lado, los pararrayos con dispositivo de cebado y los sistemas de transferencia de carga pertenecen a la categoría de sistemas de protección no convencionales, desafortunadamente el rendimiento de estos sistemas se sigue validando.

Finalmente, los esquemas modernos de protección contra descargas atmosféricas buscan proteger a los sistemas eléctricos y electrónicos sensibles a los efectos electromagnéticos que produce la corriente de rayo, a través de técnicas de blindaje basados en dispositivos de protección contra transitorios, unión equipotencial y el sistema de puesta a tierra.

3.2 Normatividad.

3.2.1. Normas internacionales

A nivel internacional, las recomendaciones para la protección contra descargas atmosféricas se encuentran en las normas IEC 62305, éstas son emitidas por el organismo europeo IEC (International Electrotechnical Commission). Para la mayoría de los países, la adopción de estas normas es voluntaria y, a menudo, el contenido seleccionado de la norma se absorbe e introduce como mejoras a la propia norma del país (como es el caso de México). Las normas IEC 62305. Protección contra rayos consta de 4 partes:

- IEC 62305-1. Principios generales.
- IEC 62305-2. Gestión de riesgos.
- IEC 62305-3. Protección de estructuras y de personas.
- IEC 62305-4. Sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras.

Otras normas de referencia son las usadas en Estados Unidos:

- NFPA 780. Estándar para instalación de sistemas de protección contra rayos.
- UL 96. Componentes de protección contra rayos.
- UL 96A. Requisitos de instalación de sistemas de protección contra rayos.
- UL 1449. Estándar de Seguridad – Dispositivos de protección contra transitorios

Las principales normas que regulan a los pararrayos con dispositivo de cebado, son:

- NF C 17-102. Sistemas de protección contra rayos mediante dispositivos de cebado.
- UNE 21186. Protección contra el rayo: Pararrayos con dispositivo de cebado.

3.2.2. Marco normativo en México

Las Normas Oficiales Mexicanas son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por dependencias competentes de acuerdo a las finalidades expresadas en el artículo 40 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN). La LFMN menciona distintos tipos de normas entre las que encontramos las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), las Normas Mexicanas (NMX) y las Normas de referencia (NRF). Sólo las normas NOM son de uso obligatorio en su alcance. Las normas NMX son de aplicación voluntaria, salvo en los casos en que los particulares manifiesten que sus productos, procesos o servicios son conformes con las mismas. Las normas de referencia son elaboradas por entidades de la administración pública (CFE, PEMEX, etc.), para aplicarlas a los bienes o servicios que adquieren, arrienden o contratan cuando las normas mexicanas o internacionales no cubran los requerimientos de las mismas o sus especificaciones resulten obsoletas o inaplicables.

En tema de protección contra descargas atmosféricas, México cuenta con:

- NOM-022-STPS-2015. Electricidad estática en los centros de trabajo. Condiciones de seguridad.
- NMX-J-549-ANCE-2005. Sistema de protección contra tormentas eléctricas. Especificaciones, materiales y métodos de medición.
- NMX-J-603-ANCE-2008. Guía de aplicación del sistema de protección contra descargas atmosféricas.
- NRF-070-PEMEX-2011. Sistema de protección a tierra para instalaciones petroleras.

La NOM-022-STPS-2015 tiene como objetivo establecer las condiciones de seguridad en los centros de trabajo para prevenir los riesgos por electricidad estática, así como por descargas eléctricas atmosféricas. En su apartado 8 establece que el diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas puede ser conforme a la Norma Mexicana NMX-J-549-ANCE-2005, o las normas que la sustituyan, además indica que el sistema externo de protección contra descargas eléctricas atmosféricas, puede llevarse a cabo con terminales aéreas convencionales o terminales aéreas de tecnologías alternativas.

La NMX-J-549-ANCE-2005, es una norma de diseño para sistemas convencionales de protección contra tormentas eléctricas, en ella se indican especificaciones, materiales y métodos de medición. Esta norma establece que un Sistema de Protección contra Tormentas eléctricas (SPTE), está compuesto por un SEPTE y un SIPTE. El SEPTE o Sistema Externo de Protección contra Tormentas Eléctricas está formado por elementos para captar, conducir y disipar la corriente de rayo,

mientras que el SIPTE o Sistema Interno de Protección contra Tormentas Eléctricas se basa en uniones equipotenciales, blindaje electromagnético, puesta a tierra y protección contra transitorios.

La NMX-J-603-ANCE-2008, es una guía para la evaluación de la conformidad del proyecto eléctrico, es decir, es una guía que especifica el proceso a seguir para verificar el cumplimiento del diseño e instalación del sistema de protección contra tormentas eléctricas de las estructuras o instalaciones conforme a la norma mexicana NMX-J-549-ANCE-2005.

La NRF-070-PEMEX-2011, es una norma que establece los requisitos mínimos y las características técnicas del sistema de puesta a tierra y pararrayos de instalaciones petroleras.

Es importante mencionar que la NOM-001-SEDE-2012 Instalaciones eléctricas (utilización), no está relacionada directamente con el diseño de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas, pero contiene un tema en particular que suele ser el centro de convergencia de las instalaciones eléctricas, y es el sistema de puesta a tierra (Artículo 250).

Nota: El primero de julio del año 2020 se expidió la Ley de Infraestructura de la Calidad (LIC) la cual aboga a la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN), no se hace referencia a esta nueva ley ya que tanto las normas NOM, NMX y NRF mencionadas anteriormente fueron expedidas bajo los lineamientos de la LFMN.

3.3 Descargas atmosféricas

El rayo es un fenómeno físico que se caracteriza por la transferencia de carga eléctrica de una nube a tierra, de tierra a nube, entre dos nubes, al interior de una nube o de la nube hacia la ionosfera, mientras que un relámpago es la energía visible, y el trueno es la energía audible producida por la descarga del rayo.

3.3.1. Etapas de formación del rayo

Etapas uno: El sol calienta la superficie de la Tierra durante el día, el calor de la superficie calienta el aire cercano, el aire caliente se eleva hasta formar una corriente ascendente. Si el aire es húmedo, entonces el aire caliente se condensa en una nube cúmulus, la nube cúmulus continuará creciendo mientras haya aire cálido ascendiendo. (Fig. 1A).

Etapas dos: Las turbulentas corrientes de aire ascendentes y descendentes, separan las gotas de agua. Debido a las bajas temperaturas que se dan en esas altitudes, las gotas se transforman en cristales de hielo, los cuales colisionan con otras gotas de agua, provocando una disociación de iones, liberación de electrones y una ionización del ambiente (Fig. 1B).

Etapa tres: La nube se polariza en diferentes regiones, las cargas de signo contrario se separan. Las cargas positivas formadas por cristales de hielo se sitúan en la parte superior de la nube, mientras que las negativas lo hacen en la inferior, sin embargo, una pequeña cantidad de cargas positivas permanece en la base de la nube. Los rayos al interior de la nube ocurren al tratar de neutralizar la carga entre dos regiones de polaridad opuesta, los relámpagos comienzan a aparecer (Fig. 1C).

En esta etapa, la nube cúmulos se ha convertido en una nube cumulonimbus (nubes de tormenta). La influencia que la nube de tormenta tiene sobre la tierra, es tal que atrae a partículas de polaridad opuesta y repele las de la misma polaridad exactamente en la zona de influencia por debajo de la nube. Lo anterior polariza positiva o negativamente a cualquier elemento conductor que está sobre la tierra y en contacto con ella, incluso a las personas, elevando la probabilidad de que ésta pueda convertirse en un elemento competitivo para atraer y captar el sucesivo rayo.

Etapa cuatro: Una parte de los rayos que se producen al interior de la nube buscarán descargarse a tierra. La polaridad de los rayos de nube a tierra puede ser negativa o positiva, todo depende de la polaridad de la región de la nube que se está descargando a tierra. Posteriormente, se produce las primeras lluvias (Fig. 1D).

Etapa cinco: La actividad de la nube disminuye mientras que los rayos a tierra aumentan normalmente acompañados de fuertes precipitaciones, granizo y fuertes ráfagas de viento. En esta etapa, se vacían centenares de miles de toneladas de agua que contenía la nube (Fig. 1E)

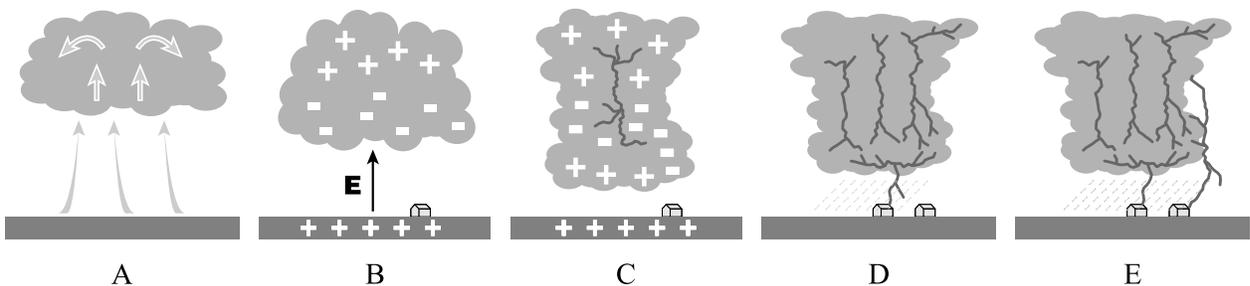


Figura 1: Etapas de formación del rayo.

Nota. Adaptado de Protección contra sobretensiones transitorias, Schneider Eléctric, 2010.

3.3.2. Clasificación de los rayos de nube a tierra

K. Berger, clasifica a los rayos según el sentido de su desplazamiento y la polaridad de la nube que se descarga.

Según el sentido de desplazamiento:

- Rayo descendente: El rayo se dirige de la nube al suelo. Este tipo de rayo es muy frecuente en climas cálidos y donde el terreno es muy llano.
- Rayo ascendente: El rayo se dirige desde el suelo hasta la nube. Este tipo de rayo, es mucho más destructivo que el anterior, se crea, especialmente, en lugares montañosos o donde existen prominencias importantes u objetos metálicos situados a gran altura puestos a tierra.

Según la polaridad de la nube:

- Rayo negativo: La nube está cargada negativamente y la tierra positivamente. Los rayos negativos son muy frecuentes en lugares en los que el terreno es llano y el clima templado.
- Rayo positivo: La nube está cargada positivamente y la tierra negativamente, estos rayos son muy extraños y peligrosos.

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

1. Rayo negativo descendente (Fig. 2A).
2. Rayo positivo descendente (Fig. 2B).
3. Rayo negativo ascendente (Fig. 2C).
4. Rayo positivo ascendente (Fig. 2D).

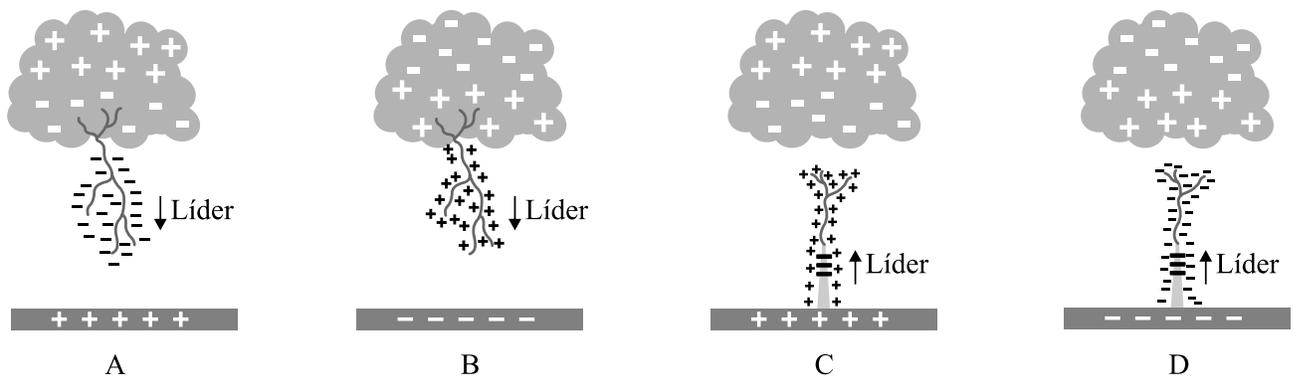


Figura 2: Clasificación de los rayos.

Nota. Cerca del 90% de los rayos de nube a tierra son negativos, de éstos el 95 % suponen los rayos negativos descendentes. Los rayos menos comunes (cerca del 1%) pero más peligrosos, son los rayos positivos ascendentes. La probabilidad de que cada evento suceda depende de la ubicación y situación geográfica. Adaptado de Lightning protection guide, Dehn + Söhne, 2015.

3.3.3. Proceso de descarga del rayo negativo

Las descargas negativas de nube a tierra se realizan mediante un canal conductor de aire ionizado. Conforme el líder escalonado (stepped leader) desciende, el campo eléctrico entre la punta y el suelo aumenta hasta alcanzar un valor crítico promedio de 500 kV/m, el campo eléctrico provoca al mismo tiempo la formación de un líder o trazador ascendente (upward leader o streamer) de polaridad opuesta al líder descendente y que hará impacto (first stroke) con la punta del líder descendente (downward leader), haciendo que se establezca un canal conductor entre la nube y tierra. Se produce entonces de 3 a 5 o más descargas parciales, conocidas también como impactos subsiguientes, corrientes o descargas de retorno (return stroke), cada impacto se propaga de la nube a tierra llevando carga negativa, estos pueden ser de corta (menor a 2 ms) o larga duración (mayor a 2 ms), algunas de las posibles secuencias de descarga se muestran en la (Fig. 3).

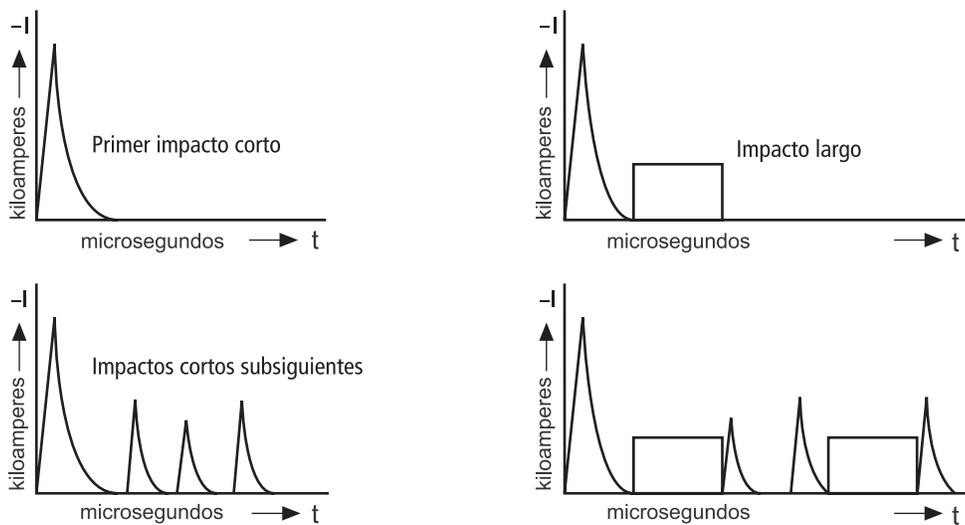


Figura 3: Posibles secuencias de descarga de rayos negativos.

Nota. Adaptado de Protection against lightning. Part 1: General principles, IEC, 2010.

3.3.4. Distribuciones probabilísticas de la corriente pico de rayo negativo

Dada que el rayo es un fenómeno aleatorio, se recurre a distribuciones de probabilidad para determinar los posibles valores de las descargas de retorno. Las distribuciones más usadas por los países de Norte América, Europa y Asia, son: la distribución IEEE⁴ y la distribución CIGRE⁵, en

⁴ IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

⁵ CIGRE: Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas.

ellas se muestra la probabilidad de los primeros impactos del rayo excedan un valor pico de corriente en kiloamperes (Fig. 4). Estas distribuciones se basan en mediciones directas de la corriente de rayo hechas por Berger en los años de 1963 a 1971, en Suiza y reportadas posteriormente en 1975 (Berger, Anderson, & Kroninger).

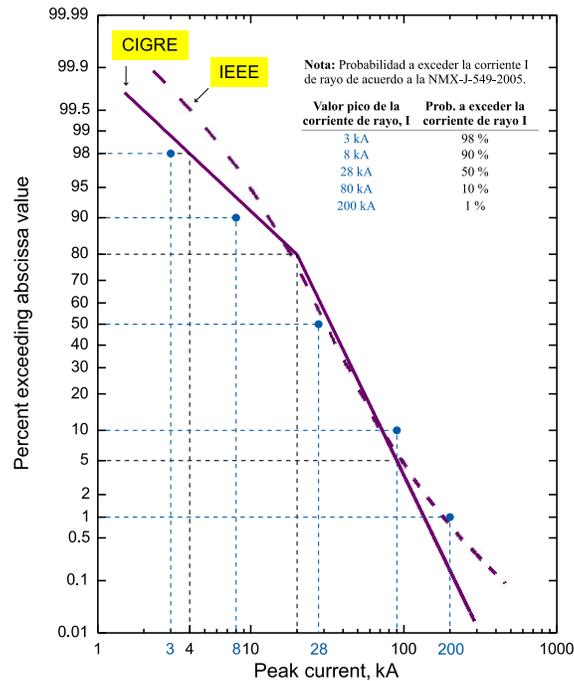


Figura 4: Función de distribución acumulada de corrientes pico para los primeros impactos de rayo negativo adoptada por la IEEE Y CIGRE.
Nota. Adaptado de CIGRE Report 63, 1991.

Para la distribución CIGRE, existe una probabilidad del 98% de que las corrientes pico de las primeras descargas excedan los 4 kA, el 80% exceda los 20 kA, el 50% exceda los 30 kA y el 5% exceda los 90 kA.

Para la distribución IEEE, la “probabilidad a exceder” valores pico de corriente está dada por la Ec. (1):

$$P = \frac{1}{1 + (I/31)^{2.6}} \quad \text{Ec. (1)}$$

En donde:

P: Es la probabilidad de exceso, en por unidad.

I: Corriente pico de las primeras descargas, en kiloamperes [kA].

3.3.5. Distancia de impacto del rayo (r_s)

El concepto de distancia de impacto de un rayo se deriva del “Modelo Electrogeométrico”, el cual es usado para la protección contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión.

La distancia de impacto (striking distance) se define como la distancia entre la punta del líder descendente y el punto de impacto en el momento en que el campo eléctrico medio entre esos dos puntos adquiere el valor crítico (500 kV/m) (Fig. 5).

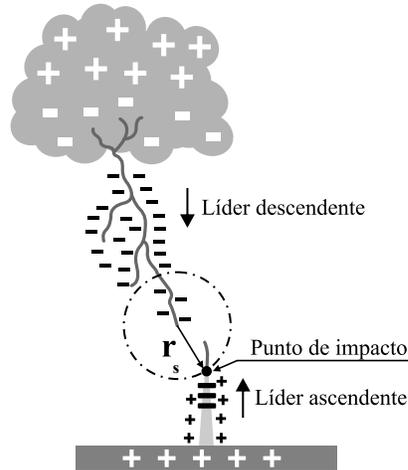


Figura 5: Distancia de impacto (r_s).

Nota. Adaptado de Lightning protection guide, Dehn + Söhne, 2015.

El procedimiento para calcular la distancia de impacto generalmente implica supuestos de geometría del líder, carga total del líder, distribución de carga a lo largo del canal del líder y el campo eléctrico promedio crítico entre la punta del líder y el objeto de impacto. Se han propuesto diversas formas para determinar la relación a partir de estudios teóricos, modelos, observaciones y datos experimentales. La expresión más usada es de la forma:

$$r_s = AI^B \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde r_s es la distancia de impacto, I la corriente pico de la primera descarga de retorno, A y B son constantes obtenidos a través de estudios de arcos eléctricos generados en laboratorio. La distancia de impacto en la Norma Mexicana NMX-J-549-ANCE-2005 se expresa como:

$$r_s = 9.4(I)^{2/3} \quad \text{para } I < 30 \text{ kA} \quad \text{Ec. (3)}$$

En donde:

r_s : Distancia del último paso de la descarga, en metros [m].

I : Es la corriente pico de la corriente de rayo de retorno, en kiloamperes [kA].

3.4 Perturbaciones transitorias en baja tensión debido a descargas atmosféricas

Los transitorios de voltaje y corriente que se producen en las redes eléctricas de Baja Tensión (1 kV o menos) se originan principalmente por dos fuentes: descargas atmosféricas y conmutación en la red eléctrica.

El término “Surge” o “transitorio” se define como un cambio súbito de voltaje o de corriente a diferente frecuencia del sistema con respecto a la condición nominal de voltaje o corriente; se caracteriza por su corta duración, sus variaciones en amplitud, así como sus razones de cambio con respecto al tiempo (dv/dt o di/dt). Un transitorio puede ser del tipo impulsivo o del tipo oscilatorio (Fig. 6), suele presentarse como eventos periódicos o aleatorios en cualquier combinación entre los conductores de fase, neutro y tierra.

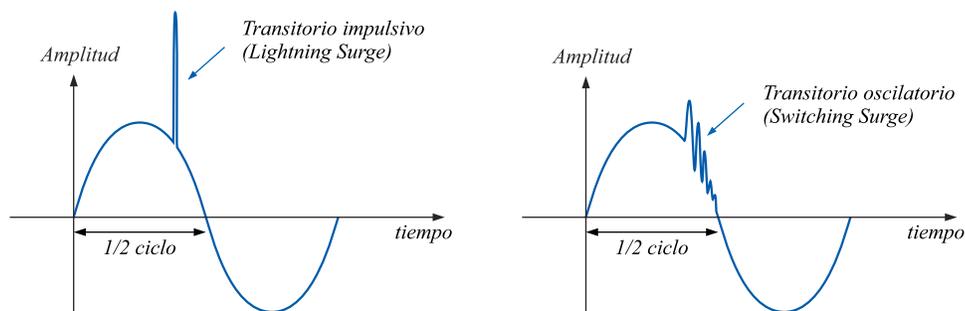


Figura 6: Perturbaciones transitorias en la red eléctrica de baja tensión.

Nota. Adaptado de Protección contra sobretensiones transitorias, Schneider Eléctric, 2010.

Transitorio impulsivo: Es unidireccional en polaridad (principalmente positivo o negativo). Los transitorios impulsivos son caracterizados por su valor pico, tiempo de elevación y duración (nanosegundos-microsegundos). La causa más común de los transitorios impulsivos son las descargas eléctricas atmosféricas.

Transitorio oscilatorio: Incluye valores de polaridad negativos como positivos. Un transitorio oscilatorio consiste de un voltaje o una corriente, cuyo valor instantáneo cambia rápidamente de un valor alto a uno bajo con una oscilación amortiguada, se describe por su duración (microsegundos-milisegundos) y su contenido espectral (frecuencia predominante). El origen de este tipo de transitorios se debe principalmente a:

- Conmutación de cargas inductivas o capacitivas: motores, transformadores o banco de capacitores.
- Operaciones de maniobra: operaciones de cierre, apertura o restablecimiento en la red eléctrica, entrada/salida de operación de sistemas fotovoltaicos, redes inteligentes (Smart Grids), etc.

3.4.1. Acoplamiento y propagación de los transitorios

Escenario 1: La descarga por rayo no involucra directamente a la estructura o edificio. Dos mecanismos de acoplamiento pueden presentarse:

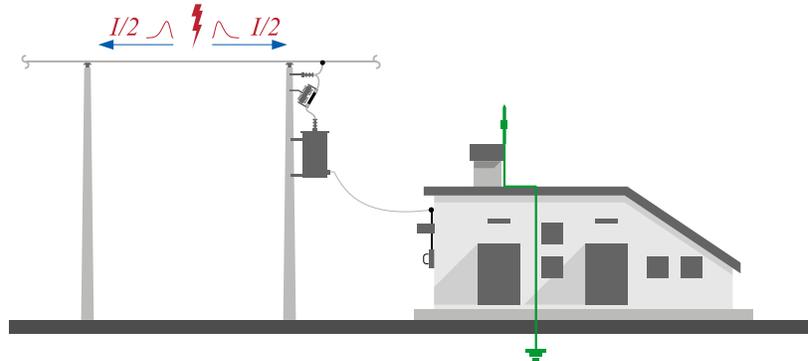


Figura 7: Transitorios conducidos por la línea eléctrica.

Acoplamiento directo (Fig. 7): La caída de un rayo directo sobre una línea de distribución eléctrica o de comunicaciones (línea telefónica) crea ondas transitorias de corriente y voltaje que se propagan por ambas partes del punto de impacto por varios kilómetros. Las corrientes transitorias que logran ingresar a la instalación son reducidas por la impedancia efectiva de la instalación, sin embargo, los transitorios de voltaje pueden propagarse prácticamente sin atenuación hasta el final de cada circuito derivado.

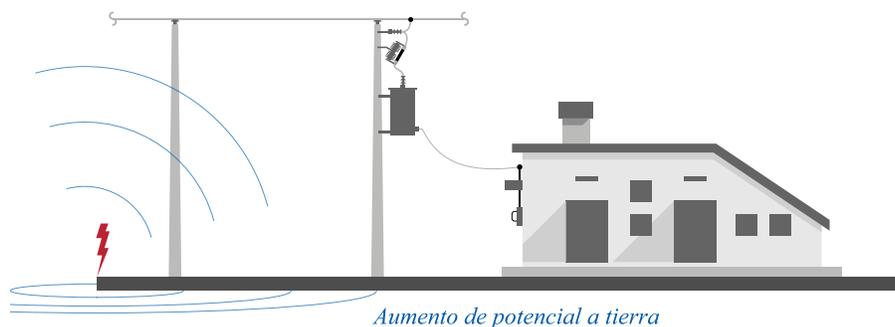


Figura 8: Transitorios inducidos en la línea eléctrica.

Acoplamiento indirecto (Fig. 8): La caída de un rayo cercano (sobre un poste, árbol o irregularidad en el terreno) será equivalente a una antena de gran longitud que emite un campo electromagnético muy elevado. El campo electromagnético emitido puede llegar a penetrar el interior del edificio e inducir voltajes y corrientes transitorias, asimismo inducir voltajes y corrientes en las líneas eléctricas o telefónicas, transmitiendo los transitorios al interior del edificio.

Ambos mecanismos de acoplamiento pueden considerarse como fuentes ideales de voltaje que aportan una componente de corriente transitoria al sistema (Fig. 9). Los transitorios oscilatorios inyectados por la conmutación de la red eléctrica también se incluyen en el Escenario 1.

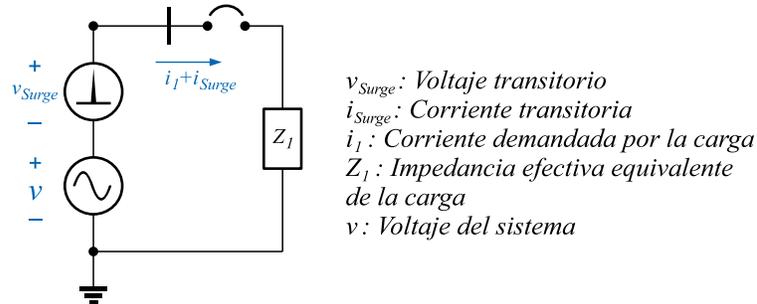


Figura 9: Acoplamiento Directo-Indirecto (Escenario 1).
 Nota. Adaptado de IEEE Std C62.41.1-2002.

Escenario 2: La descarga por rayo es de forma directa o muy cercana a la estructura o edificio. Varios mecanismos de acoplamiento pueden presentarse:

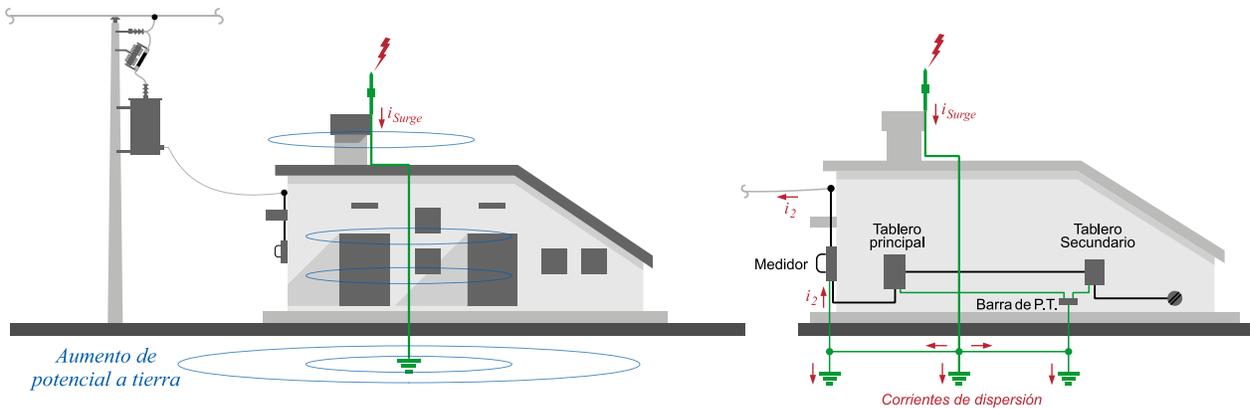


Figura 10: Transitorios conducidos e inducidos dentro del edificio.

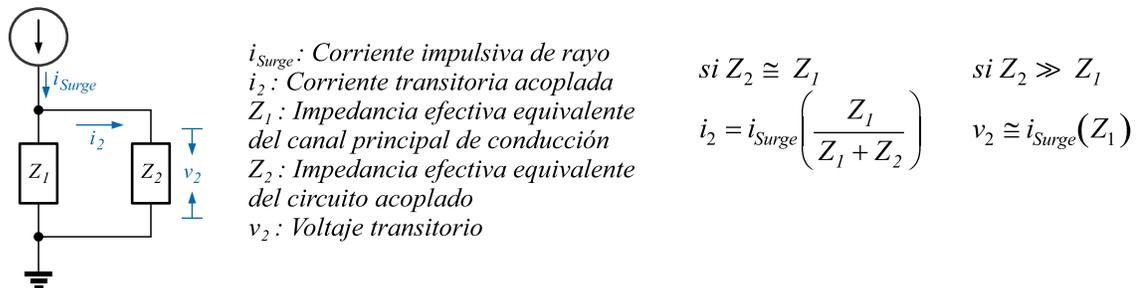


Figura 11: Acoplamiento Directo (Escenario 2).
 Nota. Adaptado de IEEE Std C62.41.1-2002.

Acoplamiento directo (Fig. 10 y 11): La corriente de rayo buscará descargarse a tierra mediante las trayectorias de menor resistencia que ofrecen los electrodos locales y remotos, sin embargo,

dependiendo de las impedancias de las conexiones a tierra de los circuitos en el edificio, una fracción de la corriente de rayo (i_2) puede derivarse a través del conductor neutro (conductor puesto a tierra) hacia el sistema de distribución y sus múltiples electrodos de puesta a tierra.

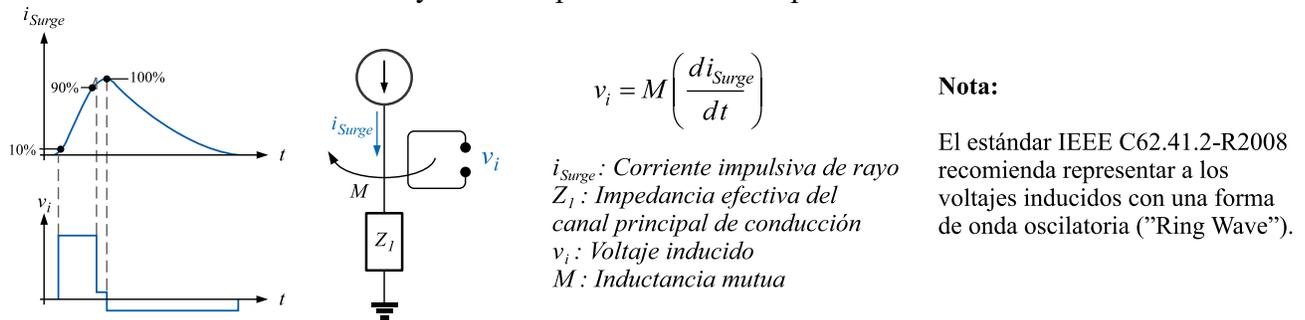


Figura 12: Acoplamiento Indirecto (inductivo) (Escenario 2).
Nota. Adaptado de IEEE Std C62.41.1-2002.

Acoplamiento indirecto (Fig. 12): La descarga por rayo a través de una terminal aérea se considera como una fuente de ideal de corriente; el flujo de corriente en los conductores de bajada provocará un acoplamiento inductivo en bucles adyacentes abiertos o cerrados, la máxima razón de cambio di/dt determinará el nivel de voltaje inducido (v_i).

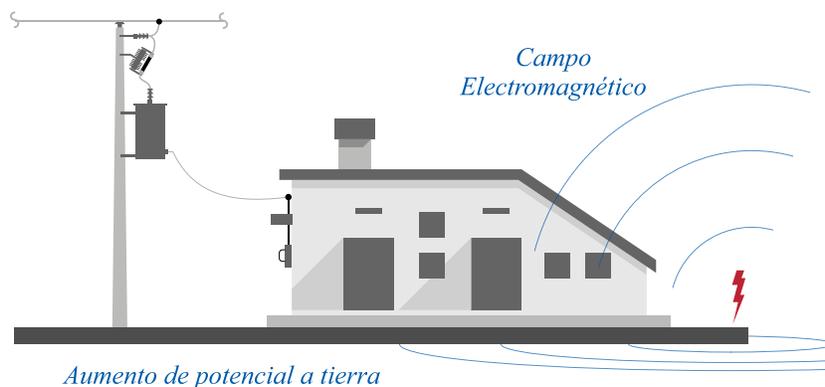


Figura 13: Acoplamiento a tierra y transitorios inducidos dentro del edificio.

Acoplamiento a tierra (aumento de potencial a tierra) (Fig. 13): La caída de un rayo cercano sobre el terreno provocará una fuerte elevación del potencial a tierra en una zona de algunos kilómetros, este aumento de potencial induce tensiones de paso y sobretensiones transitorias en cables subterráneos.

Los transitorios acoplados a los conductores del sistema eléctrico se propagan en cualquier combinación entre los conductores de fase, neutro y tierra. Para un sistema trifásico en estrella se usa la nomenclatura: L-L, L-N, L-G y N-G, la cual describe cada modo de propagación.

3.4.2. Categorías de exposición y formas de onda estandarizadas IEEE

Una de las practicas recomendadas por el estándar IEEE C62.41.2, es la de ubicar tres zonas (categorías A, B y C) en función de la posible propagación de los transitorios de voltaje y corriente. De acuerdo a este concepto, la ubicación de la categoría de A se aplica a las partes más alejadas de la acometida. La ubicación de la categoría C se aplica a la parte externa, que se extiende a cierta distancia dentro del edificio. La ubicación de la categoría B se extiende entre las categorías C y A (Figura 14). Conocer los límites de cada categoría permite identificar el entorno al que se va a someter cada circuito.

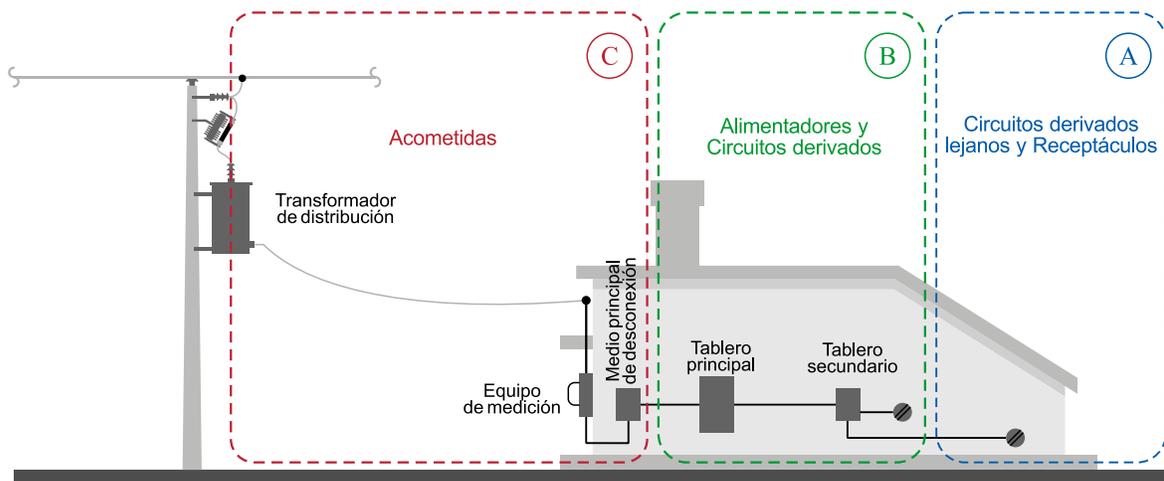


Figura 14: Ubicación de categorías de acuerdo al estándar IEEE C62.41.2.

Las formas de ondas estándar recomendadas para simular el entorno electromagnético que produce el impacto de rayo son: la onda oscilatoria amortiguada 100 kHz y la onda combinada 1.2/50 μs - 8/20 μs .

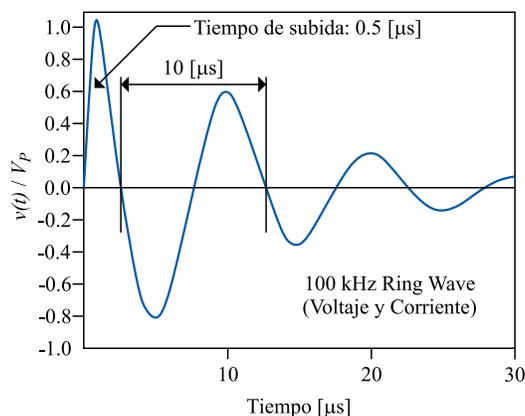


Figura 15: Onda Oscilatoria Amortiguada 100 kHz "Ring Wave".
Nota. Adaptado de IEEE Std C62.41.2-2002.

La onda oscilatoria está definida para representar niveles de estrés de menor energía que producen los transitorios acoplados indirectamente, o bien los transitorios conducidos en la red eléctrica debido a conmutación de cargas.

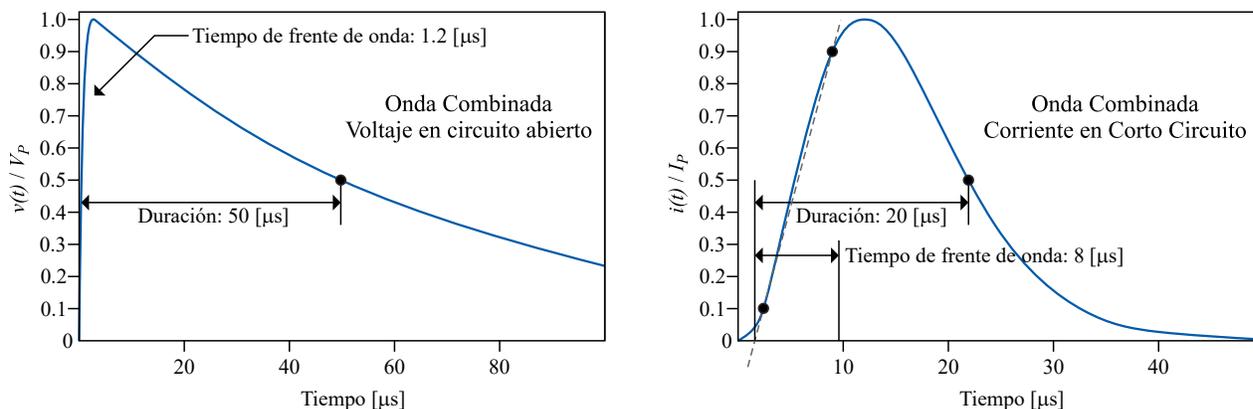


Figura 16: Onda Combinada 1.2/50 μ s - 8/20 μ s.
Nota. Adaptado de IEEE Std C62.41.2-2002.

La onda combinada (Fig. 16) está definida por una onda impulsiva de voltaje 1.2/50 μ s de circuito abierto y una onda impulsiva de corriente 8/20 μ s de corto circuito, la onda combinada representa niveles de estrés de mayor energía que producen los transitorios acoplados directamente a línea de distribución debido al impacto directo de rayo.

	Escenario 1		Escenario 2	
	Transitorios incidentes al edificio desde el exterior, y generados en el interior		Transitorios acoplados por el impacto directo de rayo	
Categoría	Onda Oscilatoria	Onda Combinada	Acoplamiento inductivo	Acoplamiento directo
A	6 kV, 0.2 kA	6 kV, 0.5 kA		-
B	6 kV, 0.5 kA	6 kV, 3 kA	Onda Oscilatoria 6 kV, 0.5 kA	-
C (Baja exposición)	-	6 kV, 3 kA		-
C (Alta exposición)	-	10 kV, 10 kA		-

Tabla 1: Valores recomendados para las categorías A, B y C, de acuerdo al estándar IEEE C62.41.2-2002.

La Tabla 1 muestra los niveles de estrés (valores pico de voltaje y corriente) esperados en cada categoría de acuerdo al estándar IEEE C62.41.2, los valores son una recomendación. Se debe tomar en cuenta que el desempeño de un dispositivo de protección contra transitorios depende de la categoría y el tipo de onda para el cual es diseñado.

3.5 Valoración de riesgo por impacto directo de rayo a una estructura

El objetivo principal de realizar una evaluación de riesgo por rayos, es determinar si se requiere un sistema externo de protección contra descargas atmosféricas y, de ser así, seleccionar el nivel de protección adecuado. En algunos casos se debe considerar seriamente la necesidad de protección independientemente del resultado de la evaluación de riesgos. Los ejemplos son aquellas aplicaciones donde son factores los siguientes puntos:

- Grandes multitudes, continuidad de servicios críticos o alta frecuencia de rayos.
- Edificios o estructuras que contienen materiales explosivos o inflamables.
- Edificio que contiene un patrimonio cultural insustituible.

La norma IEC- 62305-2: Gestión de riesgos, proporciona una metodología muy detallada y extensa para la evaluación de riegos. Para cálculos prácticos se puede aplicar la metodología simplificada presentada en la norma NMX-J-549-2005, o bien en el estándar NFPA 780. Aunque ambas normas se basan en los mismos conceptos, la forma de calcular la valoración de riesgo difiere.

La valoración de riesgo simplificada consiste en calcular la frecuencia anual promedio de impacto por rayos directos a una estructura (N_0) y compararlo con la frecuencia de rayos directos permitidas a la estructura (N_d). El resultado de esta comparación se usa para decidir si es necesario el SEPTE. Si N_0 es menor o igual a N_d , el SEPTE puede ser opcional, pero si $N_0 > N_d$, entonces el SEPTE es necesario. El SPTE puede estar formado exclusivamente por el SIPTE siempre y cuando los resultados obtenidos en la valoración de riesgo indiquen que la instalación del SEPTE puede omitirse.

$$N_0 = (N_g)(A_e)(C_1)(10^{-6}) \quad [NFPA 780] \quad Ec. (4)$$

$$N_0 = (N_g)(A_e)(10^{-6}) \quad [NMX - J - 549] \quad Ec. (4')$$

En donde:

N_0 : Frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura, en [rayos/año].

N_g : Densidad promedio anual de rayos a tierra por km^2 , en [rayos/ km^2 /año].

A_e : Área equivalente de captura de la estructura, en [m^2].

C_1 : Coeficiente de localización de la estructura (Tabla 2).

Ubicación relativa de la estructura	C_1
Estructura rodeada de estructuras más altas o árboles a una distancia de 3H	0.25
Estructura rodeada por estructuras de igual o menor altura dentro de una distancia de 3H	0.5
Estructura aislada, sin otras estructuras ubicadas dentro de una distancia de 3H	1
Estructura aislada, en la cima de un monte o en una cúpula.	2

Tabla 2: Coeficiente de localización de la estructura, NFPA 780.

EL valor de la densidad promedio anual de rayos a tierra por kilómetro cuadrado (N_g) se obtiene del mapa de isodensidades de la República Mexicana (Fig. 17). La NMX-J-549 en su apéndice D muestra el mapa de isodensidades por estado, y hace referencia a N_g como la densidad de rayos a tierra (DRT).

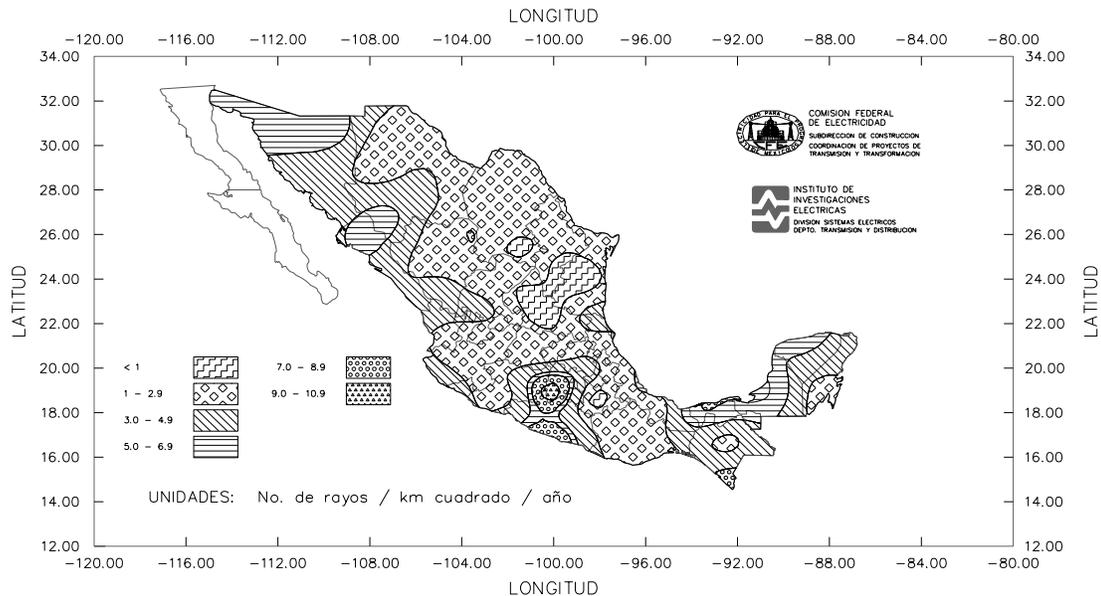


Figura 17: Mapa de isodensidades de rayos a tierra 1983-1993.

Nota. Adaptado de la norma mexicana NMX-J-549-ANCE-2005.

El área equivalente de captura de una estructura (A_e) se obtiene al extender una línea con una pendiente de 1 a 3 desde la parte superior hasta el suelo rodeando completamente a la estructura. A_e es propia de cada estructura y depende de la geometría de la estructura y del terreno, ésta se puede calcular numéricamente o por métodos gráficos. Se debe tomar en cuenta los siguientes puntos:

1. Cuando el área equivalente de captura de una estructura abarca totalmente otra estructura, la estructura cubierta no se debe tomar en cuenta (Fig. 18 B).
2. Cuando las áreas de captura de varias estructuras se traslapan, el área equivalente de captura se calcula mediante el área resultante (Fig. 18 C).

Para una estructura aislada de techo plano y ubicada en terreno plano (Fig. 18 A), A_e se calcula conforme a la Ec. (5); la NMX-J-549-2005 en su sección 4.2.3 muestra el cálculo del área equivalente para una estructura en terrenos irregulares y estructuras con otras adyacentes.

$$A_e = LW + 6H(L + W) + 9\pi H^2 \quad \text{Ec. (5)}$$

En donde:

A_e : Área equivalente de captura de la estructura, en $[m^2]$.
 L : Longitud de uno de los lados de la estructura, en $[m]$.
 W : Longitud del otro lado de la estructura, en $[m]$.
 H : Altura de la estructura, en $[m]$.

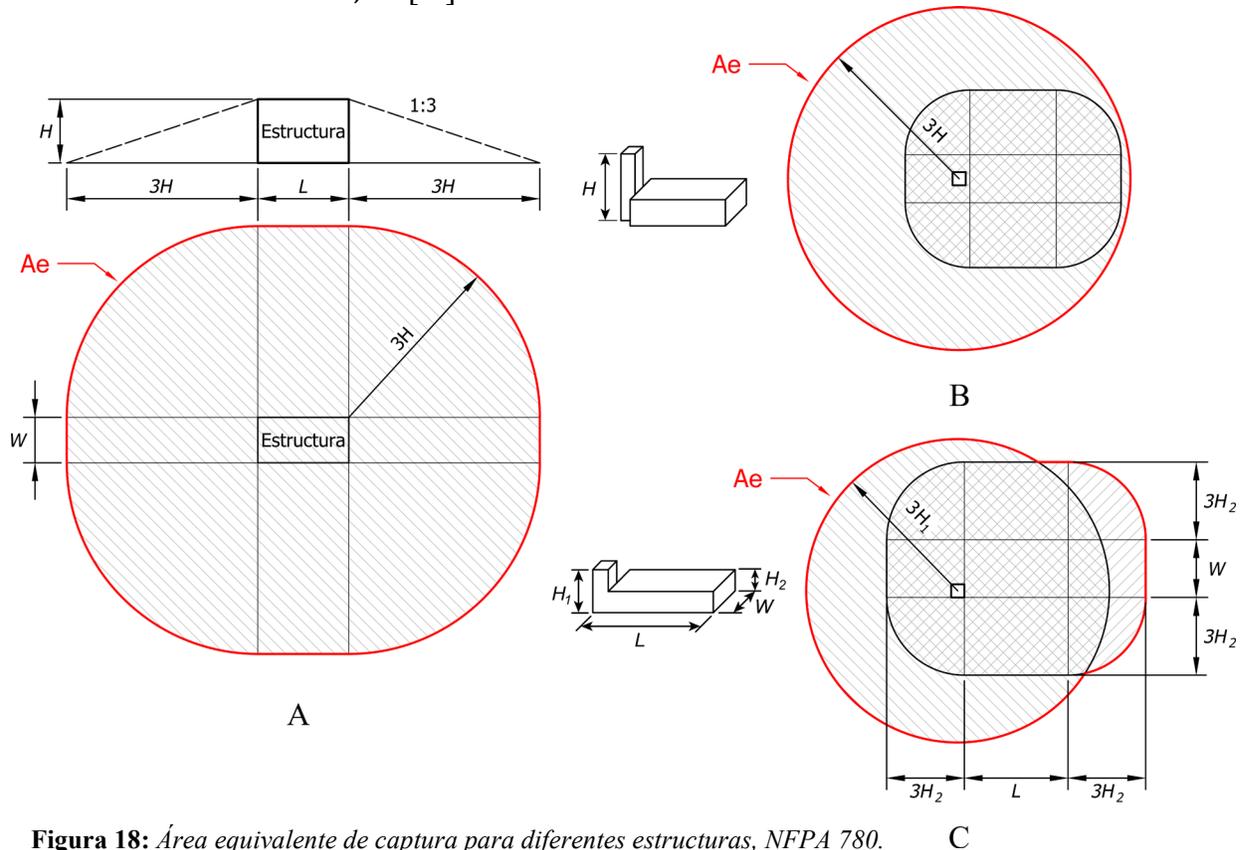


Figura 18: Área equivalente de captura para diferentes estructuras, NFPA 780.

La frecuencia de rayos directos permitida a la estructura (N_d) es una medida del riesgo de daño a la estructura de acuerdo al tipo, uso, contenido e impacto ambiental. El valor de N_d se calcula conforme a la Ec. (6) según el método de la NFPA 780. Por otro lado, la NMX-J-549 establece valores ya calculados de acuerdo al tipo, uso y contenido para estructuras comunes, es decir, estructuras utilizadas para propósito considerados como ordinarios, ya sea comercial, industrial, rural, institucional o residencial (Apéndice A).

$$N_d = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{(C_2)(C_3)(C_4)(C_5)} \quad [NFPA 780] \quad Ec. (6)$$

En donde:

N_d : Frecuencia de rayos directos permitidos a la estructura, en $[rayos/año]$.

C_2 : Coeficiente de construcción de la estructura (Tabla 3).

C_3 : Coeficiente de contenido de la estructura (Tabla 4).

C_4 : Coeficiente de ocupación de la estructura (Tabla 5).

C_5 : Coeficiente de consecuencia por rayo (Tabla 6).

Estructura	C ₂		
	Techo metálico	Techo no metálico	Techo combustible
Metálica	0.5	1	2
No metálica	1	1	2.5
Combustible	2	2.5	3

Tabla 3: *Coficiente de construcción de la estructura, NFPA 780.*

Contenido de la estructura	C ₃
Bajo valor y no combustible	0.5
Valor estándar y no combustible	1
Alto valor, combustibilidad moderada	2
Valor excepcional, líquidos inflamables, computadoras o electrónicos	3
Valor excepcional, artículos culturales irremplazables	4

Tabla 4: *Coficiente de contenido de la estructura, NFPA 780.*

Ocupación de la estructura	C ₄
Sin ocupar	0.5
Normalmente ocupado	1
Difícil de evacuar o riesgo de pánico	3

Tabla 5: *Coficiente de ocupación de la estructura, NFPA 780.*

Consecuencia por rayo	C ₅
No se requiere la continuidad de los servicios de las instalaciones, sin impacto ambiental	1
Se requiere la continuidad de los servicios de las instalaciones, sin impacto ambiental	5
Consecuencias para el medio ambiente	10

Tabla 6: *Coficiente de consecuencia por rayo, NFPA 780.*

3.6 Métodos de protección externa contra descargas atmosféricas

3.6.1. Método de la esfera rodante

Este método usa el concepto de la distancia de impacto (r_s) como una herramienta para determinar zonas de protección y zonas de captura del rayo.

Para una distancia de impacto dada, se puede definir una superficie imaginaria sobre el suelo y sobre los objetos en el suelo de modo que, cuando el líder descendente pasa a través de esa superficie en una ubicación específica, el líder descendente es "capturado" por un punto específico en el suelo u objetos que permitan el aumento de campo eléctrico como para iniciar un líder ascendente.

La construcción geométrica de esta superficie se logra simplemente haciendo rodar una esfera imaginaria sobre el suelo y los objetos que estén sobre el suelo. La superficie de captura consta de todos los puntos que recorre el centro de la esfera rodante; todos aquellos puntos y superficies donde toque la esfera constituyen superficies expuestas; los espacios no alcanzados por la esfera son las zonas de protección (Fig. 19A).

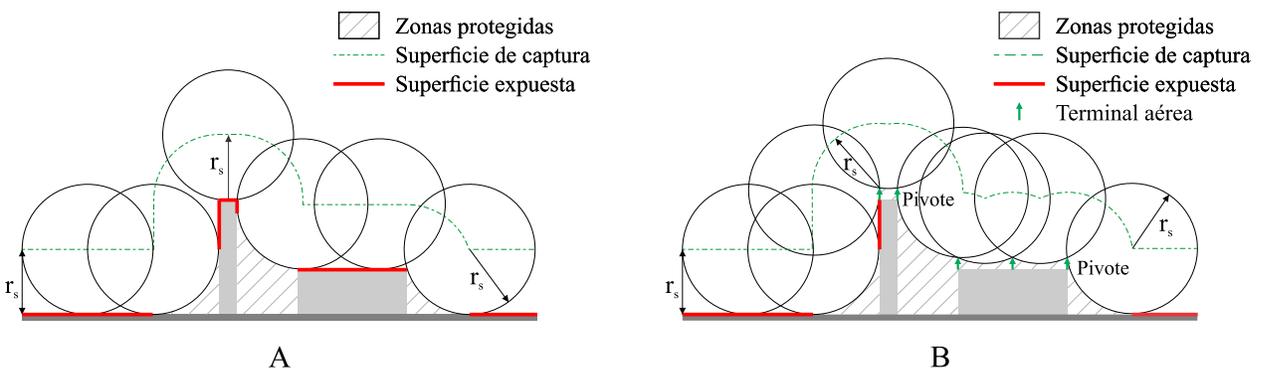


Figura 19: Determinación de la superficie de captura, superficies expuestas y zonas de protección mediante el método de la esfera rodante.

La instalación de la primer terminal aérea (Pivote) en cada estructura (Fig. 19B) parte del primer punto de contacto entre la esfera rodante y la estructura, la altura del pivote debe ser suficiente para que la esfera no toque a la estructura. Una vez especificado el pivote, la esfera imaginaria debe rodarse e instalar una terminal aérea en todos aquellos puntos donde la esfera pretenda tocar a la estructura. Las superficies lisas y planas como las paredes de edificios muy altos o el techo de edificios muy extensos se protegen mediante el método de la malla.

Coordinación de los niveles de protección

Para definir el rayo como magnitud de perturbación, se fijan los niveles de protección de I hasta IV (Tabla 7). El radio de la esfera rodante correspondiente a cada nivel se calcula conforme a la Ec. (3). El radio se selecciona de acuerdo al nivel de protección recomendado (Apéndice A).

Nivel de protección	Valor mínimo de la corriente de rayo, I	Eficiencia del sistema de protección	Radio de la esfera rodante, r_s
I	3 kA	98 %	20 m
II	6 kA	95 %	30 m
III	10 kA	90 %	45 m
IV	16 kA	80 %	60 m

Tabla 7: Coordinación de los niveles de protección.

Los valores indicados en la Tabla 7 muestran que si, por ejemplo, se considera un valor de diseño de 20 m (Nivel 1) para el radio de la esfera rodante, la instalación estará protegida para corrientes de rayo mayores o iguales a 3 kA. Se observa que: “cuanto menor es el nivel de protección mayor es la protección, además, existe una probabilidad mayor de que los rayos incidentes adquieran un bajo valor de corriente”.

Profundidad de penetración de la esfera rodante

En la (Fig. 20) se ilustra la profundidad de penetración (P_s) de la esfera rodante, este parámetro se usa para dimensionar las terminales aéreas o bien puede usarse para determinar distancias de separación (S) entre dos terminales.

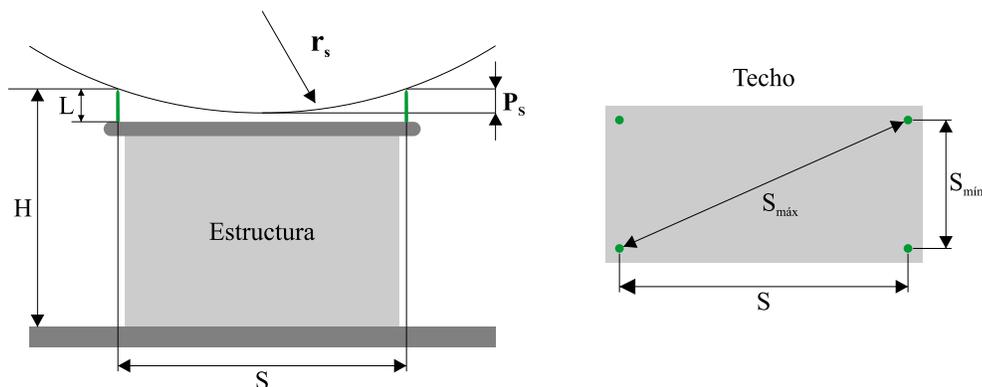


Figura 20: Profundidad de penetración entre dos pararrayos.

Para garantizar que la estructura a proteger no sea tocada por la esfera rodante, la longitud (L) de cada terminal aérea instalada debe ser superior a la profundidad de penetración (P_s) y debe

calcularse en función de la mayor distancia de separación entre terminales aéreas ($S_{\text{máx}}$). La Profundidad de penetración (P_s) se calcula con la Ec. (7).

$$P_s = r_s - \sqrt{r_s^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} \quad \text{para } 0 < S < 2r_s \quad \text{Ec. (7)}$$

En donde:

P_s : Profundidad de penetración de la esfera rodante, en metros [m].

r_s : Radio de la esfera rodante, en metros [m].

S : Distancia de separación entre terminales aéreas, en metros [m].

Un aspecto importante en la evaluación de protección con el método de la esfera rodante, es que la altura máxima efectiva de la terminal aérea a partir del plano a proteger es igual al radio de la esfera rodante. La Tabla 8 muestra la altura de la terminal aérea (H) en función del nivel de protección.

Nivel de protección	I	II	III	IV
Altura de la terminal, H	≤ 20 m	≤ 30 m	≤ 45 m	≤ 60 m

Tabla 8: Altura de las terminales aéreas.

Velo de protección

La altura mínima G que ofrece un velo de protección formado por dos terminales aéreas (puntas simples) P_1 y P_2 , se calcula conforme a la Ec. (8). La Ec. (9) muestra el radio horizontal de protección (R_s) que proyecta la esfera rodante sobre la superficie del terreno (Fig. 21).

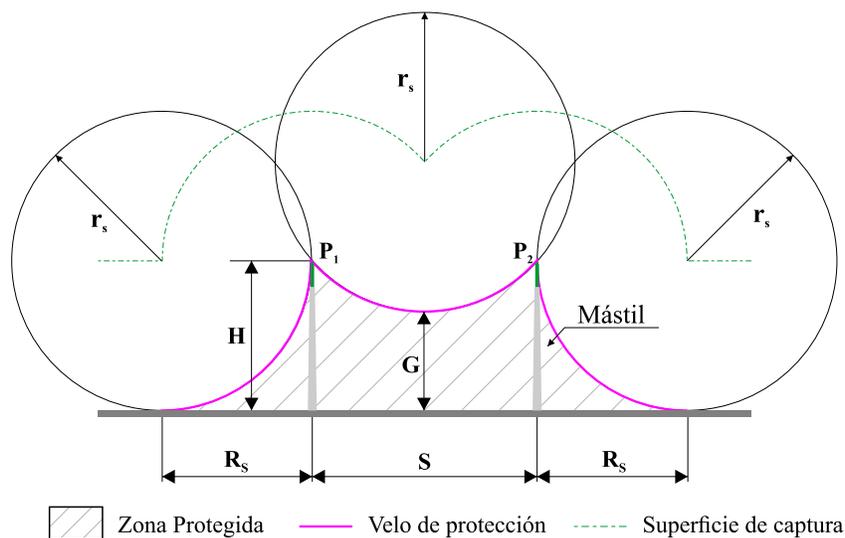


Figura 21: Velo de protección formado por dos terminales aéreas, NMX-J-549.

$$G = H - r_s + \sqrt{r_s^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} \quad \text{para } 0 < S < 2r_s \quad \text{Ec. (8)}$$

$$R_s = \sqrt{H(2r_s - H)} \quad \text{para } 0 < H < 2r_s \quad \text{Ec. (9)}$$

En donde:

G: Altura mínima a proteger, en metros [m].

H: Altura de la terminal aérea sobre el plano de referencia, en metros [m].

r_s: Radio de la esfera rodante, en metros [m].

S: Distancia de separación entre terminales aéreas, en metros [m].

R_s: Radio horizontal de protección de la esfera rodante, en metros [m].

3.6.2. Método de la malla (jaula de Faraday)

La jaula de Faraday se aplica a superficies planas y consiste en tender una red de conductores en forma simétrica de acuerdo a la Tabla 9.

Nivel de protección	Radio de la esfera rotante, <i>r_s</i>	Dimensiones de malla
I	20 m	5 x 5 m
II	30 m	10 x 10 m
III	45 m	15 x 15 m
IV	60 m	20 x 20 m

Tabla 9: Dimensiones de malla, IEC 62305-3.

El área de protección proporcionada por el método de la malla es el área delimitada por la malla. La protección de las áreas adyacentes a la malla (los lados del edificio) se determina mediante el método del ángulo de protección o el método de la esfera rodante (Fig. 22).

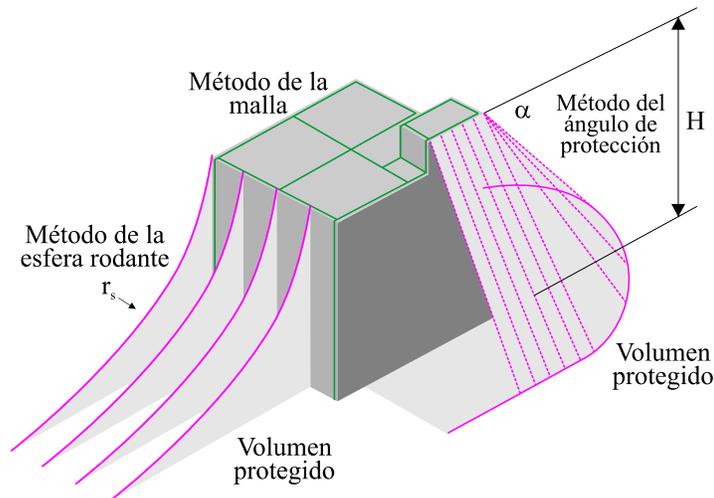


Figura 22: Volumen protegido por la malla de acuerdo al método de la esfera rodante y el método del ángulo de protección.

3.6.3. Método del ángulo de protección

Este método se aplica a edificios con dimensiones simétricas o para estructuras montadas sobre techos (p. ej. antenas, aire acondicionado, etc.). El ángulo de protección (α) depende del nivel de protección y de la altura (H) de las terminales aéreas sobre la superficie de referencia (Fig. 23).

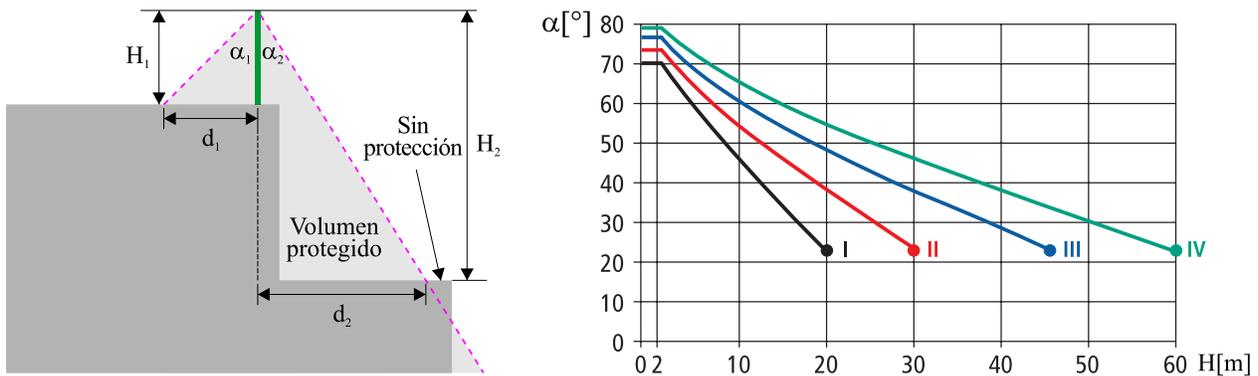


Figura 23: Ángulo de protección (α) a diferentes alturas (H), IEC 62305-3.

3.6.4. Protección mediante terminales con dispositivo de cebado

Esta forma de protección es respaldada por la norma francesa NF C 17-102. De acuerdo a esta norma, los pararrayos con dispositivo de cebado o PDCs funcionan con un sistema de ionización (dispositivo de cebado) el cual genera un campo eléctrico capaz de generar un líder ascendente (streamer) antes que una punta Franklin cuando éstos se comparan en las mismas condiciones. El tiempo que adelanta un PDC a una punta Franklin en emitir el líder ascendente se le conoce como avance de cebado (ΔT), se mide en un rango de 10 a 60 microsegundos y se obtiene de ensayos normalizados hechos por laboratorios acreditados de alta tensión. La principal ventaja obtenida del PDC debido a la emisión temprana del líder ascendente, es que el líder recorre una mayor distancia (Δ) en comparación con el líder ascendente emitido por la punta Franklin, en consecuencia se presume que, en condiciones similares un PDC tendrá un radio de protección horizontal mayor en comparación con una punta franklin de dimensiones similares, (Fig. 24).

La norma francesa NF C 17-102 y su norma equivalente UNE 21186 indican que la punta del PDC debe ubicarse al menos dos metros por encima de los elementos a proteger; la zona protegida está delimitada por una superficie de revolución que se define por radios horizontales (R_{PDC}) correspondientes a diferentes alturas (h) (Fig. 25). El R_{PDC} se calcula conforme a la Ec. (10) y Ec. (11).

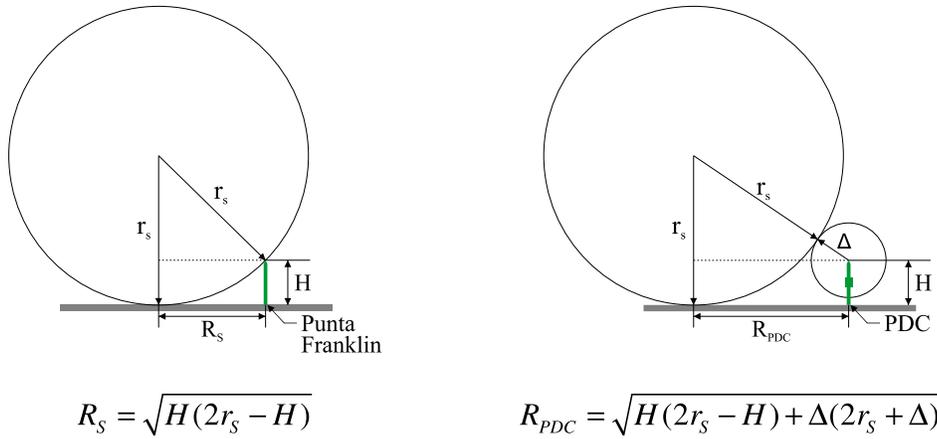


Figura 24: Radios de protección de una punta simple y de un PDC.

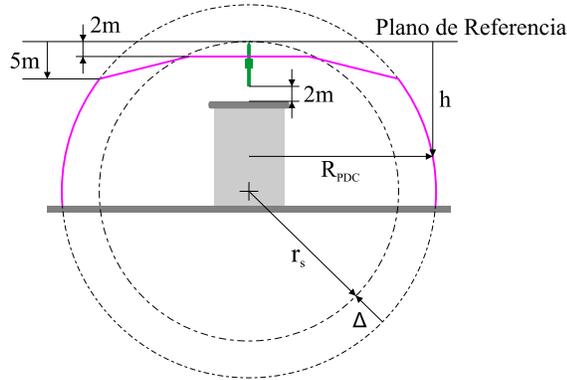


Figura 25: Zona de protección de un PDC, NF C 17-102.

$$R_{PDC} = \begin{cases} \frac{h}{5} \sqrt{5(2r_s - 5) + \Delta(2r_s + \Delta)} & \text{para } 2m < h < 5m \\ \sqrt{h(2r_s - h) + \Delta(2r_s + \Delta)} & \text{para } h \geq 5m \end{cases} \quad \text{Ec. (10)}$$

En donde:

R_{PDC} : Radio horizontal de protección del PDC, en [m].

h : Altura con respecto al plano horizontal de referencia, en [m].

r_s : Radio de la esfera rodante de acuerdo al nivel de protección seleccionado, en [m].

Δ : Ganancia en distancia, en [m].

$$\Delta = v(\Delta T) \quad \text{Ec. (11)}$$

ΔT : Avance de cebado, en microsegundos [μs].

v : Velocidad del líder ascendente; se asume un valor de 1×10^6 [m/s].

Nota: El uso de terminales aéreas con dispositivo de cebado ha sido un tema controversial debido a que existen dudas sobre la validez de los procedimientos utilizados para evaluar el

rendimiento de los PDCs, y es que se argumenta que el funcionamiento de un PDC se basa en extrapolaciones de resultados de laboratorio que no son consistentes con las observaciones de los fenómenos a escala real.

3.7 Sistemas de protección externa contra descargas atmosféricas

Los sistemas de protección externa contra descargas atmosféricas están clasificados en dos tipos: no aislados y aislados. Un SEPTE no aislado está conformado por terminales aéreas, conductores de bajada y electrodos de puesta a tierra, con la característica de que las terminales aéreas y los conductores de bajada están en contacto eléctrico directo con la estructura a proteger. En un SEPTE aislado las terminales aéreas y los conductores de bajada no tienen contacto eléctrico con la estructura a proteger y debe utilizarse cuando la circulación de la corriente de rayo cause daño a la estructura en cualquiera de los siguientes dos casos:

1. Existe el riesgo de fuego debido a efectos térmicos; la separación entre los elementos del SEPTE y los elementos de la estructura a proteger recubierta con material inflamable o combustible debe ser mayor de 0,1 m.
2. Existe el riesgo de fuego o explosión debido a arcos eléctricos; es necesario cumplir con los requisitos de la distancia de seguridad (s).

3.7.1. Terminales aéreas

Las terminales aéreas son aquellos elementos colocados específicamente para captar a los rayos. Las terminales aéreas pueden ser:

- Puntas Franklin (Puntas simples).
- Terminales con dispositivo de cebado (PDC).
- Malla reticulada (Jaula de Faraday).
- Conductores aéreos tendidos horizontalmente (Hilos de guarda).

Para terminales con tecnologías convencionales (Puntas simples, Jaula de Faraday e hilos de guarda), los métodos de: la esfera rodante, ángulo de protección y la malla son usados para determinar el número, ubicación y posición de las terminales aéreas. Para terminales con dispositivo de cebado (PDCs) se buscan los puntos más altos de la estructura, sin embargo, se puede utilizar el método de la esfera rotante teniendo en cuenta la ganancia del PDC y los pivotes requeridos por el método.

3.7.2. Conductores de bajada

Los conductores de bajada proporcionan la interconexión de las terminales aéreas a los electrodos de puesta a tierra. El sistema de conductores de bajada debe proporcionar múltiples rutas paralelas para la descarga de energía a tierra. Esto reduce la densidad de corriente, reduciendo así el riesgo de descarga por arco eléctrico y daños por temperatura.

El número de conductores de bajada depende del perímetro de los bordes exteriores del techo del edificio a proteger, éstos deben instalarse de tal manera que, partiendo de las esquinas de la edificación estén distribuidos de la forma más regular posible.

Distancia de seguridad

Una de las principales consecuencias al conducir la corriente de rayo, es que se producen tensiones inducidas en cualquier elemento metálico (tuberías, cables, bucles, etc.) que se encuentre en la proximidad del conductor o conductores que estén conduciendo la corriente de rayo. Con el objetivo de reducir la posibilidad de presentarse arcos eléctricos debido al efecto de inducción se define la distancia de seguridad (s) (Ec. 12). La Figura 26 ilustra este concepto.

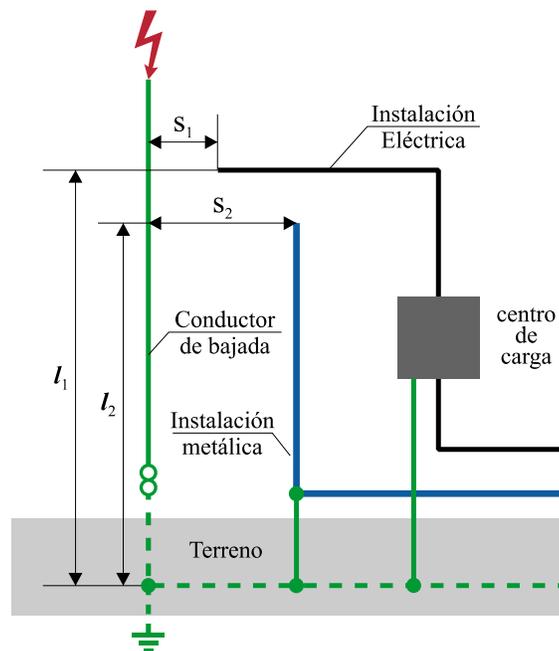


Figura 26: Distancia de seguridad.

Nota. Adaptado de Lightning Protection Guide, Dehn + Söhne, 2015.

$$s = k_i \frac{k_c}{k_m} l \quad \text{Ec. (12)}$$

En donde:

s : Distancia de seguridad, en [m].

k_i : Factor de inducción.

k_c : Factor de distribución de corriente.

k_m : Factor de material.

l : Longitud a lo largo del conductor de bajada, desde el punto en que se considera la distancia de seguridad del elemento a evaluar al punto de tierra más próximo, en [m].

Nivel de protección	I	II	III	IV
Factor de inducción, k_i	0.1	0.075	0.05	0.05

Tabla 10: Factor de inducción, NMX-J-549.

Material	Aire	Sólidos (ladrillos, madera, etc.)
Factor de material, k_m	1	0.5

Tabla 11: Factor de material, NMX-J-549.

Número de conductores de bajada	1-2	3-4	>4
F. de distribución de corriente, k_c	1	0.66	0.44

Tabla 12: Factor de distribución de corriente, NMX-J-549.

El factor de inducción (k_i) depende del nivel de protección (Tabla 10); el factor de material (k_m) tiene en cuenta las características de aislamiento del entorno (tipo de material de separación) (Tabla 11); el factor de distribución de corriente (k_c) es complicado de obtener ya que depende del número total de conductores de bajada, de su posición, de anillos equipotenciales y del tipo de sistema de puesta a tierra, sin embargo, la norma NMX-J-549 muestra valores aproximados del factor k_c en función del número de conductores de bajada (Tabla 12), teniendo en consideración que éstos están distribuidos simétricamente en el edificio o estructura. La Norma IEC 62305-3 en su Anexo C muestra una forma más detallada de cómo calcular el factor k_c .

Nota: La NOM-001-SEDE-2012 en la sección 250-46 indica que, las canalizaciones, envolventes, estructuras y partes metálicas de equipo eléctrico que no transporten normalmente corriente eléctrica, se deben mantener alejadas 1.80 metros como mínimo de los conductores de bajada de los electrodos de puesta a tierra de los pararrayos o deben unirse cuando la distancia a los conductores de bajada sea inferior a 1.80 metros.

Trayectorias de los conductores de bajada

Los conductores de bajada deben instalarse, procurando que, sigan trayectorias rectas y lo más cortas posibles al electrodo o sistema de puesta a tierra a fin de evitar la formación de bucles o lazos en los conductores de bajada, sin embargo, en muchos casos no es posible, para estos casos la distancia de separación (S) debe ser mayor o igual a la distancia de seguridad (s) (Fig. 27A). Si esto no es posible, el conductor de bajada debe pasar directamente a través de la estructura (Fig. 27B). Se debe tener en cuenta el radio de curvatura de los conductores de bajada, en trayectorias verticales y horizontales debe ser mayor o igual a 200 mm.

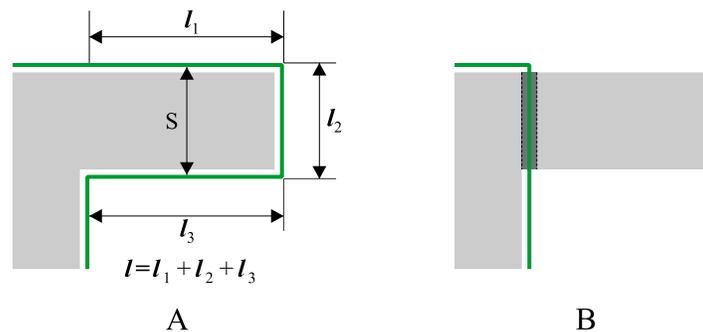


Figura 27: Trayectorias de los conductores de bajada en marquesinas, pretilas o voladizos.
Nota. Adaptado de la norma NMX-J-549-ANCE-2005.

Los conductores de bajada ubicados en zonas de tránsito de personas deben evitarse, si esto no es posible, se debe cumplir la distancia mínima de seguridad como lo indica la Ec. (12) y Ec. (13). El valor 2.5 es representativo de la altura de la punta de los dedos de la mano de un hombre cuando estira su brazo verticalmente (Fig. 28).

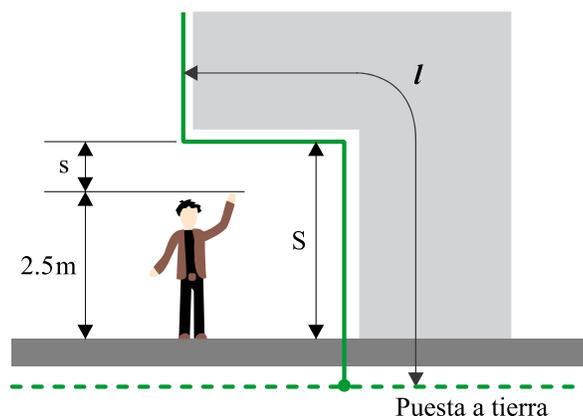


Figura 28: Trayectoria para los conductores de bajada en zonas transitadas.
Nota. Adaptado de la norma NMX-J-549-ANCE-2005.

$$S > 2.5 + s \quad \text{Ec. (13)}$$

En donde:

S : Distancia de separación, en [m].

s : Distancia de seguridad, en [m].

l : longitud del conductor de bajada a evaluar conforme la distancia de seguridad s , en [m].

3.7.3. Puesta a tierra

Desde el punto de vista de protección contra el rayo, la puesta a tierra (Grounding) tiene como propósito proveer una ruta de baja resistencia hacia el suelo, de forma tal que la elevación de potencial a tierra (GRP, Grounding Potential Rise) desarrollado por la corriente de rayo en la superficie del suelo sea mínimo.

Resistencia de puesta a tierra

Desde el punto de vista electromagnético, cualquier electrodo de puesta a tierra presenta una impedancia a tierra causada por efectos mutuos y acoplamientos capacitivos e inductivos a una frecuencia dada, sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones es muy común referirse a la resistencia de puesta a tierra en lugar de la impedancia de puesta a tierra, esto se debe al hecho de que los efectos reactivos son despreciables a bajas frecuencias.

La resistencia a tierra o resistencia de puesta a tierra es la resistencia al paso de corriente que ofrece el electrodo puesto a tierra hasta un punto lejano conectado a tierra (tierra remota). Uno de los métodos usados para determinar la resistencia a tierra consiste en determinar el potencial eléctrico desarrollado en el suelo debido a la inyección de corriente en el electrodo. Esto se explica mediante los siguientes pasos:

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad V_p - V_\infty &= \int_P^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r} & \textcircled{2} \quad \vec{E} &= \rho \vec{J} & \textcircled{3} \quad |\vec{J}| &= \frac{I}{A(r)} \\ \textcircled{4} \quad V_r &= f(r)\rho I & \textcircled{5} \quad R_T &= \frac{V_r(a)}{I} \end{aligned}$$

Figura 29: Ecuaciones necesarias para determinar la resistencia a tierra.

1. Se determina la diferencia de potencial ($V_{p,\infty}$) entre un punto (P) y otro muy lejano (∞) a partir del campo eléctrico (\vec{E}). (V_∞) representa el potencial en el punto lejano y se asigna como punto de referencia ($V_\infty = 0$).
2. El campo eléctrico se expresa en función del vector densidad de corriente (\vec{J}) y de la resistividad (ρ) del medio en donde se desarrolla dicho campo.

3. La magnitud de la densidad de corriente $|\vec{j}|$ se calcula mediante la corriente (I) que se inyecta al electrodo y el área por donde ésta se distribuye, $A(r)$ es una función de área que depende de la distancia (r).
4. Después de resolver la integral mediante métodos analíticos o numéricos, se generaliza el cálculo del potencial para cualquier distancia (r) al electrodo.
5. Se reduce la distancia (r) al radio del electrodo ($r = a$), esto significa que $V_r(a)$ es el potencial del electrodo, y la resistencia de puesta a tierra (R_T) se obtiene al dividir $V_r(a)$ por la corriente inyectada (I).

Por ejemplo, para un electrodo semiesférico de radio ($r = a$) (Fig. 30A) se tiene que la diferencia de potencial en un punto P con respecto a un punto infinitamente lejano (tierra remota) es:

$$V_P - V_\infty = \int_P^\infty \rho \frac{I}{\underbrace{2\pi r^2}_{|\vec{j}|}} dr = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{\infty} \right) = \frac{\rho I}{2\pi P} [V]$$

De forma análoga, para cualquier distancia (r):

$$V_{P \infty} = V_r = \frac{1}{2\pi r} \rho I [V]$$

Finalmente, la Resistencia de puesta a tierra (R_T) (Fig. 30B) es:

$$R_T = \frac{V_r(a)}{I} = \frac{\rho}{2\pi a} [\Omega]$$

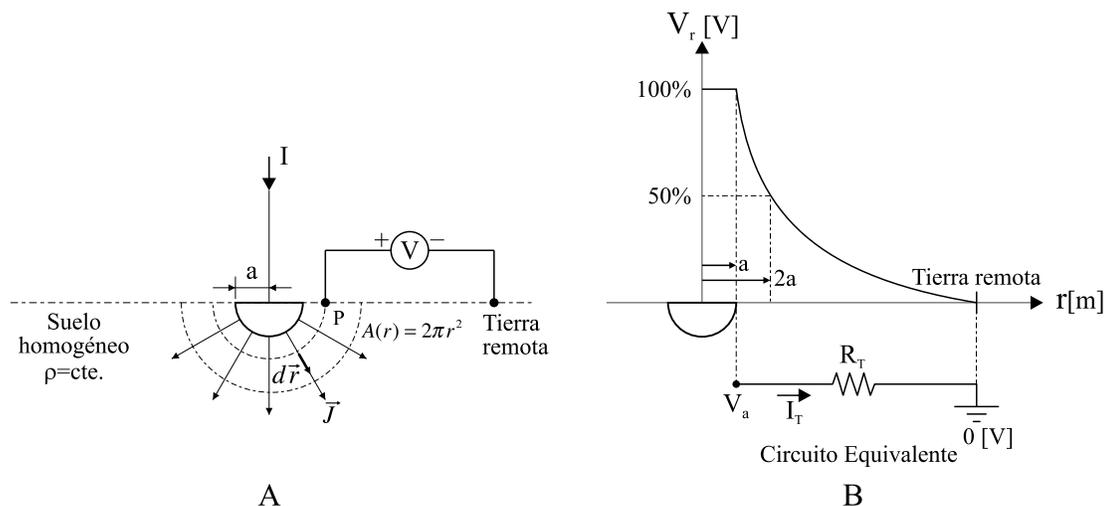


Figura 30: Potencial eléctrico de un electrodo semiesférico de radio 'a'.

La aplicación de este procedimiento es relativamente sencillo para electrodos que presentan simetría, sin embargo, existen arreglos complejos de electrodos en donde el cálculo de la resistencia de puesta a tierra requiere de métodos computacionales. El Apéndice B muestra un compendio de fórmulas que aproximan el cálculo de la resistencia a tierra para diferentes configuraciones de electrodos, algunas de ellas fueron calculadas con el procedimiento descrito anteriormente, otras son expresiones derivadas del estándar IEEE 142, el estándar IEEE 80 y del estándar británico BS 7430.

Medición de la resistividad eléctrica del suelo

La resistividad del terreno o suelo (ρ), se define como la resistencia que ofrece un metro cubico de tierra homogénea al paso de corriente, se expresa en ohms-metro. La resistividad depende de diversos factores, como son:

1. Contenido de sales solubles y su concentración: La conductividad del suelo es de naturaleza electrolítica, es decir, la conducción de corriente se produce a través del electrólito formado por las sales y el agua habitualmente contenida en el terreno.
2. Estado higrométrico: Contenido de agua o grado de humedad. Su valor no es constante, ya que varía con el clima, época del año, etc.
3. Granulometría: Tamaño y cantidad de los granos del suelo en contacto con el electrodo.
4. Compacidad: La resistividad disminuye conforme aumenta la compactación del terreno.
5. Estratigrafía: Capas de material o estratos que constituyen el suelo.
6. Otros factores: la resistividad del terreno es estacional, es decir, varía en diferentes temporadas del año, principalmente en lugares donde existen cambios extremos de temperatura, lugares lluviosos, secos y otras variaciones de temporada; la presencia de cuerpos metálicos también modifica la magnitud de resistividad.

Debido a la complejidad en su composición, el suelo no puede definirse a través de clasificaciones genéricas o valores típicos por lo que la resistividad del suelo debe determinarse mediante mediciones realizadas en campo.

Uno de los métodos mas populares para la medición de la resistividad del suelo, es el método de los cuatro puntos o método de Wenner. Este método fue desarrollado por el Dr. Frank Wenner en 1915. En su teoría demostró que, si la profundidad del electrodo (B) es pequeña en comparación con la distancia de separación entre electrodos (A) (Fig. 31), entonces la “resistividad aparente” del suelo

se puede calcular conforme a la Ec. (14). El termino resistividad aparente se usa ya que la Ec. (14) supone que el terreno es homogéneo.

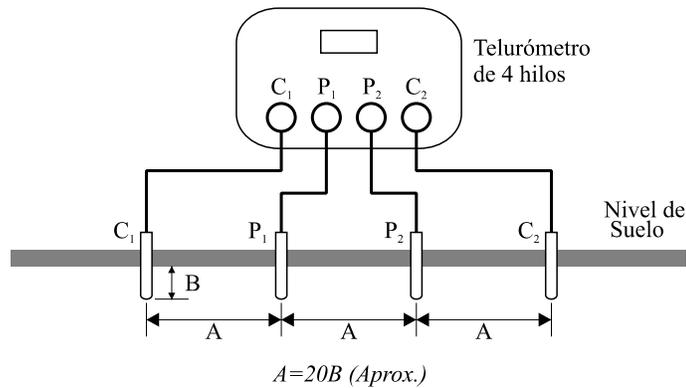


Figura 31: Método de Wenner mediante un telurómetro de cuatro hilos.

$$\rho_a = 2\pi AR \quad \text{Ec. (14)}$$

En donde:

ρ_a : Resistividad aparente, en $[\Omega \cdot m]$.

A: Distancia de separación entre electrodos, en [m].

R: Resistencia a tierra medida por el telurómetro, en $[\Omega]$.

Con el objetivo de obtener un perfil representativo del suelo, es necesario que se realice el mayor número de mediciones en direcciones ortogonales o diagonales al terreno (Fig. 32). La norma NMX-J-549 recomienda un mínimo de 6 mediciones en cada dirección, empezando con una distancia mínima de separación de 1 m.

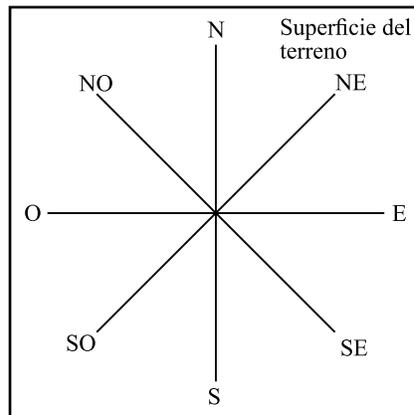


Figura 32: Trayectorias recomendadas para la medición de resistividad del terreno.

La correcta interpretación de las mediciones se obtiene al graficar la resistividad aparente de cada medición contra la distancia de separación de los electrodos (Fig. 33). La curva obtenida proporcionará información del método a seguir para calcular de la resistividad aparente del terreno.

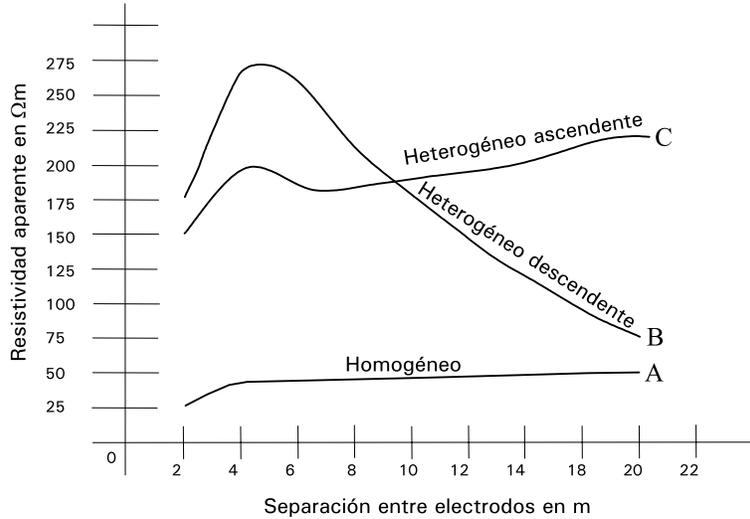


Figura 33: Perfiles de resistividad aparente del terreno, NMX-J-549.

Se considera un suelo homogéneo cuando la curva dibuja una pendiente menor al 10% (curva A, Fig. 33). Entonces la resistividad aparente del terreno se calcula (ρ):

$$\rho = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n} \quad \text{Ec. (15)}$$

En donde:

ρ : Resistividad aparente del terreno, en $[\Omega \cdot m]$.

$\rho_{a1}, \dots, \rho_{an}$: Resistividades calculadas de las mediciones hechas en campo, en $[\Omega \cdot m]$.

n : Número de mediciones hechas en campo.

Se considera un suelo homogéneo de dos capas cuando la curva sigue una tendencia ascendente o descendente (curva B ó C, Fig. 33). El modelo heterogéneo de dos capas generalmente se obtiene mediante la aplicación de programas computacionales, sin embargo, se puede calcular un valor indicativo de la resistividad aparente del terreno (ρ), conocido como resistividad uniforme equivalente con la Ec. (16).

$$\rho_e = \frac{\rho_{a(máx)} + \rho_{a(mín)}}{2} \quad \text{Ec. (16)}$$

En donde:

ρ_e : Resistividad uniforme equivalente, en $[\Omega \cdot m]$.

$\rho_{a(máx)}$: Valor máximo calculado de las mediciones hechas en campo, en $[\Omega \cdot m]$.

$\rho_{a(mín)}$: Valor mínimo calculado de las mediciones hechas en campo, en $[\Omega \cdot m]$.

3.8 Sistemas de protección externa contra descargas atmosféricas en áreas peligrosas

En la mayoría de los procesos industriales (químicos, petroquímicos, petróleo y gas) se almacenan, producen y/o transportan sustancias peligrosas que, al mezclarse con el aire en concentraciones adecuadas, generan una atmósfera con peligro de explosión y en presencia de una fuente de energía, térmica o eléctrica, se corre el riesgo de producir una ignición. La presencia de atmósferas explosivas es considerada como “áreas peligrosas” o “con peligro de explosión”.

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012 en sus Artículos 500 al 504, clasifican a las áreas peligrosas de acuerdo al material combustible presente; así como la frecuencia y tipo de permanencia con que se encuentra en el lugar, de esta forma, el área peligrosa queda definida por Clase, División y Grupo a la que pertenece. Sin embargo, en tema de protección contra descargas atmosféricas, la norma NMX-J-549-ANCE-2005 en su capítulo quinto, dicta las recomendaciones para áreas con peligro de explosión.

Consideraciones generales en áreas peligrosas

1. La protección debe realizarse mediante la instalación de un SEPTE aislado, a menos que se indique lo contrario.
2. La unión equipotencial debe satisfacerse completamente, ya que una sola conexión mal realizada u omitida puede producir arcos eléctricos, produciendo a su vez zonas de alta temperatura que pueden generar condiciones para la ignición. El único arco que no puede evitarse es el canal principal del rayo.
3. La instalación de un SEPTE aislado debe ser diseñado con un Nivel I de protección, y sus elementos de intercepción y de conducción de la corriente de rayo deben estar a una distancia mínima de 2 m de cualquier elemento de la estructura a proteger o mayor si la distancia de seguridad así lo determina
4. Los conductores de bajada utilizados deben ser de un solo tramo o estar unidos por medio de soldadura exotérmica.
5. Para el Sistema de Puesta a Tierra, debe utilizarse un arreglo en trayectoria cerrada alrededor de la estructura a proteger y la resistencia a tierra no debe ser mayor a 10Ω .
6. La unión equipotencial debe realizarse entre los componentes del SEPTE aislado y las partes metálicas de la estructura a proteger a nivel de suelo, y en donde la separación entre las partes metálicas sea menor que la distancia de seguridad estimada con un factor $k_c=1$.

3.9 Sistema de protección interna contra descargas atmosféricas

3.9.1. Unión equipotencial.

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

Los elementos que deben utilizarse para lograr la UE son los siguientes:

Puentes de unión: Son conductores que se utilizan para interconectar dos partes metálicas. La longitud de estos conductores debe ser lo más corta posible.

Barras o placas de unión: Las barras se utilizan para interconectar, mediante los puentes de unión, elementos metálicos de diversos sistemas (eléctrico, telecomunicaciones, gas, agua, etc.), así como los elementos estructurales metálicos de la instalación a un solo punto de unión. Las conexiones de los diferentes servicios o elementos metálicos en cada barra de unión deben realizarse en forma radial.

Dispositivos de protección contra transitorios: Estos dispositivos se utilizan para la protección de equipo eléctrico o electrónico sensible.

3.9.2. Puesta a tierra al interior del edificio o estructura

La puesta a tierra de los equipos eléctricos, electrónicos, estructuras metálicas, tuberías, etc., que se encuentran en el interior del edificio o estructura, representa, entre otras cosas, un medio de seguridad, cuyo objetivo principal es garantizar la operación confiable y la integridad física de los equipos ante condiciones anormales, así como la integridad física de las personas. La puesta a tierra debe satisfacer lo estipulado en la NMX-J-549-2005, así como lo indicado en el artículo 250 de la NOM-001-SEDE para instalaciones eléctricas.

3.9.3. Dispositivos de protección contra transitorios

La norma de referencia utilizada para el diseño y prueba de los dispositivos de protección contra transitorios (SPDs) es la UL 1449, Standard for Safety – Surge Protective Devices. El estándar define al SPD como “un dispositivo compuesto de por lo menos un componente no lineal y destinado a limitar tensiones transitorias sobre un equipo al derivar o limitar la corriente transitoria y con capacidad de repetir estas acciones”.

La forma en que opera los SPDs es a través de la diferencia de potencial en sus terminales, es decir, un SPD permanecerá pasivo hasta que un voltaje de línea exceda el voltaje de encendido de los componentes internos del SPD, como se muestra en la Figura 34, cuando eso ocurre, los componentes del SPD se vuelven conductores y derivan el exceso, sin embargo, dado que existe una resistencia al paso de corriente a través del SPD, se producirá un voltaje remanente el cual se propagará a la carga.

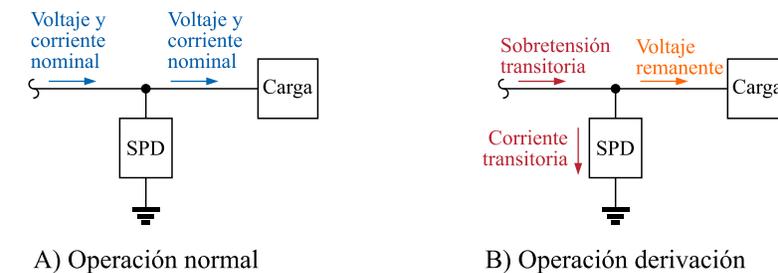


Figura 34: Operación del dispositivo de protección contra transitorios.

La UL 1449, desde su tercera edición publicada en el 2009 introdujo nuevos términos con el fin de establecer una compatibilidad entre las normas IEC, IEEE y NEC; su última edición (5ta. Ed. 2021) clasifica a los SPDs en 5 tipos:

SPDs Tipo 1: SPDs conectados permanentemente, diseñados para la instalación entre el secundario del transformador de servicio y el lado línea del dispositivo de protección contra sobrecorriente de la acometida (medio principal de desconexión), así como el lado carga, incluye las bases de los medidores watt-hora con envoltorio y SPDs de caja moldeada diseñados para instalarse sin un dispositivo de protección de sobrecorriente externo. Los SPDs Tipo 1 o apartarrayos secundarios son destinados para el uso de la categoría C, sin embargo, también pueden ser usados en el lado las categorías A y B.

SPDs Tipo 2: SPDs conectados permanentemente y diseñados para la instalación en el lado carga del dispositivo de sobrecorriente de la acometida (medio principal de desconexión), incluye SPD localizados en tableros derivados y SPDs de caja moldeada. Los SPDs Tipo 2 pueden tener los mismos valores nominales de los SPDs Tipo 1, por lo tanto, pueden considerarse para las categorías B y C.

SPDs Tipo 3: SPDs de punto de utilización, instalados a una longitud mínima de 10 m de la acometida (medio principal de desconexión) al punto de utilización. Por ejemplo, regletas multicontacto, SPDs enchufables, receptáculos y supresores instalados en el punto de utilización del equipo a proteger. La distancia (10 metros) es exclusiva de los conductores provistos con o utilizados para conectar SPDs.

Componentes de ensamble Tipo 1, 2 y 3: Consiste en un conjunto de componentes del Tipo 4 con protección interna o externa contra cortocircuitos. Estos tipos de SPDs son diseñado sólo para ser instalados en fábrica, en otra pieza, como un tablero de control o tablero de distribución.

Componentes de ensamble Tipo 4: Componentes de ensamble que constan de uno o más componentes Tipo 5, mismos que la UL define como aquellos que “se diseñan solamente para la instalación en fábrica de otro componente, dispositivo o producto.”

Componentes Tipo 5: Componentes discretos de supresión de transitorios, como los varistores de óxidos metálicos (MOVs) que pueden ser montados en placas de circuito impreso.

NOTA:

1. Se debe entender por “conectados permanentemente” por la conexión en campo de las terminales del SPD al sistema de cableado de un equipo.

2. Los SPD UL 1449 tipo 1 son diseñados y aprobados para aplicaciones del lado de línea adelante de la desconexión de acometida principal sin protección contra sobrecorriente adicional. Los SPD tipo 2 deben ser instalados en el lado de carga del dispositivo de protección contra sobrecorriente principal. Todas las instalaciones deben proporcionar o incluir un medio de desconexión.

Valores nominales de los SPDs bajo la norma UL 1449 5ta Ed.

Maximum Continuous Operating Voltage (MCOV): Es el voltaje máximo que se puede aplicar a un SPD sin causar su operación. MCOV se define como el valor RMS máximo de diseño a la frecuencia de la red de la onda de voltaje que puede ser aplicado de forma continua entre las terminales del SPD. El valor del MCOV es importante cuando se determina si el MCOV es suficiente para la aplicación de un SPD en algún sistema con un voltaje nominal particular.

Measured Limiting Voltage (MLV): Es la máxima magnitud de voltaje, medida en las terminales de un SPD después de aplicar un impulso con determinada forma de onda y amplitud.

Voltage Protection Rating (VPR): Representa un nivel de protección estandarizado que asigna la norma UL 1449 a cada modo de protección de un SPD. EL valor VPR se determina al promediar los valores MLVs obtenidos al aplicar tres impulsos de onda combinada de 6 kV/3 kA y comparar el promedio con una tabla de valores establecida por la UL. La clasificación resultante es el valor VPR estándar (330 V, 400 V, 500 V, 600 V, 700 V, 800 V, 900 V, 1000 V, 1200 V, 1500 V, 1800 V, 2000 V, 2500 V, 3000 V, 4000 V, 5000 V, 6000 V).

Nominal Discharge Current (In): Es el valor pico de corriente que un SPD puede descargar repetidamente a través de sus terminales sin sufrir daño, degradación o un algún cambio en el valor

MLV. El estándar UL 1449 establece que la prueba de corriente de descarga nominal debe aplicarse 15 veces en grupos de 5, con la onda impulsiva de corriente 8/20 μ s de corto circuito, por modo (L-L, L-N, L-G y N-G). Los valores pico estándar son: 10 kA o 20 kA para el SPD Tipo 1 y 3 kA, 5kA, 10kA o 20 kA para el SPD Tipo 2; la prueba de corriente de descarga nominal para los SPDs Tipo 3 no está definida.

Surge Current Rating: También denominado “Surge Capacity”, es un valor no estandarizado que proporciona el fabricante, está relacionado con la cantidad de corriente pico que un SPD puede derivar de forma segura. El valor puede presentarse por modo o por fase como la suma total de la capacidad de corriente de cada componente de un SPD.

Short Circuit Current Rating (SCCR): Es el valor RMS de la corriente de cortocircuito simétrica que un SPD debe poder soportar o interrumpir. El valor SCCR debe ser mayor o igual al nivel de corto circuito disponible en el punto de instalación.

Modos de protección

Un modo de protección se define como la ruta eléctrica que ofrece un SPD al proteger contra transitorios de sobrevoltaje, por ejemplo, para un sistema trifásico conectado en estrella con neutro sólidamente aterrizado, los modos de protección disponibles son: L-L, L-N, L-G y N-G.

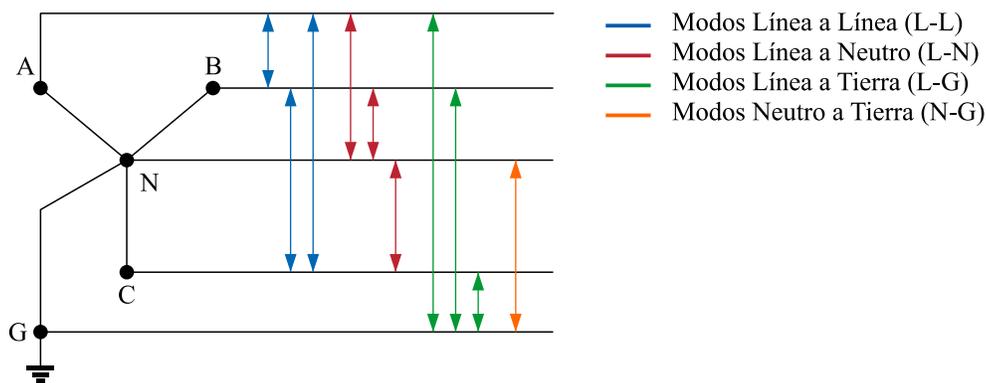


Figura 35: *Modos de protección disponibles en un sistema trifásico conectado en estrella con neutro sólidamente aterrizado.*

Los fabricantes suelen especificar los valores “Surge Capacity” como “Per Mode” o “Per Phase”, los valores “Per Mode” describen la capacidad de derivar la corriente transitoria de un solo modo de protección mientras que los valores “Per phase” es la suma de la capacidad de corriente transitoria de los modos línea a Netro y línea a Tierra conectados a lo largo de cada conductor de fase.

4. Antecedentes del proyecto

Dentro de los hidrocarburos, el gas natural se ha posicionado como un combustible limpio, innovador y rentable, lo que ha provocado el desarrollo de infraestructura para producir/importar, transportar y distribuir este energético en el territorio nacional. El transporte de gas natural se realiza a través del Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural (SISTRANGAS), el cual se encuentra conformado por siete sistemas de transporte de gas natural interconectados e integrados entre sí (Fig. 36), y es operado, gestionado y administrado de forma independiente por el Centro Nacional de Control de Gas Natural (CENAGAS) con participación de particulares en las actividades de Transporte, Almacenamiento y distribución (Fig. 37).

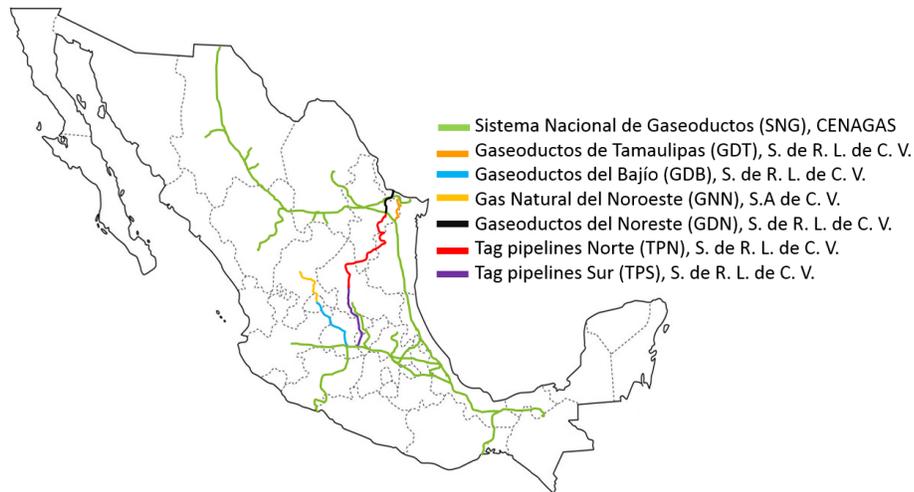


Figura 36: Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural, CENAGAS.

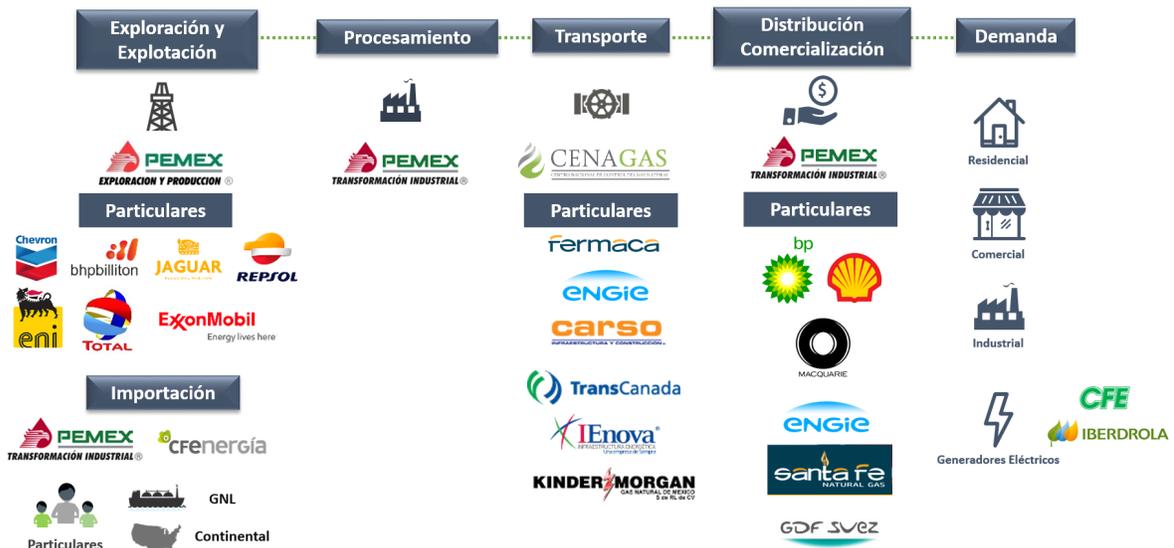


Figura 37: Gestión Técnica de CENAGAS.

La distribución de gas natural a los usuarios finales (residencial, comercial e industrial) se hace a través de una red de tuberías e instalaciones destinadas a la recepción de gas natural denominadas “City Gate” (Fig. 38).

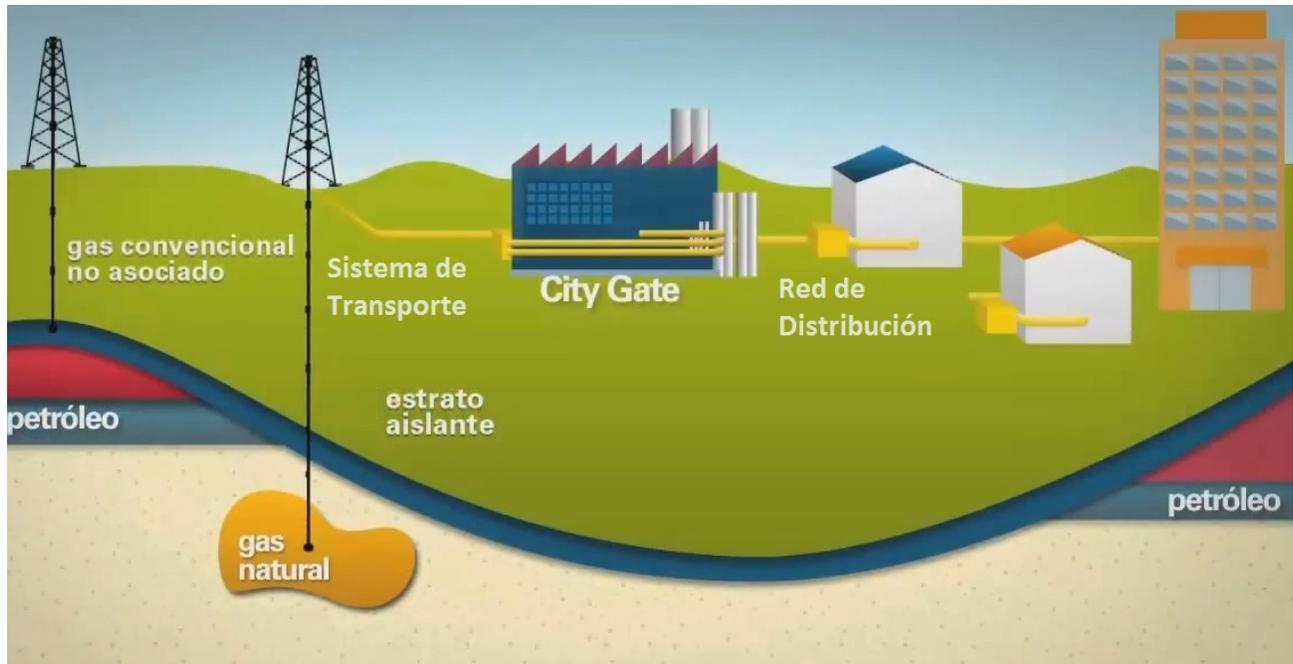


Figura 38: Sistema de transporte y distribución de Gas Natural..

Las Estaciones de Medición, regulación y Control de gas natural a menudo se denominan “EMRyC”, “EMR” ó “City gate”, estas instalaciones tienen la función de recibir, filtrar el gas, reducir, estabilizar y controlar su presión, manteniéndola constante en su salida, dentro de unos límites previamente determinados, independientemente de la presión de entrada y del flujo volumétrico.

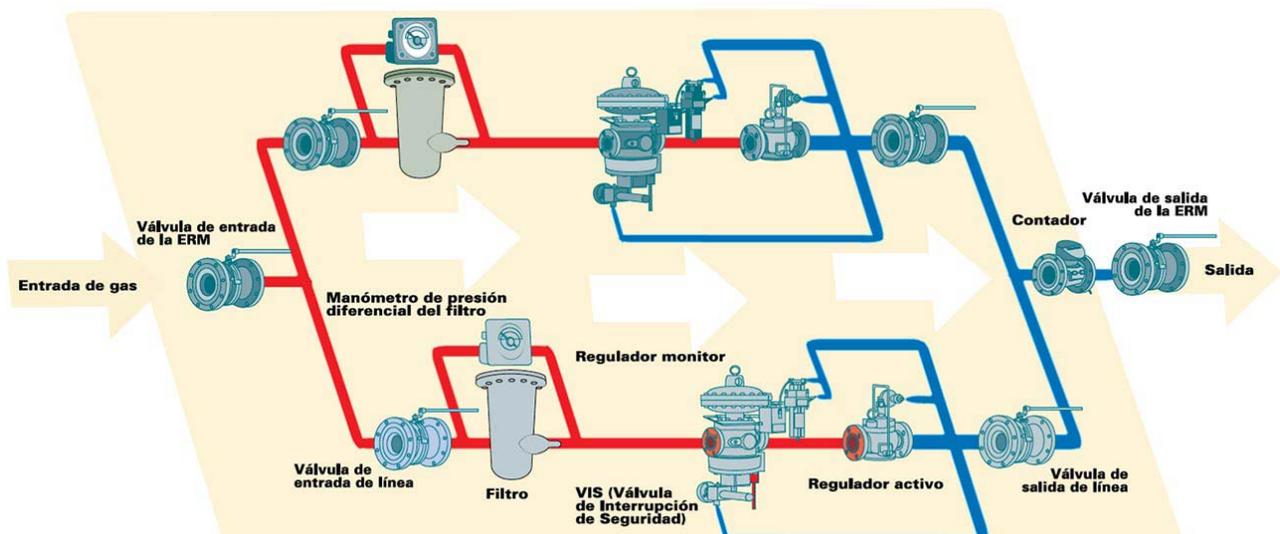


Figura 39: Línea principal (línea en operación) y de reserva..

Una vez que el gas en alta presión entra a la “EMR”, el filtro se encarga de limpiarlo para reducir los daños que éste pueda ocasionar en los equipos de la estación y en otros dispositivos instalados aguas abajo. Después, el regulador principal es el encargado de realizar la regulación del gas que sale a una menor presión de la estación. También juegan un papel muy importante en este proceso la válvula de interrupción de seguridad (VIS), que actúa en función de la presión de salida cerrando en el caso de que la misma supere un valor de sobrepresión determinado, y el regulador monitor, que es un regulador de seguridad que está a la espera de un fallo del regulador principal para entrar en funcionamiento (Fig. 39).

Para poder controlar todas las especificaciones del gas natural, las EMRs incorporan equipos de medición e instrumentación necesarios para controlar el flujo volumétrico de gas emitido a través de las válvulas, estos dispositivos permiten reducir y adecuar la presión del gas desde las redes de transporte hasta el consumidor final; el análogo eléctrico para este tipo de instalaciones serían las Subestaciones eléctricas de distribución.

Los sistemas o equipos que integran a la ERM más completas, son:

1. Sistema de corte por fuga: Válvulas de seguridad cuya función es el corte del suministro de gas natural en caso de falla debido a caída de presión, incremento de volumen, variación respecto al tiempo, etc.
2. Sistema de filtrado: tienen el objetivo de retener partículas tanto sólidas como líquidas que acompañan al hidrocarburo.
3. Sistema de regulación: Válvulas reguladoras de presión cuyo fin es el de regular y reducir la presión de entrada del gas natural, a una presión deseada.
4. Sistema de medición de flujo: Instrumento dedicado a la medición de flujo de una corriente de gas natural, ya sea de forma másica o volumétrica, las hay de placa de orificio, tipo turbina, ultrasónicos, tipo Coriolis etc.
5. Sistema de odorización: Dado que el gas natural es insípido, incoloro e inodoro, se inyecta un odorizante llamado mercaptano, con el objeto de auxiliar al público en la detección y el reconocimiento de la presencia de gas.
6. Sistema SCADA: Permite la supervisión y monitoreo de las funciones de la estación.
7. Cuarto eléctrico o de control: En él se alojan los equipos eléctricos, equipos de control, instrumentación y equipo de telecomunicaciones.

5. Definición del proyecto

5.1 Localización

El proyecto está localizado en la ciudad Silao, en el estado de Guanajuato, como se muestra en la Figura 40.

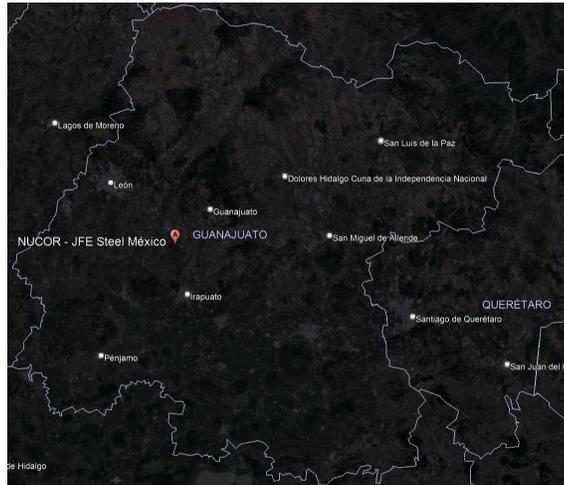


Figura 40: Localización del Proyecto.

5.2 Estructura a proteger: Estación “City Gate Nucor”

La Estación “City Gate Nucor” se ubica en la zona suroeste del terreno de propiedad privada de la compañía Nucor-JFE y es clasificada como una instalación de aprovechamiento de gas natural tipo industrial, ésta debe de operar de manera continua para suministrar el gas a la empresa Nucor-JFE para que pueda llevar a cabo sus procesos de producción de acero.

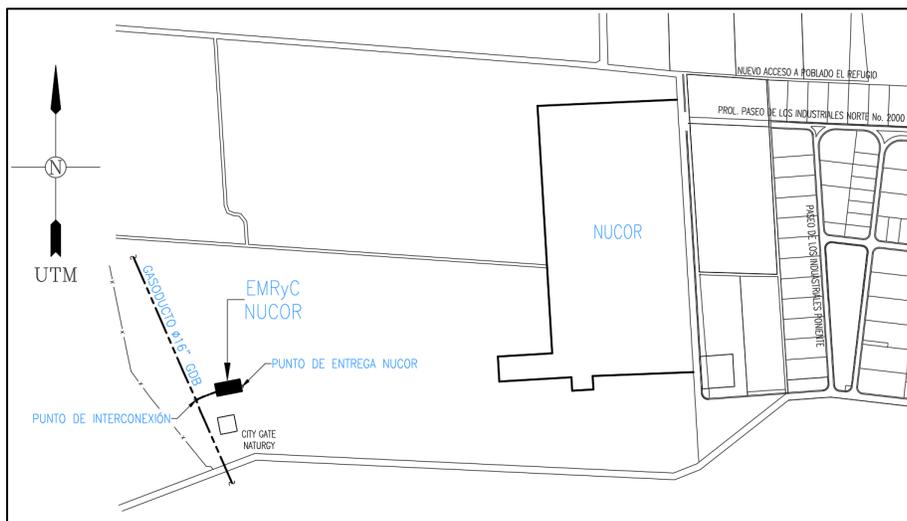


Figura 41: Suministro de gas natural a la Estación City Gate Nucor.

El suministro de gas natural a la estación se hace a través del Gasoducto Valtierra – Aguascalientes de 16 pulgadas de diámetro, el cual es operado por Gaseoductos del bajo (Fig. 41). El gas natural recibido en el punto de interconexión, fluye a través de un ducto de 4 pulgadas de diámetro hacia la City Gate, la cual acondiciona el flujo de gas a las condiciones de presión y temperatura solicitadas por el usuario consumidor Nucor-JFE. El gas natural recibido pasa por los subsistemas que se enlistan a continuación en el orden o secuencia de proceso (ver Fig. 42), con una configuración operativa ‘1+1’ (una operativa y una en reserva) con excepción del sistema de odorización.

1. Sistema de filtración
2. Sistema de medición y regulación de flujo
3. Sistema de regulación de presión
4. Sistema de odorización

Por otro lado, la estación cuenta con un cuarto eléctrico en donde se aloja equipo de control, instrumentación y telecomunicaciones, asimismo aloja un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) para alimentar a las cargas críticas (actuadores en válvulas de control, instrumentos y ruteado satelital).

5.3 Objetivo

Proteger a la RMyC de forma integral contra descargas atmosféricas directas y perturbaciones transitorias de tal modo que se preserve la seguridad del personal, así como, la integridad del equipo eléctrico dentro de la instalación para que pueda operar de manera continua y garantizar la distribución de gas natural al usuario Nucor-JFE.

5.4 Alcance

Analizar y diseñar el sistema integral de protección contra descargas atmosféricas que servirá para proteger al equipo eléctrico-electrónico sensible y al personal dentro de la estación City Gate Nucor.

El sistema de protección externo estará diseñado con puntas simples y el concepto de jaula de Faraday, contemplará el cuarto eléctrico, así como las estructuras en las áreas de proceso (Fig. 42). El sistema de protección interno brindará blindaje contra transitorios de voltaje y de corriente a través de dispositivos SPDs al equipo eléctrico sensible instalado en el cuarto eléctrico (Fig. 43).

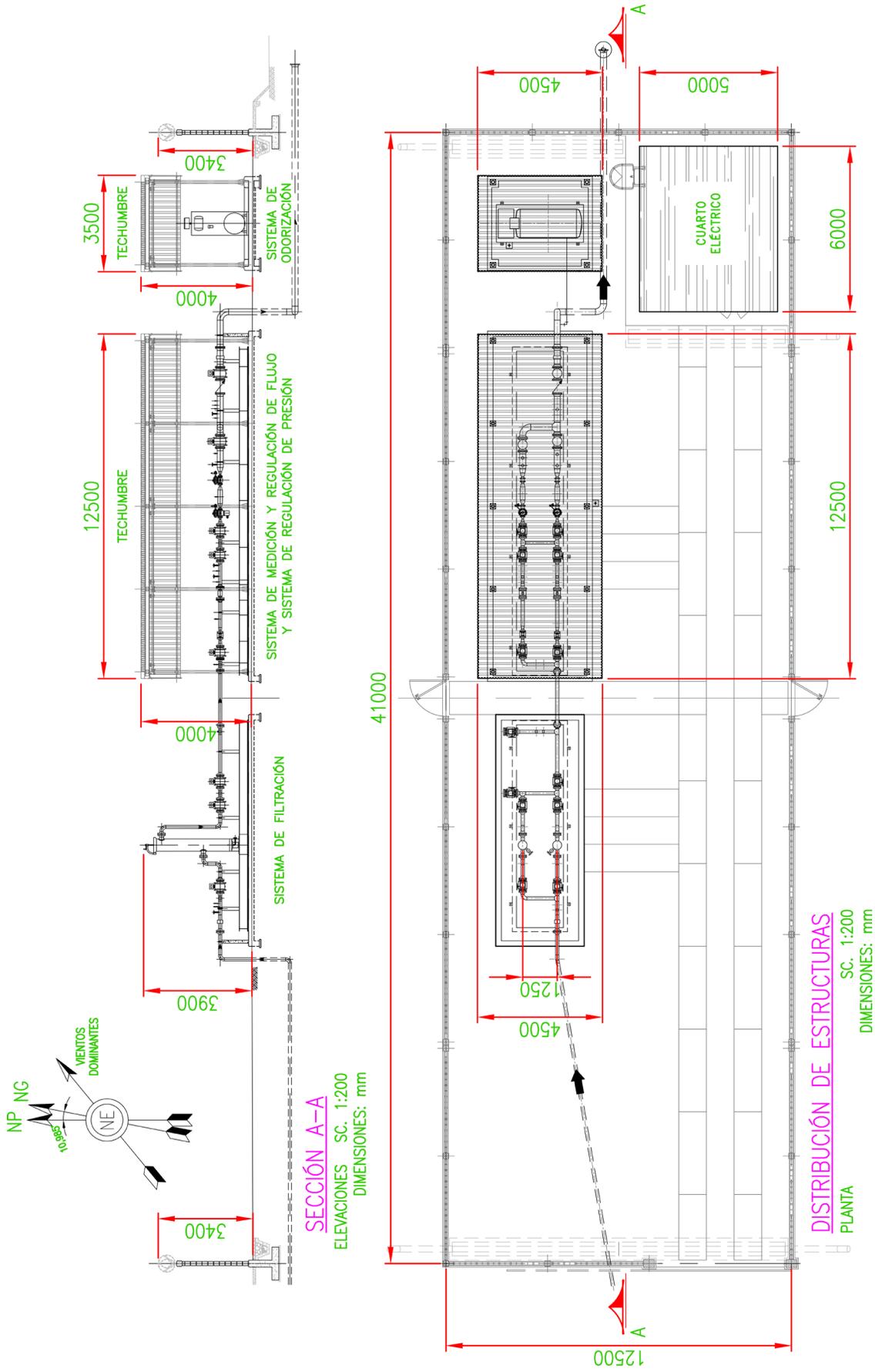
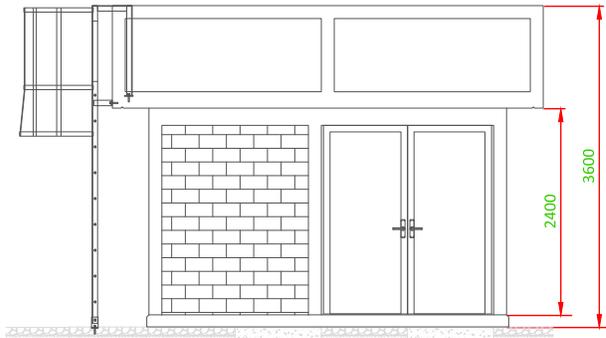
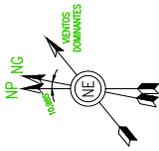
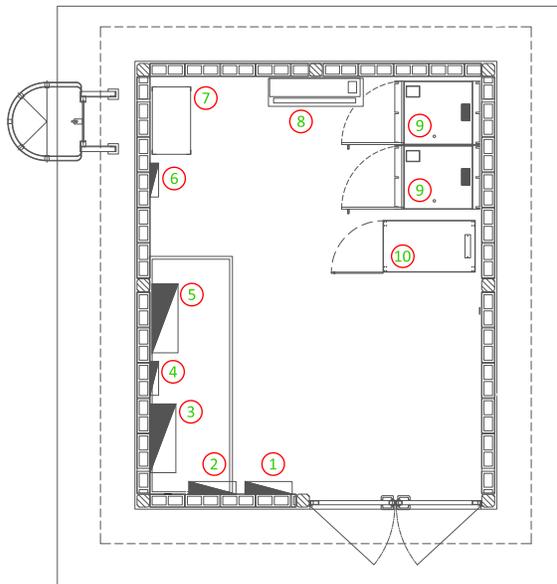


Figura 42: Planta general de la City Gate Nucor.



CUARTO ELÉCTRICO

SC. 1:50
DIMENSIONES: mm



LISTA DE EQUIPOS Y TABLEROS

- ① TABLERO GENERAL DE BAJA TENSIÓN (TGBT-01)
- ② TABLERO DE ALUMBRADO Y CONTACTOS (TA-ALUM-CONT)
- ③ TABLERO ACTUADORES ELÉCTRICOS (TA-ACT-01) ***FUTURO***
- ④ TABLERO (TUPS-01)
- ⑤ GABINETE DE CONTROL (GC-RTU/FQY)
- ⑥ GABINETE PARA INTERRUPTOR DE CAJA MOLDEADA (GI-01)
- ⑦ SISTEMA DE RESPALDO ININTERRUMPIBLE (UPS-01)
- ⑧ MINISPLIT, SOLO FRÍO, 2TON. (HVAC-01)
- ⑨ BANCOS DE BATERÍAS (BB-UPS-01 Y BB-UPS-02) 12 HRS
- ⑩ RUTEADO SATELITAL (VSAT-DL-01)

ARREGLO DE EQUIPOS Y TABLEROS EN EL CUARTO ELÉCTRICO

SC. 1:50
DIMENSIONES: mm

Figura 43: Disposición de equipos y tableros en el cuarto eléctrico, los equipos sensibles están dados por el ruteado satelital, actuadores eléctricos y el equipo de control RTU/FQY.

6. Metodología de diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas

La Figura 44 muestra el proceso de diseño y dependiendo de las características específicas de la estructura, el proceso puede ser algo iterativo.

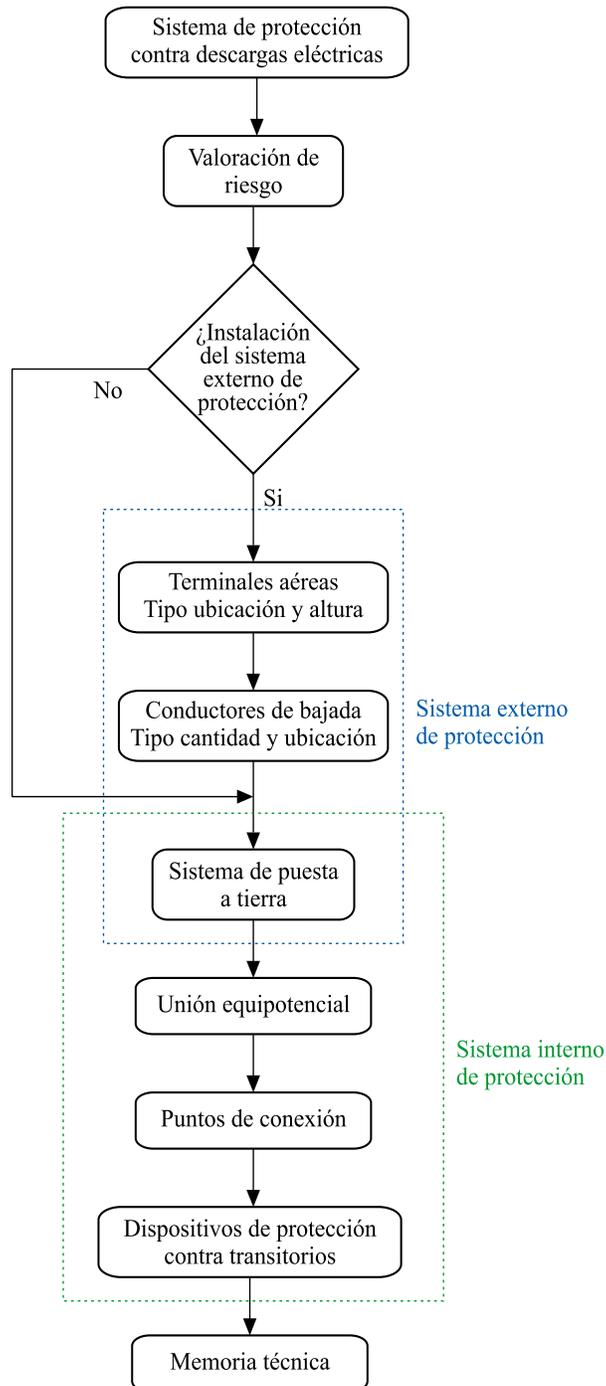


Figura 44: *Proceso de diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas.*

7. Participación profesional

La empresa donde realicé el proyecto es una empresa dedicada a prestar servicios de ingeniería, construcción y consultoría al sector industrial y se especializa en instalaciones de aprovechamiento de gas natural. Su misión es la de desarrollar proyectos competitivos de ingeniería en las disciplinas de ingeniería civil, eléctrica, mecánica, instrumentación y control, de acuerdo a las necesidades del cliente.

Mis actividades asignadas al proyecto fueron:

1. Generar los documentos necesarios de ingeniería para llevar a cabo la obra eléctrica del sistema de protección de la estación “City Gate Nucor”.
2. Elaborar los detalles montaje e instalación del sistema de pararrayos con el objetivo de mostrar con claridad la situación en la que se aplica cada detalle dentro del proyecto, los detalles incluyen la forma de soportarse y se describe los materiales, indicando diámetros, tamaños, número de catálogo de la marca propuesta o una equivalente.
3. Consultar catálogos de los fabricantes a fin de consultar costos y la existencia del material eléctrico empleado en el sistema de protección contra descargas atmosféricas.
4. Coordinarme con las demás disciplinas de ingeniería y con el ingeniero de proyectos con el objeto de consultar información relevante en cuanto a la construcción de la RMyC Nucor a fin de tomar en cuenta las demás instalaciones dentro de la estación y así proyectar de manera segura el sistema de protección.

8. Diseño del Proyecto (resultados obtenidos)

La etapa de diseño define las características y el desarrollo técnico de todo el proyecto: memorias de cálculo, especificaciones, selección de materiales, selección de equipos, mediciones, planos constructivos, etc.

8.1 Especificaciones del sistema de protección contra descargas atmosféricas

8.1.1. Objetivo

Esta especificación cubre las prácticas de ingeniería en protección contra descargas atmosféricas con el cumplimiento de la normatividad vigente y de los estándares de la industria para el diseño del proyecto.

8.1.2. Normas y estándares aplicables

NOM-001-SEDE-2012	Instalaciones Eléctricas (utilización).
NOM-022-STPS-2015.	Electricidad estática en los centros de trabajo. Condiciones de seguridad.
NMX-J-549-ANCE-2005	Sistema de Protección Contra Tormentas eléctricas. Especificaciones, materiales y métodos de medición.
NFPA-780-2014	Standard for the Installation of Lightning Protection Systems.
UL 96	Standard for Lightning Protection Components.
UL 96A	Standard for Installation Requirements for Lightning Protection Systems.
UL 1449	Standard for Safety. Surge Protective Devices.

8.1.3. Descripción del sistema de protección

El sistema de protección contra descargas atmosféricas está definido como un sistema completo compuesto por puntas pararrayos (terminales aéreas), conductores, electrodos de puesta a tierra, dispositivos de protección contra transitorios, conectores y accesorios cuyo propósito es el de salvaguardar personas, equipo eléctrico sensible y edificios del riesgo de daño debido a los efectos directos e indirectos por la descarga atmosférica.

8.1.4. Clasificación de edificios, estructuras y materiales de acuerdo al estándar NFPA-780

Estructuras ordinarias: Estructuras utilizadas para propósitos generales como residencial, comercial, agrícola, industrial, institucional.

Estructuras Clase I: Estructura ordinaria no mayor a 23 metros de altura.

Estructuras Clase II: Estructura ordinaria mayor a 23 metros de altura.

Materiales Clase I: Terminales aéreas, electrodos de puesta a tierra y accesorios asociados para protección de estructuras no mayores de 23 metros de altura.

Materiales Clase II: Terminales aéreas, electrodos de puesta a tierra y accesorios asociados para protección de estructuras mayores de 23 metros de altura.

8.1.5. Consideraciones de diseño del sistema de protección

Terminales aéreas:

Se utilizarán puntas simples de 0.6 metros de altura. El número y ubicación de las terminales aéreas requeridas para la protección de una estructura se obtendrá utilizando el método de la esfera

rodante de la NMX-J-549. Las puntas tendrán una separación máxima de 7,6 m y deberán ser colocadas a lo largo del perímetro de las plataformas, techos planos o techos con ligeras pendientes, estas puntas no podrán ser colocadas a más de 0,6 m de las orillas o esquinas del techo.

Las áreas y zonas de protección serán representadas gráficamente en los planos (planta, cortes y elevaciones) del sistema de protección contra descargas atmosféricas.

Conductores de bajada:

Se utilizarán conductores Clase I para interconectar todas las terminales aéreas a nivel de techo. El conductor no debe formar ángulos menores de 90° y el radio de curvatura no deberá ser menor de 20,3 cm. Cada estructura contará con dos conductores de bajada con una distribución uniforme a lo largo del perímetro, filos y bordes de los techos, de preferencia sobre superficies planas y cuando sea necesario formar trayectorias cerradas. Cada conductor de bajada debe conectar al sistema de puesta a tierra a través de la trayectoria más corta. Las trayectorias de los conductores de bajada deben cumplir con la distancia de seguridad.

Puesta a tierra:

Los electrodos de la red de puesta a tierra de los sistemas de pararrayos deberán permitir su desconexión cuando se realicen mediciones. Para ello, los electrodos deberán contar con medios que permitan su desconexión y que eviten falsos contactos.

Los valores de la resistencia a tierra, deben ser menores o iguales a 10 ohms para el (los) electrodo(s) del sistema de pararrayos, y/o tener un valor menor o igual a 25 ohms para la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra.

En las zonas donde se manejen, almacenen o transporten sustancias inflamables o explosivas, deberán conectarse a tierra las partes metálicas que no estén destinadas a conducir energía eléctrica y que no se encuentren ya inherentemente conectados a tierra, tales como tanques metálicos, cajas metálicas de equipos, maquinaria y tuberías.

Mástiles o postes:

Los mástiles de acero funcionan como elementos captadores y al mismo tiempo como conductores de bajada que deben conectarse al sistema de puesta a tierra. El sistema externo de protección debe diseñarse con un Nivel I de protección, sus elementos de captación y conducción de la corriente de rayo deben cumplir con la distancia de seguridad (s).

8.1.6. Materiales

Puntas pararrayos (puntas simples):

Serán puntas macizas de cobre cromadas de 0,60 m de longitud (24 pulgadas). Las puntas pararrayos se fijarán firmemente al objeto a proteger por medio de bases, las cuales se indicarán en los planos del proyecto. Las bases para puntas pararrayos y el conductor se fijarán con pernos roscados de alta velocidad para acero o concreto, taquetes de plomo y tornillo de bronce o en su defecto con tornillería de acero galvanizado por inmersión, en ningún caso se aceptarán taquetes de fibra, madera o plástico.

Conductores:

El cable de pararrayos será Clase I, calibre 2 AWG (33.6 mm²), de cobre trenzado con 29 hilos y de un diámetro total aproximado de 9.7 mm.

Para la malla de puesta a tierra del sistema de pararrayos se debe utilizar conductor de cobre electrolítico desnudo de alta pureza, trenzado concéntrico, temple semiduro, cableado clase “B”, de calibre 2/0 AWG.

Uniones:

Las uniones entre conductores se reducirán al máximo, las que sean inevitables serán eléctricamente fuertes y de conductividad eléctrica adecuada y segura con un área de contacto no menor del doble del área transversal del conductor.

Soportes:

Los conductores se fijarán sólidamente con abrazaderas de cobre al edificio o estructura donde se coloquen, los soportes tendrán una separación máxima de 0,9 m (Sec. 4.9.6 del NFPA 780-2014).

Electrodos de puesta a tierra:

Tipo de electrodos: Varilla de tierras de acero con recubrimiento de cobre de 0.254 mm de espesor, 19 mm de diámetro y 3 m de longitud.

Ubicación: La varilla de tierras (electrodo), deberá colocarse a una distancia no menor de 0,6 m de la cimentación de la estructura o edificio, enterradas a una profundidad de 0.3 m, bajo el nivel de piso terminado y con una penetración de 3 m como mínimo,

Soldaduras:

- Soldaduras de cable a varilla copperweld.
- Soldadura de cable a cable, derivación tipo “T”.
- Soldadura de cable a cable, derivación tipo “X”.
- Soldadura de cable a cable, derivación tipo “VS”.

- Soldadura de cable a varilla corrugada.
- Soldadura de cable a superficie metálica.

Conectores:

Las conexiones a equipos móviles y algunos equipos fijos se realizarán por medio de conectores de compresión en lo general y en algunos casos con conectores mecánicos, para realizar la conexión a tierras de las partes metálicas. Estos conectores serán:

- Conector de cable a varilla copperweld.
- Conector de cable a zapata terminal.
- Conector de cable a superficie metálica.

Barras o placas de unión:

Las barras para conexiones derivadas a tierra serán de cobre electrolítico, estas barras se instalarán para el sistema de tierras de protección y el sistema de tierras electrónicas, las dimensiones aproximadas serán de 304.8x101.6x6.35mm (12"x4"x1/4"), estará provisto de dos barrenos para fijación de 9.53mm (3/8") y dos aisladores tipo barril para 600 volts.

8.1.7. Dispositivos de Protección contra transitorios (SPDs)

Se instalará un dispositivo de protección contra transitorios en todas las entradas de servicio de energía y en las entradas del equipo eléctrico sensible (comunicaciones, control e instrumentos).

Los SPDs deberán proteger contra transitorios producidos por un generador de onda combinada de 1.2/50 microsegundos de voltaje y 8/20 microsegundos de corriente.

El SPD instalado en la entrada de servicio tendrá una corriente de descarga nominal (I_n) de al menos 20 kA 8/20 microsegundos por fase.

Para señales datos y comunicaciones, los SPDs tendrá una corriente de descarga nominal (I_n) de al menos 10 kA 8/20 microsegundos cuando se instale a la entrada.

El valor VPR (Voltage Protection Rating) nominal del SPD debe ser mayor a la máxima tensión continua disponible de fase a tierra a la frecuencia del sistema en el punto de aplicación para cada modo de protección.

El valor SCCR (Short Circuit Current Rating) del SPD debe ser coordinado con el valor de corriente de falla disponible en el punto de instalación.

El valor MCOV (Maximum Continuous Operating Voltage) del SPD será seleccionado para asegurar que sea mayor que la tolerancia superior del sistema de distribución de la compañía suministradora a la cual es conectado.

8.2 Memoria técnica del sistema de protección contra descargas atmosféricas

8.2.1. Objetivo

Presentar los fundamentos técnicos utilizados para el cálculo de las zonas de protección del sistema de pararrayos, así como el criterio de selección del equipo de protección contra transitorios.

8.2.2. Métodos de cálculo y ecuaciones

- Evaluación de riesgo por impacto de rayo

Cálculo de la frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura

$$N_0 = (N_g)(A_e)(10^{-6})$$

En donde:

N_0 : Frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura, en [rayos / año].

N_g : Densidad promedio anual de rayos a tierra por km^2 , en [rayos / km^2 / año].

A_e : Área equivalente de captura de la estructura, en [m^2].

Cálculo del área equivalente de captura de la estructura

Los objetos vecinos influyen de manera significativa sobre el área equivalente de captura cuando las distancias entre ellos y la estructura son menores que $3(h + h_s)$. Si sucede esta condición, entonces las áreas de captura de cada estructura se traslapan por lo que el área equivalente de cada estructura se debe calcular en función de la distancia equivalente “S”.

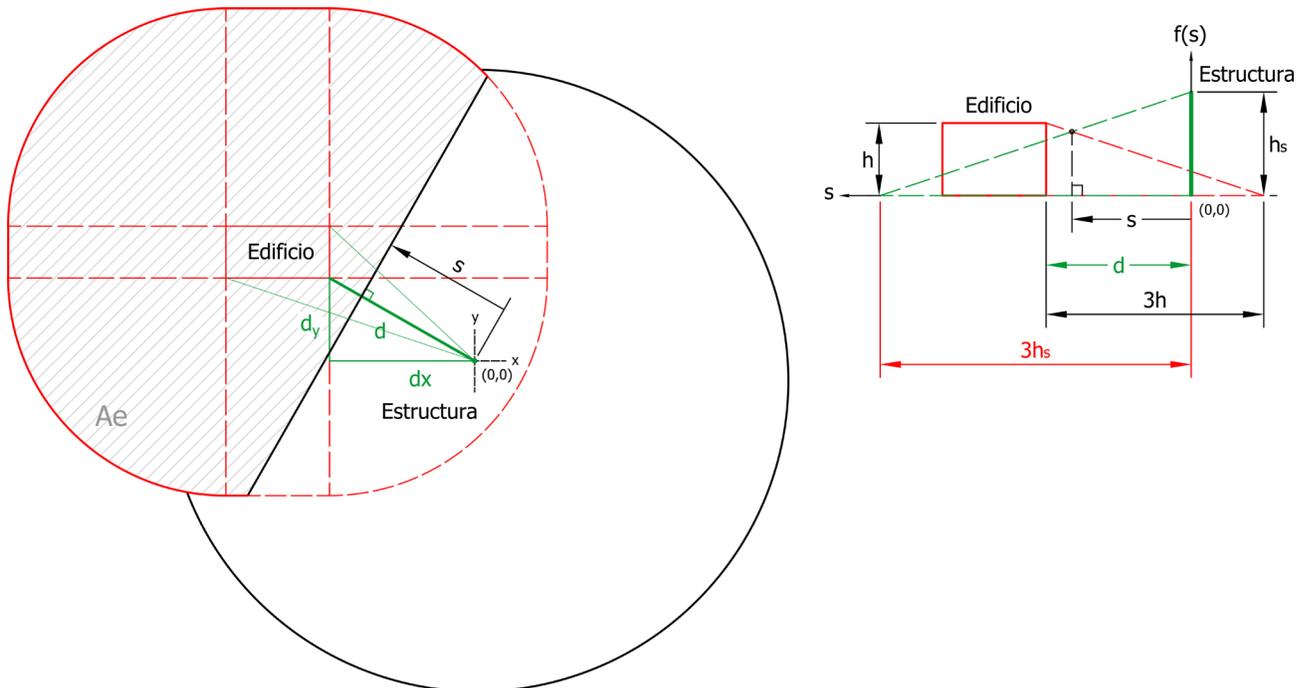


Figura 45: Área equivalente de captura para estructuras cercanas.

$$S = \frac{d + 3(h_s - h)}{2}$$

En donde:

S : Distancia equivalente, en [m].

h_s : Altura de la estructura u objeto cercano, [m].

h : Altura del edificio bajo consideración, [m].

d : Distancia entre el edificio y la estructura cercana, [m].

Frecuencia de rayos directos permitidos a las estructuras (Riesgo por impacto de rayo)

El riesgo por impacto de rayo calcula la probabilidad de incidencia de un rayo directo sobre una estructura. la NMX-J-549 establece valores de acuerdo al tipo, uso y contenido de la estructura (ver Apéndice A). De acuerdo a esto y a las características de la estación “City Gate Nucor” se selecciona el valor con menor riesgo.

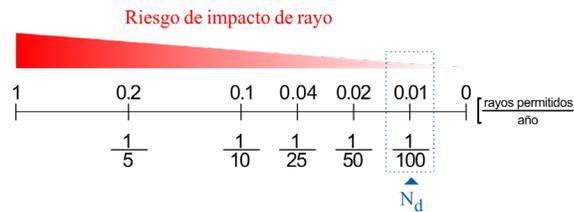


Figura 46: Niveles de riesgo de acuerdo a NMX-J-549-ANCE-2005.

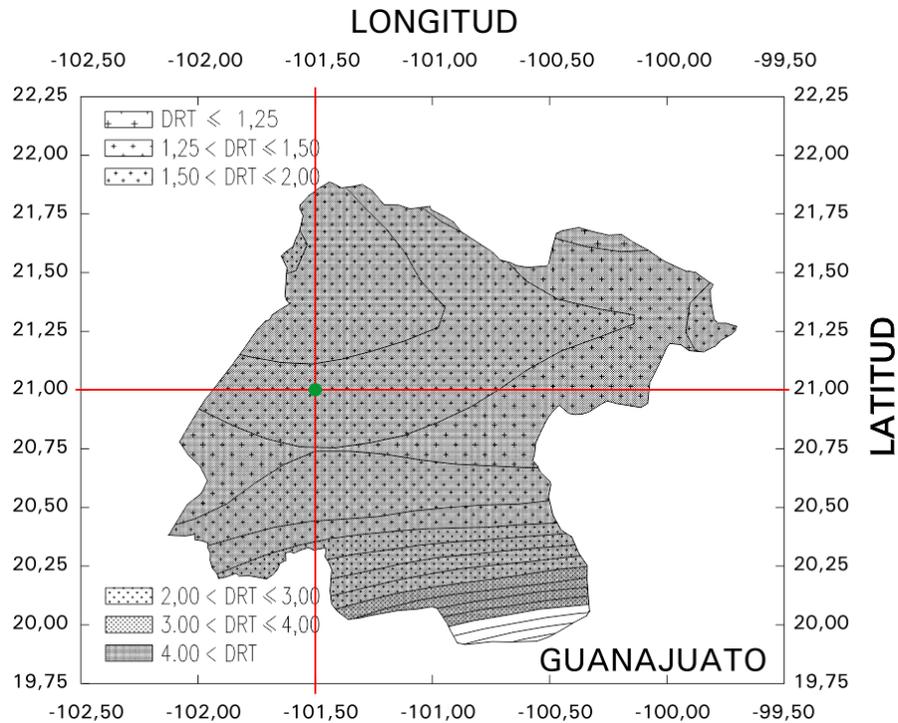


Figura 47: Densidad de Rayos a Tierra en la estación “City Gate Nucor”.

Localización de la estación: Silao de la victoria, Guanajuato, México.

Longitud = -101.449 O, Latitud = 20.9748 N.

Nota. Adaptado de NMX-J-549-ANCE-2005.

Determinación de densidad promedio anual de rayos a tierra por km²

Se selecciona como caso crítico el valor $DRT = N_g = 4,00$ (Fig. 47).

Evaluación de la necesidad de protección

$N_0 \leq N_d$: Sistema externo de protección opcional.

$N_0 > N_d$: Sistema externo de protección necesario.

El sistema de protección contra descargas atmosféricas puede estar formado exclusivamente por el sistema interno de protección siempre y cuando los resultados obtenidos en la valoración de riesgo indiquen que la instalación del sistema externo de protección puede omitirse.

- **Método de la esfera rodante**

La zona de protección será calculada utilizando el método de la esfera rodante para un nivel de protección I con radio de 20 metros de acuerdo con lo indicado en la sección 5.1 de la NMX-J-549-ANCE-2005.

Altura mínima del velo de protección

La altura mínima G que ofrece un velo de protección formado por dos terminales aéreas (puntas simples), se calcula conforme a la siguiente ecuación.

$$G = H - r_s + \sqrt{r_s^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} \quad \text{para } 0 < S < 2r_s$$

Radio horizontal de protección de la esfera rodante

La siguiente ecuación muestra el radio horizontal de protección (R_s) que proyecta la esfera rodante sobre la superficie del terreno:

$$R_s = \sqrt{H(2r_s - H)} \quad \text{para } 0 < H < 2r_s$$

En donde:

G : Altura mínima a proteger, en metros [m].

H : Altura de la terminal aérea sobre el plano de referencia, en metros [m].

r_s : Radio de la esfera rodante, en metros [m].

S : Distancia de separación entre terminales aéreas, en metros [m].

R_s : Radio horizontal de protección de la esfera rodante, en metros [m].

- **Distancia de seguridad**

La distancia de seguridad tiene por objetivo reducir la posibilidad de formación de arcos eléctricos debido al efecto de inducción al transportar la corriente de rayo en los conductores de bajada.

$$s = k_i \frac{k_c}{k_m} l$$

En donde:

s : Distancia de seguridad, en [m].

k_i : Factor de inducción.

k_c : Factor de distribución de corriente.

k_m : Factor de material.

l : Longitud a lo largo del conductor de bajada, desde el punto en que se considera la distancia de seguridad del elemento a evaluar al punto de tierra más próximo, en [m].

Nivel de protección	I	II	III	IV
Factor de inducción, k_i	0.1	0.075	0.05	0.05

Tabla 10: Factor de inducción, NMX-J-549.

Material	Aire	Sólidos (ladrillos, madera, etc.)
Factor de material, k_m	1	0.5

Tabla 11: Factor del material, NMX-J-549.

Número de conductores de bajada	1-2	3-4	>4
F. de distribución de corriente, k_c	1	0.66	0.44

Tabla 12: Factor de distribución de corriente, NMX-J-549.

8.2.3. Cálculos y resultados

- **Evaluación de riesgo por impacto de rayo**

El documento “PL-EL-01: Evaluación de riesgos por impacto de rayo” (ver Apéndice C) muestra un análisis detallado del estudio, la Tabla 13 muestra el resumen de los resultados. La evaluación indica que la frecuencia anual de rayos directos a la estructura (N_0) es menor que los rayos permitidos (N_d) para todas las estructuras, por lo que el sistema de protección externo puede ser opcional, sin embargo, dado la característica de la estación y con el objetivo de garantizar la continuidad del servicio de suministro de gas natural al usuario Nucor-JFE, se instalará el sistema de protección para el blindaje de la estación.

Evaluación por impacto de rayo																	
Tag	Equipo, edificio o estructura		Altura		R=3h [m]	Altura promedio [m]	Distancia de separación		Altura h [m]	Altura hs [m]	Distancia equivalente S [m]	Área equivalente Ae [m ²]	Densidad anual de rayos a tierra Ng [rayos/km ² /año]	Frecuencia anual de rayos directos a la estructura No [rayos/año]	Rayos permitidos a la estructura Nd [rayos/año]	Evaluación	
	Tag	[m]	[m]	Estructuras			d [m]	Estructuras									d [m]
E-01	Skid del sistema de filtración	h-01	3.9	11.7	3.9	3.9	6	E01-E02	3.9	3.95	3.075	301.8	4	0.0012072	0.01	Protección opcional	
		h-02	3.9	11.7													
E-02	Techumbre del sistema de regulación y medición de flujo y del sistema de regulación de presión	h-03	4	12	3.95	3.95	2.24	E02-E03	3.95	3.95	1.12	391.8	4	0.0015672	0.01	Protección opcional	
		h-04	4	12													
		h-05	3.9	11.7													
		h-06	3.9	11.7													
E-03	Techumbre del sistema de Odorización	h-07	4	12	3.95	3.95	2.24	E03-E02	3.95	3.95	1.12	260.8	4	0.0010432	0.01	Protección opcional	
		h-08	4	12													
		h-09	3.9	11.7													
		h-10	3.9	11.7													
E-04	Cuarto eléctrico	h-11	3.7	11.1	3.7	3.7	1.56	E04-E02	3.7	3.95	1.155	374.7	4	0.0014988	0.01	Protección opcional	
		h-12	3.7	11.1													
		h-13	3.7	11.1													
		h-14	3.7	11.1													

Tabla 13: Resultados, Evaluación de riesgo.

• **Distancias de separación y uniones equipotenciales**

Equipo, edificio o estructura	Conductor de bajada	Factor de inducción	Factor de distribución de corriente	Factor de material	Longitud bajo consideración	Distancia de seguridad	Distancia de separación	Evaluación
Tag	TAG	ki	kc	km	L [m]	s [m]	S [m]	S>s
E-01 Skid del sistema de filtración	CB-01	0.1	1	1	4.6	0.46	1.85	Unión equipotencial opcional
E-02 Techumbre del sistema de regulación y medición de flujo y del sistema de regulación de presión	CB-02	0.1	1	1	2.21	0.221	0.7	Unión equipotencial opcional
	CB-03	0.1	1	1	2.256	0.2256	0.685	Unión equipotencial opcional
E-03 Techumbre del sistema de Odorización	CB-04	0.1	1	1	3.122	0.3122	0.973	Unión equipotencial opcional
	CB-05	0.1	1	1	3.122	0.3122	0.973	Unión equipotencial opcional
E-04 Cuarto eléctrico	CB-06	0.1	1	0.5	3.2	0.64	0.2	Unión equipotencial necesario
	CB-07	0.1	1	0.5	3.2	0.64	0.2	Unión equipotencial necesario

Tabla 14: Resultados, distancias de separación y uniones equipotenciales.

La Figura 48 y la Figura 49 muestran la ubicación de los conductores de bajada. Los criterios considerados para reducir la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos son la distancia de separación y las uniones equipotenciales, las uniones equipotenciales son necesarias cuando la distancia de separación es menor a la distancia de seguridad (Tabla 14), las uniones equipotenciales deben cumplir con lo establecido en el artículo 250 de la NOM-001-SEDE-2012.

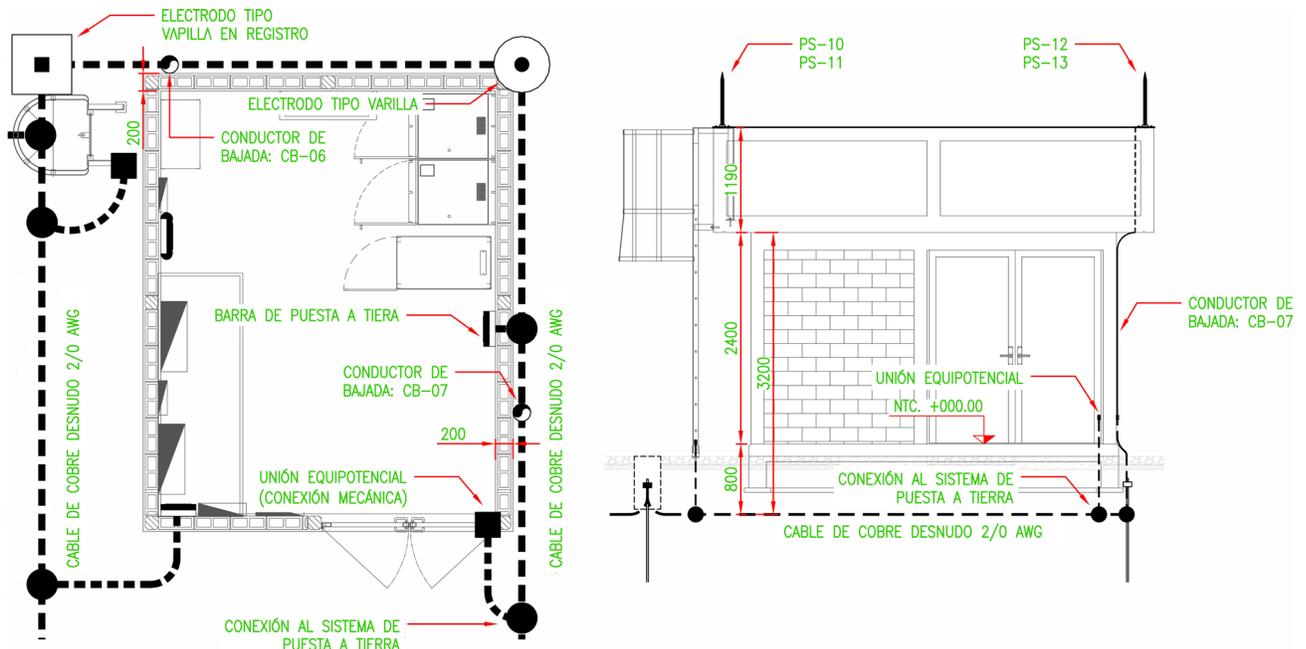


Figura 48: Uniones equipotenciales y distancias de seguridad de los conductores de bajada en el cuarto eléctrico.

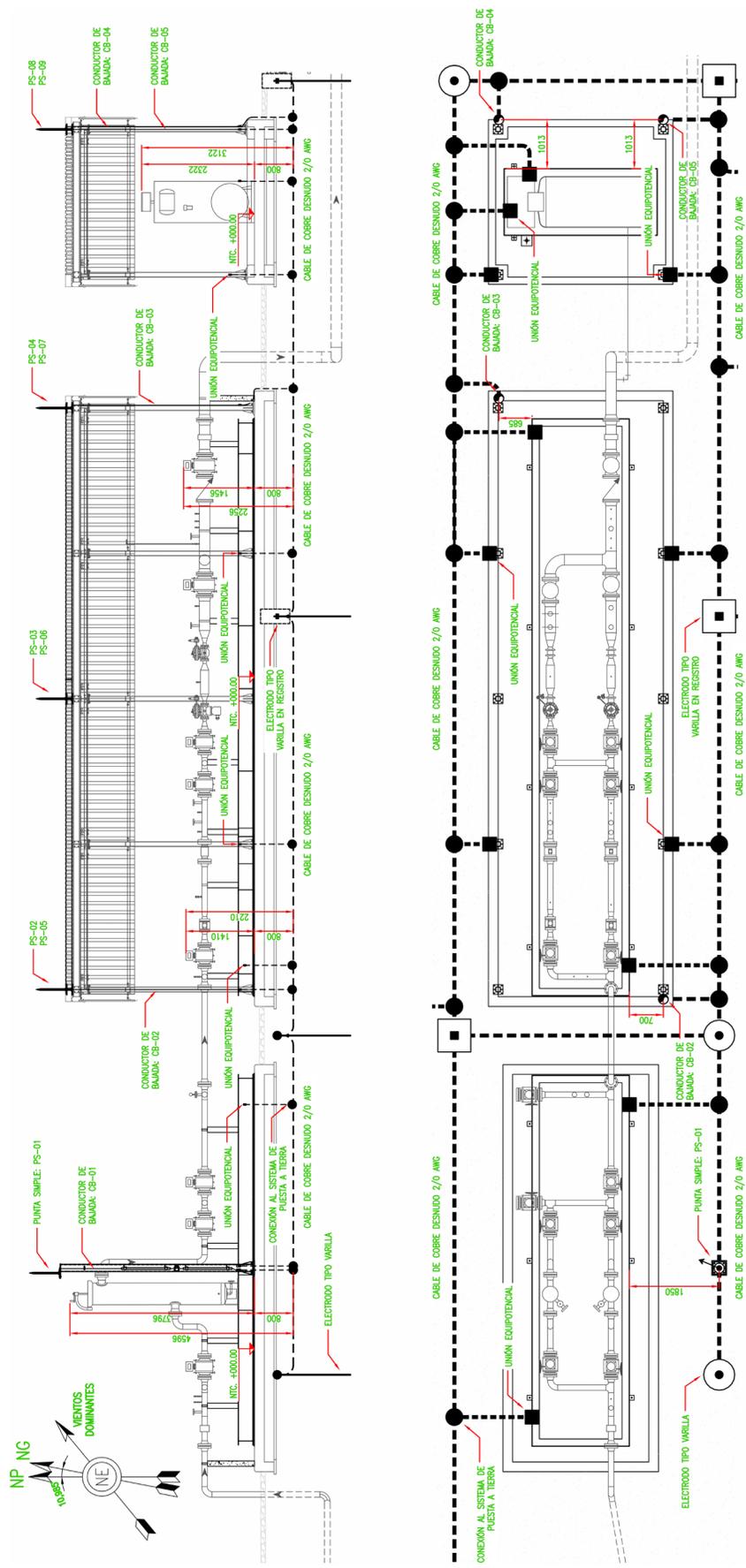


Figura 49: Uniones equipotenciales y distancias de bajada en el área de procesos.

- **Puesta a tierra del sistema de pararrayos**

La resistividad del terreno y el número de electrodos de puesta a tierra son los principales elementos que determinan el valor de resistencia a tierra, la NMX-J-549-ANCE-2005 recomienda valores no mayores a 10 ohms de resistencia a tierra para el arreglo de electrodos del sistema de pararrayos, esto con el objetivo de reducir riesgos de electrocución por potenciales de paso y contacto, además de evitar la formación de arcos laterales entre las partes metálicas que pongan en peligro al personal y equipo en la trayectoria de los conductores de bajada.

El arreglo de electrodos usados en la estación es el “anillo cerrado” enterrado a una profundidad h (Fig. 50).

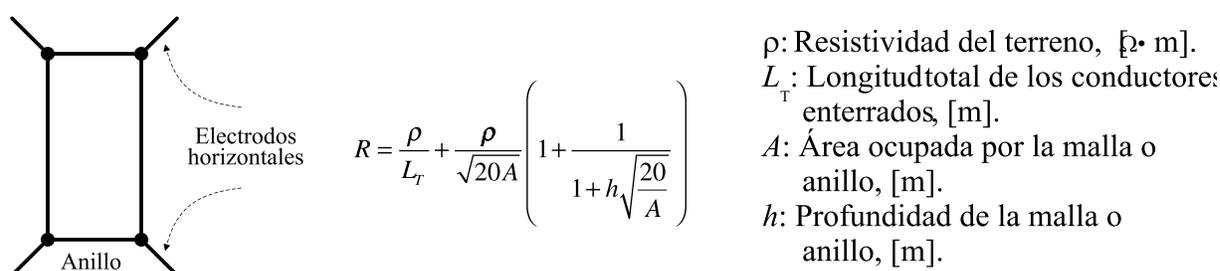


Figura 50: Resistencia de puesta a tierra de Malla o anillo enterrado a una profundidad h .

La puesta a tierra del sistema de pararrayos se efectúa a través de la conexión de los conductores de bajada al anillo cerrado (Fig. 48 y Fig. 49). La resistividad aparente del terreno se calcula al considerar al terreno como homogéneo de dos capas; las mediciones en campo (perfil de resistividad) se muestran en el Apéndice D.

$$\rho = \frac{2.2 + 0.1}{2} = 1.15 [\Omega \cdot m]$$

Se observa que la resistividad aparente es muy baja, esto se debe principalmente al tipo de terreno (terreno de cultivo) y a las condiciones climáticas del año en la que se realizaron las mediciones (temporada de lluvias), así que como práctica de ingeniería se considera un valor de 100 ohms-metro como la resistividad aparente del terreno. La Tabla 15 muestra los resultados de la resistencia a tierra de los electrodos tipo anillo; el documento “PL-EL-03: Sistema general de puesta a tierra” (Apéndice E) muestra el arreglo general de la puesta a tierra de la estación Nucor.

Electrodo tipo anillo	Resistividad [Ω -m]	Longitud [m]	Área [m ²]	Profundidad [m]	Resistencia [Ω]
Anillo perimetral	100	114.8	425	0.8	2.880
Cuarto eléctrico	100	45	60.22	0.8	7.076
Área de procesos	100	65.3	107.365	0.8	5.294

Tabla 15: Resistencia a tierra de electrodos tipo anillo.

- Velos de protección

Tag	Equipo, edificio o estructura	Tipo de estructura (Clasificación NFPA 780)	Pararrayos: Punta simple			Altura de la terminal H [m]	Radio de la esfera rodante r_s [m]	Radio horizontal de protección R_s [m]
			Tag	Tamaño [m]	Altura de montaje [m]			
E-01	Skid del sistema de filtración	Clase I	PS-01	0.6	4.13	4.73	20	12.916
			PS-02	0.6	3.99	4.59	20	12.749
E-02	Techumbre del sistema de regulación y medición de flujo y del sistema de regulación de presión	Clase I	PS-03	0.6	3.99	4.59	20	12.749
			PS-04	0.6	3.99	4.59	20	12.749
			PS-05	0.6	3.87	4.47	20	12.602
			PS-06	0.6	3.87	4.47	20	12.602
			PS-07	0.6	3.87	4.47	20	12.602
E-03	Techumbre del sistema de Odorización	Clase I	PS-08	0.6	3.99	4.59	20	12.749
			PS-09	0.6	3.87	4.47	20	12.602
E-04	Cuarto eléctrico	Clase I	PS-10	0.6	3.72	4.32	20	12.415
			PS-11	0.6	3.72	4.32	20	12.415
			PS-12	0.6	3.72	4.32	20	12.415
			PS-13	0.6	3.72	4.32	20	12.415

Tabla 16: Resultados, distancias de separación y uniones equipotenciales.

Los radios horizontales de protección que proyectan los velos sobre la superficie del terreno de la estación al aplicar el método de la esfera rodante se muestran gráficamente en el documento “PL-EL-01-H1: Sistema externo contra descargas atmosféricas (Hoja 1, Planta)” (ver Apéndice F). La Tabla 16 muestra los resultados al calcular tales radios. Por otro lado, el documento “PL-EL-01-H2” (ver Apéndice G), muestra los velos de protección formados por el método de la esfera rodante. Los velos formados por las puntas franklin deben cubrir por completo a la estructura a proteger, por ejemplo, el velo de protección formado por las puntas simples PS-04 y PS-07 en la “sección transversal B-B” de la techumbre del sistema de regulación y medición de flujo se muestra en la Fig. 51.

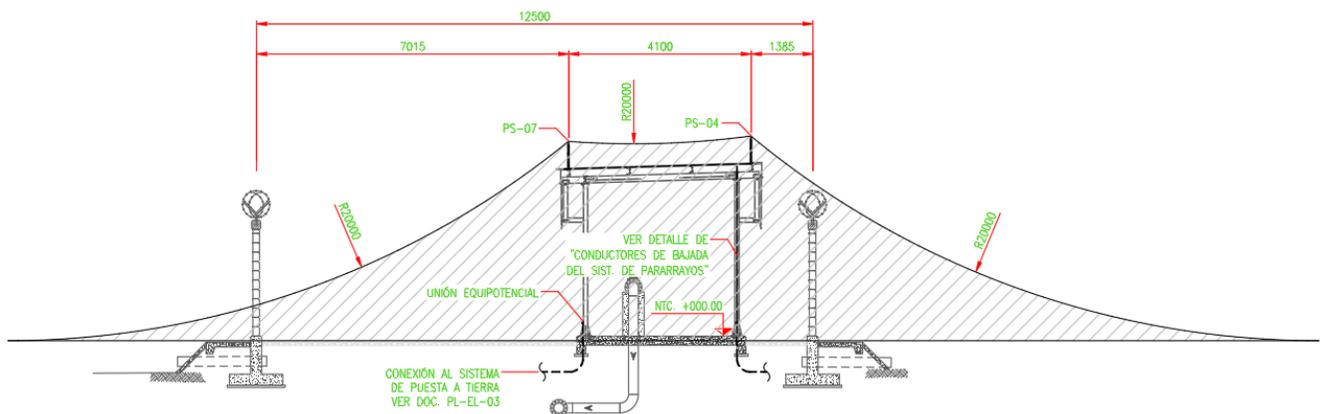


Figura 51: Sección transversal B-B, techumbre del sistema de regulación y medición de flujo.

- **Dispositivo de protección contra transitorios**

De acuerdo al diagrama unifilar de la estación (Apéndice H), a las consideraciones de diseño en este documento y al estándar NFPA-780-2014, los dispositivos de protección se seleccionarán con las características de operación de la norma UL 1449 (Tabla 17).

Equipo a proteger	Sistema	Tipo SPD	Tipo de onda	Corriente nominal de descarga	MCOV
Acometida	3F, 4H + T 220/127 V	Tipo 1 ó 2	Onda combinada 1.2/50 μ s - 8/20 μ s	20 kA	150 V
comunicaciones, control e instrumentos	3F, 4H + T 220/127 V	Tipo 2	Onda combinada 1.2/50 μ s - 8/20 μ s	10 kA	150 V

Tabla 17: Especificaciones del Dispositivo de Protección contra Transitorios.

El dispositivo de protección seleccionado es el SPD BSPA050208Y1P de la serie Bussman de la marca Eaton (Fig. 52).



Descripción	Modelo: BSPA050208Y1P
Terminales	Longitud: 36" Calibre: 10 AWG
Montaje	Con nipple / Tablero
Capacidad de derivar la corriente transitoria	50 kA por fase
Corriente nominal de descarga (In)	20 kA
Corriente nominal de corto circuito (SCCR)	200 kA
Sistema trifásico en Y (4H +T)	120/208 V
Frecuencia de la red	50/60 Hz
Modos de protección	L-N, N-G, L-G, L-L
Voltaje de operación máximo continuo MCOV	150 L-N, 150 L-G, 150 N-G, 300 L-L
Tipo SPD	Aplicación para Tipo 1 y Tipo 2
Grado de protección en envolvente	Nema 4x
RoHS	Sí
Garantía	10 Años

Figura 52: Especificaciones del Dispositivo de Protección contra Transitorios.

El dispositivo de protección se debe de instalar directamente (Fig. 53A), ó con un tramo recto, corto (Fig. 53B), de tubería Conduit en el tablero TGBT-01 como lo muestra el diagrama unifilar de la estación (Apéndice H). Se debe evitar trayectorias a 90° y se debe conectar como lo indica el diagrama de conexiones de la Figura 54.

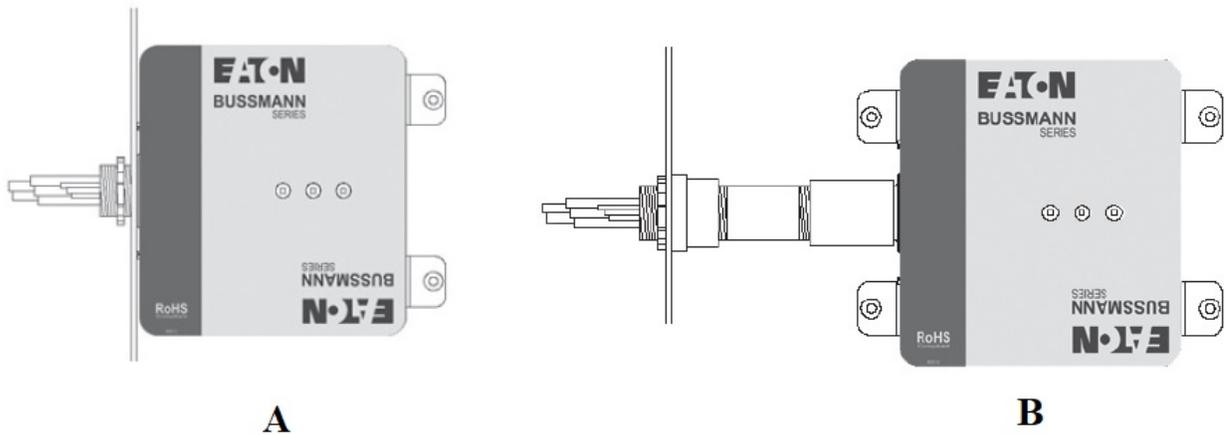


Figura 53: Instalación del SPD.

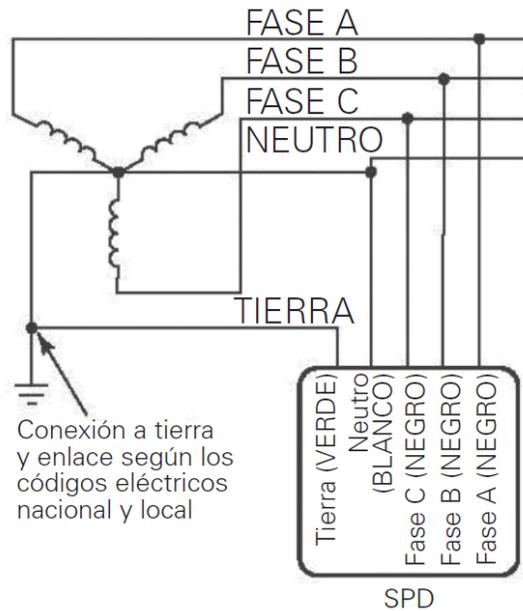


Figura 54: Conexión en estrella (Y), 3 Fases 4 hilos + Tierra.

Los equipos de comunicaciones control e instrumentos estarán protegidos por un sistema de respaldo ininterrumpible en línea de doble conversión (UPS-01, Apéndice H), este equipo corrige las caídas de voltaje y sobrevoltajes transitorios de 65V a 140V (L-N).

9. Conclusiones

En este proyecto se diseñó un sistema integral de protección contra descargas atmosféricas para la estación de medición, regulación y control de gas natural “City Gate Nucor” conforme a las recomendaciones de la norma NMX-J-549 y el estándar NFPA 780.

El sistema de protección externo seleccionado fue el de terminales aéreas convencionales (Puntas franklin), sus velos de protección fueron proyectados a través del método de la esfera rodante para un nivel 1 con radio de protección de 20 metros.

El sistema de protección interno se basó en los conceptos de unión equipotencial, puesta a tierra y protección contra transitorios. El dispositivo de protección contra transitorios debe instalarse en el punto de entrada de la alimentación eléctrica, definido por el tablero principal de la estación. La disipación de energía de una posible descarga atmosférica será realizada de manera segura siempre y cuando el sistema de puesta a tierra se mantenga en óptimas condiciones, y la resistencia de puesta a tierras se mantenga por debajo de los 10Ω para cada arreglo de electrodos por conductor de bajada.

El concepto de unión equipotencial se debe aplicar con el fin de evitar la acumulación de cargas estáticas o bien el de reducir la posibilidad de formación de arcos eléctricos debido al efecto de inducción que se produce al transportar la corriente de rayo en los conductores de bajada, se debe conectar a tierra las partes metálicas que no estén destinadas a conducir energía eléctrica en zonas de la estación donde se maneje o transporte el gas natural y en el cuarto eléctrico.

Los planos de ingeniería del sistema de protección contra descargas atmosféricas desarrollados en este proyecto se muestran en los apéndices E, F y G, éstos son la representación gráfica de la memoria de cálculo, en ellos se concentran los resultados, especificaciones, criterios de diseño, tipos de materiales, arreglos y detalles constructivos e instalación del sistema de pararrayos.

10. Bibliografía

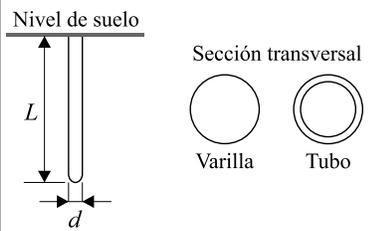
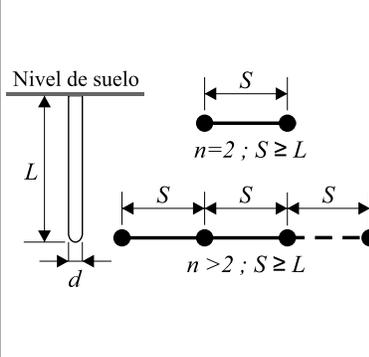
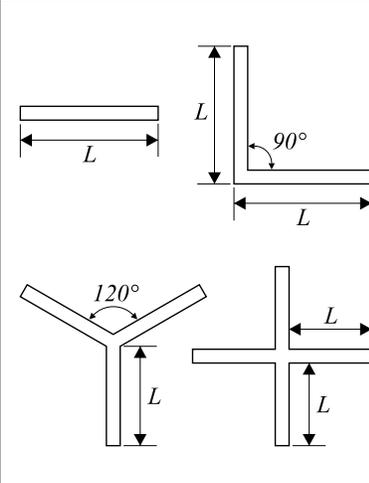
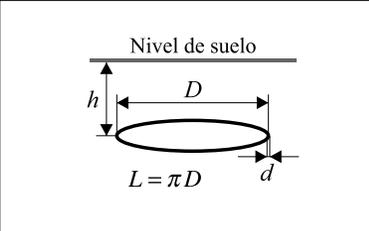
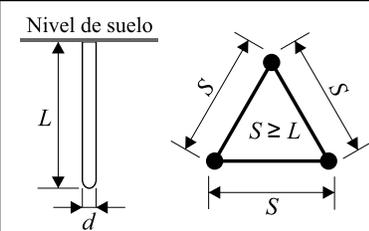
- Asociación de Normalización y Certificación [ANCE]. (2006). *NMX-J-549-ANCE-2005: Sistema de Protección Contra Tormentas Eléctricas - Especificaciones, Materiales y Métodos de Medición*. México D.F.: ANCE.
- Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR]. (2011). *UNE 21186: Protección Contra el rayo: Pararrayos con dispositivo de cebado*. Madrid, España: AENOR.
- CIGRE Report 63. (1991). Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. *Working Group 01 (Lightning) of SC33*.
- Comité Consultivo Nacional de Normalización de Instalaciones Eléctricas. (2012). *NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones eléctricas (utilización)*. Distrito Federal, México: Diario oficial.
- Dehn + Söhne. (2015). *Lightning Protection Guide*. Germany: Dehn + Söhne.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. (2002). *C62.41.2 Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits*. New York: IEEE .
- Instituto de Investigaciones Eléctricas [IIE]. (1999). Descargas atmosféricas y sistema de conexión a tierra. *Boletín iie*, 69-71. Obtenido de <https://www.ineel.mx//elec99/decada.pdf>
- International Electrotechnical Commission [IEC]. (2010). *62305-1. Protection against lightning – Part 1: General principles*. Geneva, Switzerland: IEC.
- International Electrotechnical Commission [IEC]. (2010). *62305-2. Protection against lightning – Part 2: Risk management*. Geneva, Switzerland: IEC.
- International Electrotechnical Commission [IEC]. (2010). *62305-3. Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard*. Geneva, Switzerland: IEC.
- National Fire Protection Association [NFPA]. (2014). *NFPA 780. Standard for the Installation of Lightning Protection Systems*. Quincy, Massachusetts. USA: NFPA.
- nVent ERICO. (2018). *Lightning Protection Consultant Handbook*. nVent.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social [STPS]. (2015). *NOM-022-STPS-2015. Electricidad estática en los centros de trabajo-Condicionales de seguridad*. Ciudad de México: STPS.
- Underwriters Laboratories. (2021). *UL 1449 Standard for Safety for Surge Protective Devices*. Illinois: UL.
- Union Technique de l'Electricité [UTE]. (2011). *NF C 17-102. Protection against lightning: Early streamer emission lightning protection*. Nanterre, France: UTE.
- Vernon, C. (2010). *Lightning Protection*. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology.

Apéndice A. Frecuencia media anual permitida de rayos directos sobre estructuras comunes y niveles de protección recomendados

Estructuras comunes	Efectos de las tormentas eléctricas	Frec. (N _a)	Nivel de protección
Residencia	Daño a instalación eléctrica, equipo y daños materiales a la estructura. Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra.	0,04	III ó IV
Granja	Riesgo principal de incendio y potenciales de paso. Riesgo secundario derivado de la pérdida de suministro eléctrico provocando posibles desperfectos por falla de controles de ventilación y de suministro de alimentos para animales.	0,02	II ó III
Tanques de agua elevados: metálicos. Concreto con elementos metálicos salientes.	Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra, así como posibles daños al equipo de control de flujo de agua.	0,04	III
Edificios de servicios tales como: Aseguradoras, centros comerciales, aeropuertos, puertos marítimos, centros de espectáculos, escuelas, estacionamientos, centros deportivos, estaciones de autobuses, estaciones de trenes, estaciones de tren ligero o metropolitano.	Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	0,02	II
Hospital Asilo Reclusorio	Falla de equipo de terapia intensiva. Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	0,02	I ó II
Industria tales como: Máquinas herramientas, ensambladoras, textil, papelera, manufactura, almacenamiento no inflamable, fábrica de conductores, fábrica de electrodomésticos, armado equipo de cómputo, muebles, artefactos eléctricos, curtidurías, agrícola, cementeras, caleras, laboratorios y plantas bioquímicas, potabilizadoras.	Efectos diversos dependientes del contenido, variando desde menor hasta inaceptable y pérdida de producción.	0,01	I ó II
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de vestigios culturales irremplazables	0,02	II
Edificios de telecomunicaciones Véase nota	Interrupciones inaceptables, pérdidas por daños a la electrónica, altos costos de reparación y pérdidas por falta de continuidad de servicio.	0,02	I ó II
NOTAS			
1 Para cualquier estructura común debe evaluarse el nivel de riesgo en función de su localización, densidad, altura y área equivalente de captura, para decidir la protección.			
2 Para estructuras en zonas con densidad de rayos a tierra mayor a 2, y si el techo de la construcción es de material inflamable (madera o paja), debe instalarse un SEPTÉ.			

Nota. Adaptado de la norma mexicana NMX-J-549-2005.

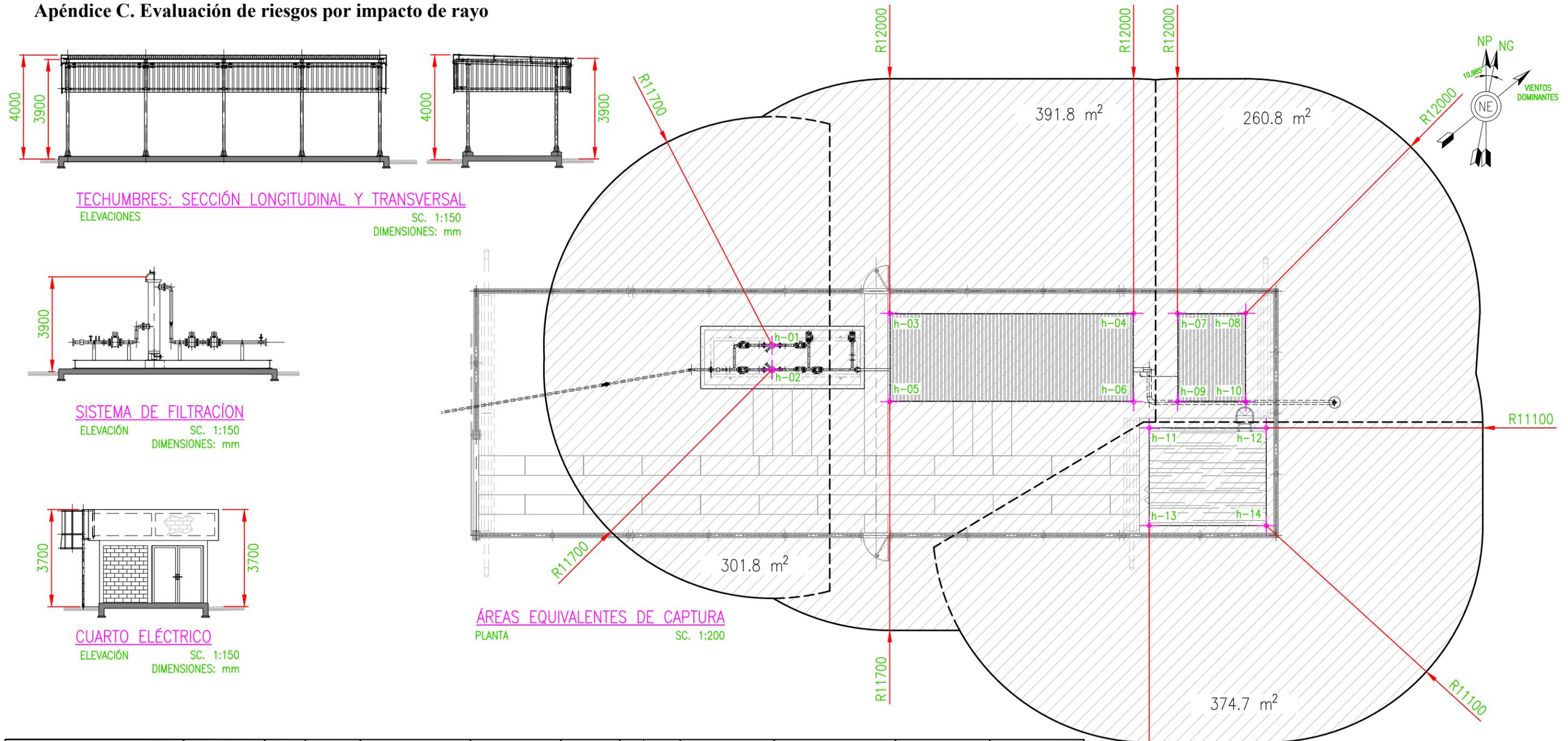
Apéndice B. Electrodo de puesta a tierra, arreglos típicos y cálculo de resistencia a tierra

CONFIGURACIÓN	TIPO DE ELECTRODO	RESISTENCIA A TIERRA [Ω]
	Electrodo de Varilla o Tubería ρ : Resistividad del suelo, [$\Omega \cdot m$]. L : Longitud del electrodo, [m]. d : Diámetro del electrodo, [m].	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right]$
	Conexión en paralelo de 'n' varillas alineadas ρ : Resistividad del suelo, [$\Omega \cdot m$]. L : Longitud del electrodo, [m]. d : Diámetro del electrodo, [m]. S : Distancia de separación, [m]. n : Número de electrodos. λ : Factor de agrupamiento.	<p><i>Para $n=2$; $S \geq L$</i></p> $R = \frac{\rho}{4\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right] + \frac{\rho}{4\pi S} \left[1 - \frac{L^2}{3S^2} + \frac{2L^4}{5S^4} \right]$ <p><i>Para $n > 2$; $S \geq L$</i></p> $R = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 + \frac{\lambda L}{S} \right]; \quad \lambda = 2 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n}$ <p><i>Para $n > 10$; λ puede ser aproximado por:</i></p> $\lambda = 2 \ln \left(\frac{1.781n}{2.718} \right)$
	Conductores redondos o planos (Cintilla o solera) enterrados a una profundidad 'h' ρ : Resistividad del suelo, [$\Omega \cdot m$]. L : Longitud de cada brazo, [m]. d : Diámetro del electrodo, [m]. h : Profundidad del electrodo, [m]. k : Factor de forma.	<p><i>Un solo conductor horizontal</i></p> $R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{L^2}{khd} \right) \quad \begin{array}{ll} C. Redondo & C. Plano \\ k=1.83 & k=1.136 \end{array}$ <p><i>Dos conductores en 'L'</i></p> $R = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \left(\frac{4L^2}{khd} \right) \quad \begin{array}{ll} C. Redondo & C. Plano \\ k=0.813 & k=1.21 \end{array}$ <p><i>Tres conductores en 'Y'</i></p> $R = \frac{\rho}{6\pi L} \ln \left(\frac{9L^2}{khd} \right) \quad \begin{array}{ll} C. Redondo & C. Plano \\ k=0.499 & k=0.734 \end{array}$ <p><i>Cuatro conductores en 'cruz'</i></p> $R = \frac{\rho}{8\pi L} \ln \left(\frac{16L^2}{khd} \right) \quad \begin{array}{ll} C. Redondo & C. Plano \\ k=0.133 & k=0.219 \end{array}$
	Anillo circular de puesta a tierra ρ : Resistividad del suelo, [$\Omega \cdot m$]. d : Diámetro del conductor, [m]. L : longitud del anillo, [m]. D : Diámetro del anillo, [m]. h : Profundidad del anillo, [m].	<p><i>En función del perímetro del anillo</i></p> $R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{16L^2}{\pi^2 hd} \right)$ <p><i>En función del diámetro del anillo</i></p> $R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \left(\frac{16D^2}{hd} \right)$
	Arreglo en Delta de 3 varillas ρ : Resistividad del suelo, [$\Omega \cdot m$]. L : Longitud del electrodo, [m]. d : Diámetro del electrodo, [m]. S : Distancia de separación, [m].	$R = \frac{1}{3} \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 + \frac{2L}{S} \right]$

CONFIGURACIÓN	TIPO DE ELECTRODO	RESISTENCIA A TIERRA [Ω]
	<p>Arreglo circular simétrico de n varillas conectadas en paralelo</p> <p>ρ: Resistividad del suelo, [$\Omega \cdot m$]. L: Longitud del electrodo, [m]. d: Diámetro del electrodo, [m]. D: Diámetro de circunferencia, [m]. S: Distancia de separación, [m]. n: Número de electrodos.</p>	<p>Para $n > 3$; $S \geq L$</p> $R = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{L}{S} \ln\left(\frac{2n}{\pi}\right) \right]$ <p><i>Distancia de separación en función del diámetro de la circunferencia</i></p> $S = D \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right)$
	<p>Electrodos de Placa</p> <p>ρ: Resistividad del suelo, [$\Omega \cdot m$]. A: Área de una de las caras, [m^2].</p>	<p><i>Placa superficial al terreno</i></p> $R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}}$ <p><i>Placa enterrada</i></p> $R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{2A}}$
	<p>Malla de puesta a tierra o anillo cerrado</p> <p>ρ: Resistividad del suelo, [$\Omega \cdot m$]. L_T: Longitud total de los conductores enterrados, [m]. A: Área ocupada por la malla o anillo, [m^2]. h: Profundidad de la malla o anillo, [m].</p>	<p><i>Malla o anillo superficial al terreno</i></p> $R = \frac{\rho}{L_T} + \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{2A}}$ <p><i>Malla o anillo enterrado a una profundidad 'h'</i></p> $R = \frac{\rho}{L_T} + \frac{\rho}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right)$

Nota. Expresiones derivadas del estándar IEEE 142, el estándar IEEE 80 y del estándar británico BS 7430.

Apéndice C. Evaluación de riesgos por impacto de rayo



Equipo, edificio o estructura	Altura	R=3h	Altura promedio	Distancia de separación	Altura	Altura	Distancia equivalente	Área equivalente	Densidad anual de rayos a tierra	Frecuencia anual de rayos directos a la estructura	Rayos permitidos a la estructura	Evaluación			
Tag	Tag [m]	[m]	[m]	Estructuras d [m]	h [m]	hs [m]	S [m]	Ae [m²]	Ng [rayos/km²/año]	No [rayos/año]	Nd [rayos/año]				
E-01	Sistema de filtración	h-01 h-02	3.9 3.9	11.7 11.7	3.9	E01-E02	6	3.9	3.95	3.075	301.8	4	0.0012072	0.01	Protección opcional
E-02	Techumbre del sistema de regulación y medición de flujo y del sistema de regulación de presión	h-03 h-04 h-05 h-06	4 4 3.9 3.9	12 12 11.7 11.7	3.95	E02-E03 E02-E04	2.24 1.56	3.95 3.95	3.95 3.7	1.12 0.405	391.8	4	0.0015672	0.01	Protección opcional
E-03	Techumbre del sistema de Odorización	h-07 h-08 h-09 h-10	4 4 3.9 3.9	12 12 11.7 11.7	3.95	E03-E02 E03-E04	2.24 1.33	3.95 3.95	3.95 3.7	1.12 0.29	260.8	4	0.0010432	0.01	Protección opcional
E-04	Cuarto eléctrico	h-11 h-12 h-13 h-14	3.7 3.7 3.7 3.7	11.1 11.1 11.1 11.1	3.7	E04-E02 E04-E03	1.56 1.33	3.7 3.7	3.95 3.95	1.155 1.04	374.7	4	0.0014988	0.01	Protección opcional

PL-01: EVALUACIÓN DE RIESGO

Apéndice D. Estudio de resistividad del terreno

FORMATOS PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

FORMATO D1 - Medición de la resistividad del subsuelo para líneas de transmisión en construcción

LT: Estructura número: Fecha:

Equipo de medición

Marca: Modelo Núm. de serie Frecuencia de medición Hz

Datos de calibración del equipo de medición

Folio Núm. de identificación Fecha de calibración Fecha de vencimiento

Dirección de la medición (para estructuras autoportadas)

Arreglo A Involucra patas 1 y 3 Arreglo B Involucra patas 2 y 4

Descripción del suelo

Superficie del terreno: Mojado Húmedo Seco Muy seco
 Uso del suelo: Cultivo Cerril Bosque Otros
 Tipo de suelo: Roca Grava Arena Arcilla Limo

Resultado de las Mediciones

Pata No:

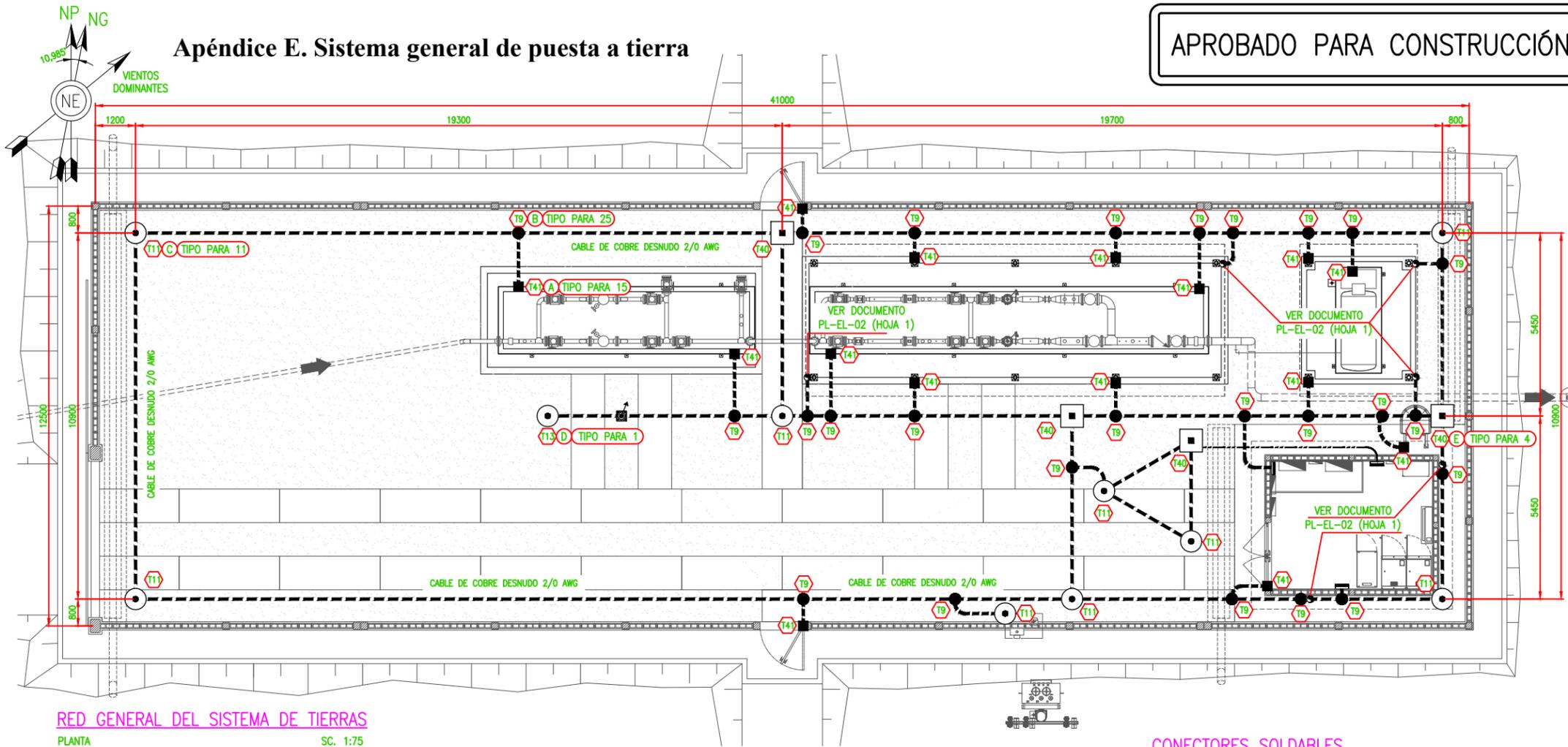
A (m)	R (Ω)	$2\pi a$ (m)	$\rho = 2\pi a R$ (Ωm)	Observaciones
1.6	0.22	10	2.20	Ninguna
3.2	0.07	20	1.40	Ninguna
4.8	0.03	30	0.90	Ninguna
6.4	0.03	40	1.20	Ninguna
8.0	0.02	50	1.00	Ninguna
9.6	0.01	60	0.60	Ninguna
11.2	0.01	70	0.70	Ninguna
15.0	0.01	10	0.10	Ninguna
20.0	0.01	20	0.20	Ninguna
25.0	0.01	30	0.30	Ninguna

Donde: a : separación entre electrodos
 R : resistencia medida
 ρ : resistividad del subsuelo

NOTA: En la medición con la distancia $a = 1.6$ m, la profundidad máxima de los electrodos verticales debe ser de 16 cm y para las otras mediciones debe ser, de preferencia, menor a 32 cm.

Apéndice E. Sistema general de puesta a tierra

APROBADO PARA CONSTRUCCIÓN



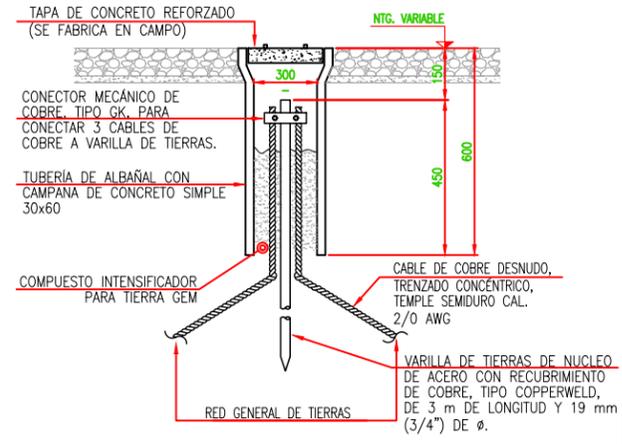
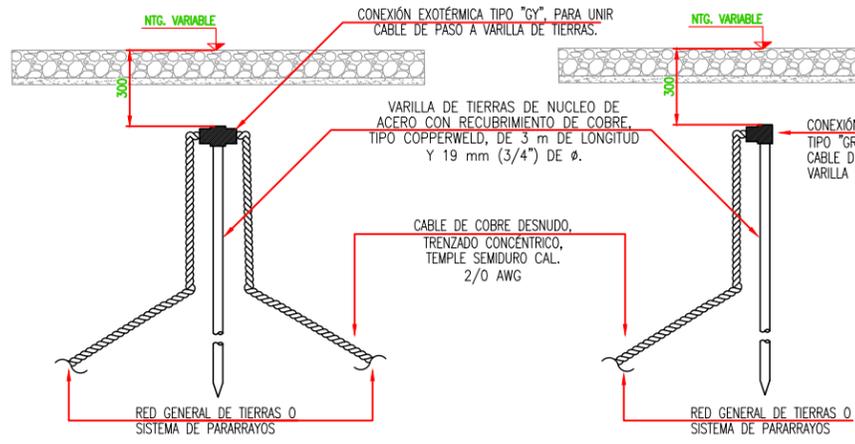
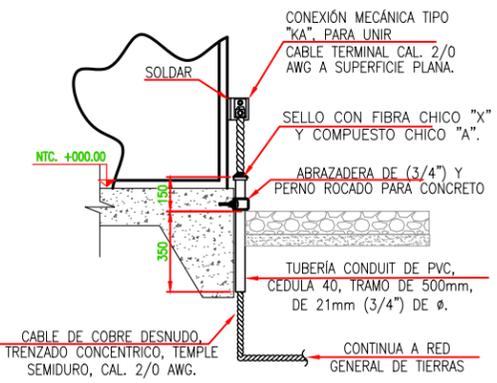
RED GENERAL DEL SISTEMA DE TIERRAS
PLANTA SC. 1:75

CONECTORES SOLDABLES

CLAVE	TIPO	CANTIDAD	UNIDAD	CONDUCTOR PASO	CONDUCTOR DERIVADO	MOLDE CATALOGO	CARTUCHO "O" CARGA
T9	TA	25	PZA.	2/0 AWG	2/0 AWG	TAC-262G	90
T11	GY	9	PZA.	2/0 AWG	VARILLA 19 mm.	GYE-332G	115
T13	GR	1	PZA.	2/0 AWG	VARILLA 19 mm.	GRC-332G	90

CONECTORES MECÁNICOS

CLAVE	TIPO	CANTIDAD	UNIDAD	CONDUCTOR PASO	CONDUCTOR DERIVADO	CATALOGO
T40	GK	4	PZA.	VAR. 19 mm.	(4 -2/0)	GK6426
T41	KA	15	PZA.	EQUIPO/ESTRUC.	(1-4/0)	KA28



NOTAS GENERALES:

1. TODA LA INSTALACIÓN, CUMPLIRÁ CON LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEDE-2012 "INSTALACIONES ELÉCTRICAS" (UTILIZACIÓN).
2. TRABAJAR ESTE PLANO EN CONJUNTO CON LOS PLANOS DE REFERENCIA.
3. EL CABLE DE LA MALLA DE TIERRAS PRINCIPAL DEBERÁ IR ENTERRADO A UNA PROFUNDIDAD MÍNIMA DE 800 mm CON RESPECTO AL NTC.
4. EN CASO DE ENCONTRAR CIMENTACIONES EN LA TRAYECTORIA DE LA RED DE TIERRAS SE DEBERÁN LIBRAR ESTAS INTERFERENCIAS RODEÁNDOLAS, ASÍ COMO LAS INSTALACIONES DE ELECTRODOS QUE ESTEN SOBRE CIMENTACIONES O DUCTOS, ESTOS SE LIBRARÁN TAMBIÉN.
5. LOS CONECTORES DEBERÁN TENER UN RECUBRIMIENTO DE ESTAÑO PARA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN.
6. CONSULTAR LAS CARGAS Y TIPOS DE LAS CONEXIONES EXOTÉRMICAS EN LA TABLA DE CONEXIONES SOLDABLES.
7. EL CABLE DESNUDO (DERIVACIÓN) DE LA DELTA DE PUESTA A TIERRA PARA EQUIPO ELECTRÓNICO DEBE CONECTARSE A LA RED GENERAL DE TIERRA CON UN CABLE DE CAL. 2/0 AWG.
8. EL CONDUCTOR QUE SALE DE LA RED SUBTERRANEA (MALLA) HACIA LOS EQUIPOS DEBERÁ SER MÍNIMO DEL CALIBRE 67.43 mm² (2/0 AWG).
9. LAS CONEXIONES SUBTERRANEAS PARA EL SISTEMA DE TIERRAS SON DEL TIPO SOLDABLES Y PARA LAS CONEXIONES A EQUIPOS METÁLICOS, TUBERIAS Y RECIPIENTES, SE INSTALARÁN CONECTORES MECÁNICOS.
10. LOS CABLES ENTERRADOS SERÁN INSTALADOS A UNA PROFUNDIDAD MÍNIMA DE 800 mm. BAJO NTC.
11. LAS COLUMNAS METÁLICAS SE CONECTARÁN A LA MALLA DE TIERRAS ALTERNADAMENTE, LA CONEXIÓN SERÁ CON CONECTORES SOLDABLES TIPO TA, PARA CALIBRE 67.43 mm² (2/0 AWG).
12. CUANDO LA PLACA DE CONEXIÓN NO SEA SUMINISTRADA POR EL PROVEEDOR DEL EQUIPO, UTILIZAR UN CONECTOR MECÁNICO DE COBRE TIPO ZAPATA TERMINAL DE 1 BARRENO PARA CONECTAR CABLE DE COBRE DESNUDO A SUPERFICIE PLANA, TIPO KA.
13. LOS TRAMOS DE TUBERÍA CONDUIT (DISPAROS) DEBEN SER SELLADOS CON FIBRA CHICO "X" Y COMPUESTO CHICO "A".
14. LOS CONECTORES DEBEN TENER RECUBRIMIENTO DE ESTAÑO PARA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN.

SIMBOLOGIA:

- CABLE DE COBRE DESNUDO, TEMPLE SEMIDURO, MALLA PRINCIPAL, ENTERRADO Y CONEXIONES DERIVADAS, CALIBRE 67.43 mm² (2/0 AWG).
- CABLE DE COBRE CON AISLAMIENTO 600 V, THHW-LS 90°C. COLOR VERDE, CALIBRE SEGÚN SE INDIQUE EN EL PLANO DE DISTRIBUCIÓN DE TIERRAS.
- CONEXIÓN SOLDABLE, CABLE A CABLE.
- CONEXIÓN MECÁNICA, CABLE A EQUIPO/ESTRUCTURA.
- VARILLA AHOGADA, CONECTOR TIPO SOLDABLE.
- VARILLA EN REGISTRO DE CONCRETO, CONECTOR TIPO MECÁNICO.
- CONDUCTOR DE BAJADA, CONEXIÓN HACIA EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

NOMENCLATURA

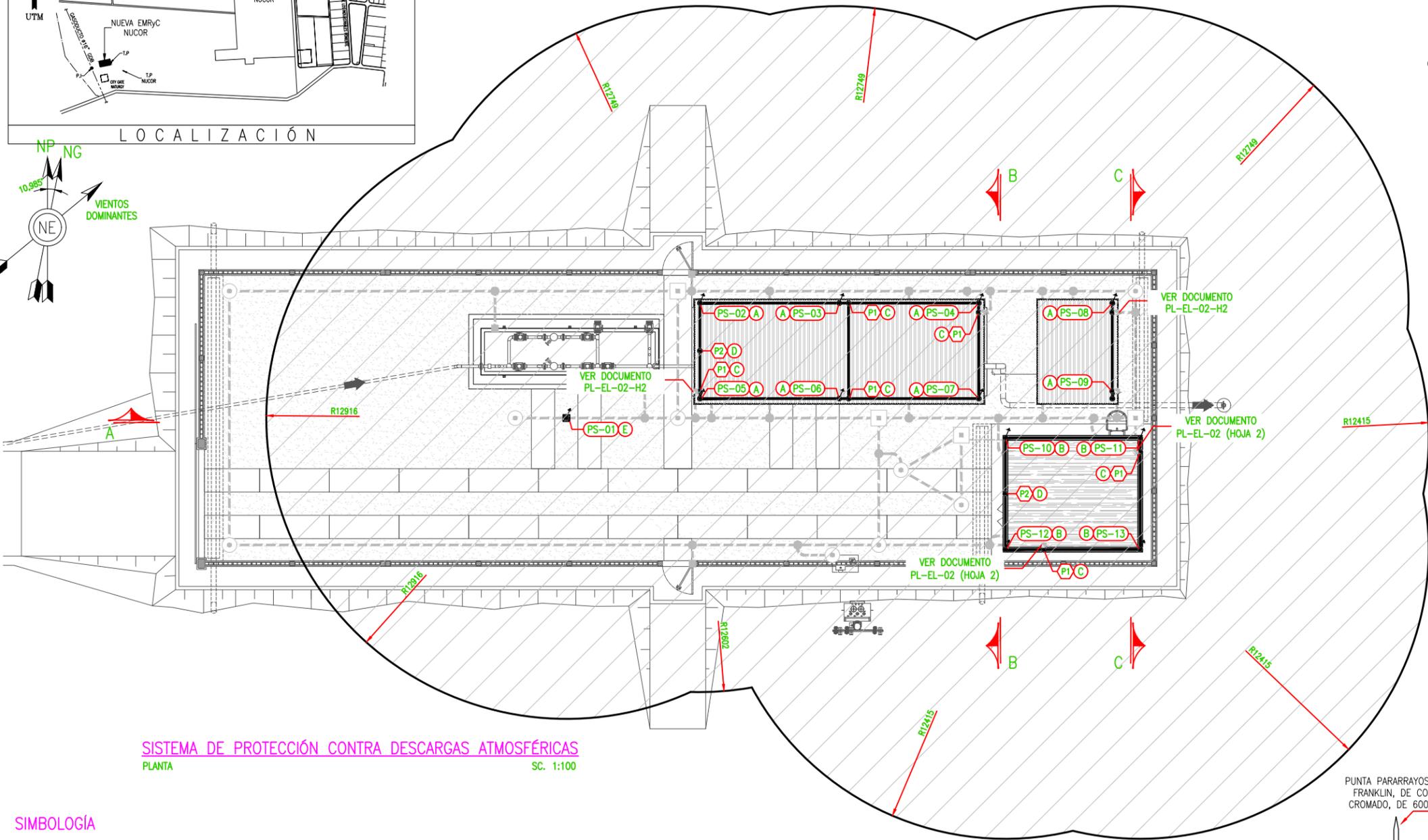
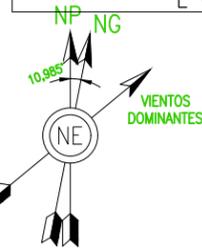
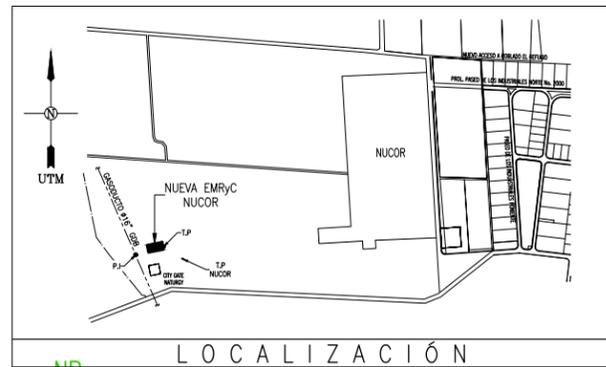
- NTC NIVEL TOPE DE CONCRETO
- NTG NIVEL TERMINADO DE GRAVA

REFERENCIAS

PL-EL-02: SISTEMA EXTERNO CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS. HOJA 1 Y HOJA 2

PL-EL-03: SISTEMA GENERAL DE PUESTA A TIERRA

Apéndice F. Sistema externo contra descargas atmosféricas (Hoja 1)



SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
PLANTA SC. 1:100

APROBADO PARA CONSTRUCCIÓN

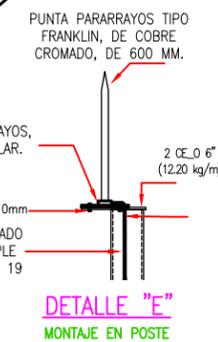
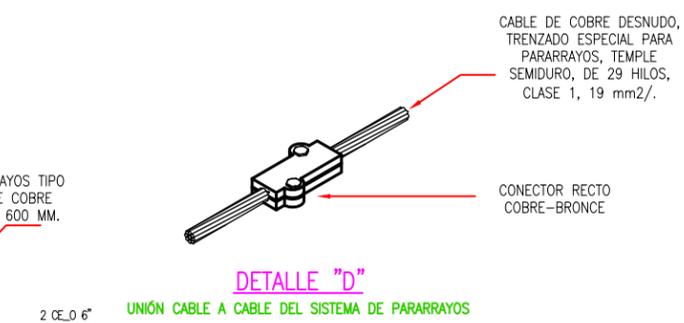
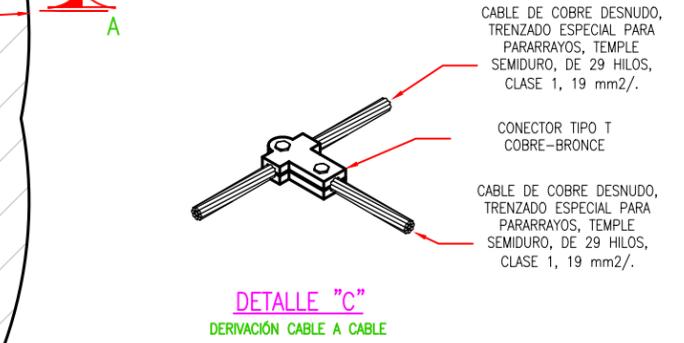
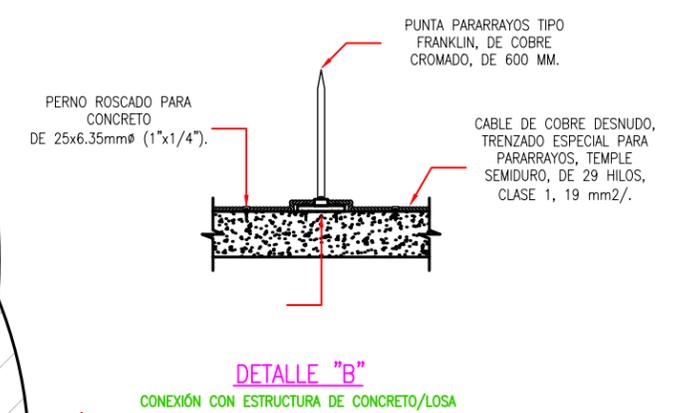
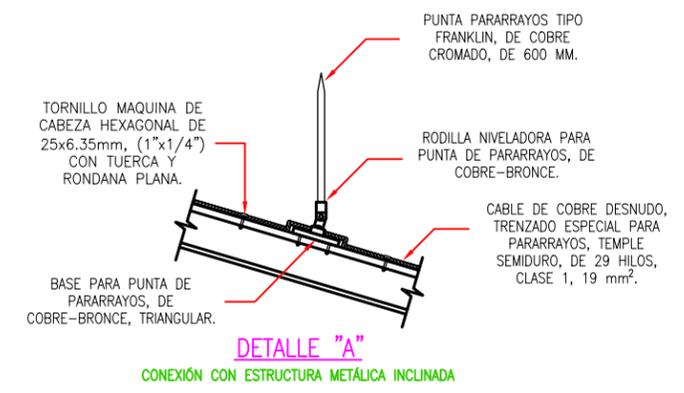
- SIMBOLOGÍA**
- CABLE DE COBRE DESNUDO, TRENZADO ESPECIAL PARA PARARRAYOS, TEMPLE SEMIDURO, 29 HILOS, 19 mm², CLASE 1.
 - CONEXIÓN MECÁNICA CABLE A CABLE
 - PUNTA DE PARARRAYOS DE COBRE CROMADO. 600 mm.
 - PUNTA DE PARARRAYOS EN POSTE.
 - CONDUCTOR DE BAJADA, CONEXIÓN HACIA EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

CONECTORES MECÁNICOS

CLAVE	TIPO	MARCA	CATALOGO	CANTIDAD
P1	CONECTOR "T"	AMESA	AME018	7
P2	CONECTOR RECTO	AMESA	AME019	2

- NOMENCLATURA**
- PS-01 → NUMERO CONSECUTIVO PUNTA SIMPLE PARARRAYOS
 - B → INDICA TIPO DE DETALLE

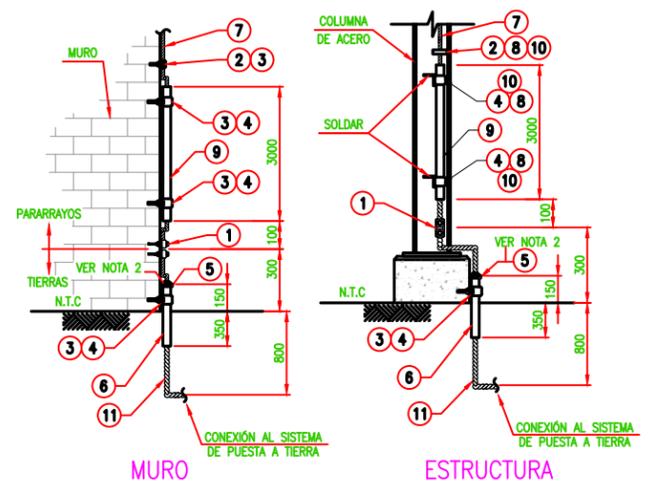
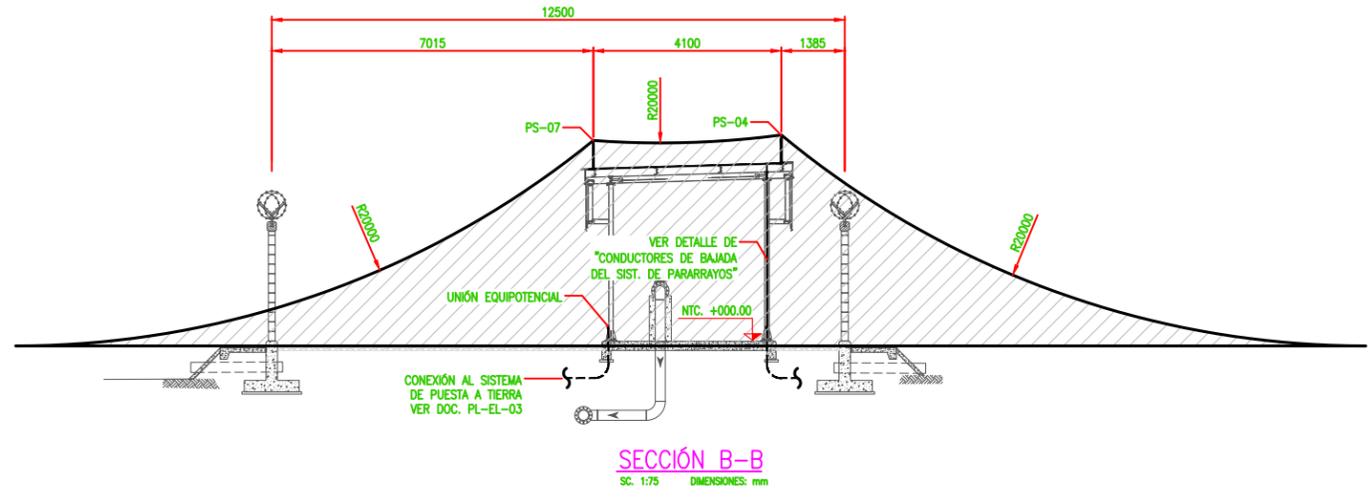
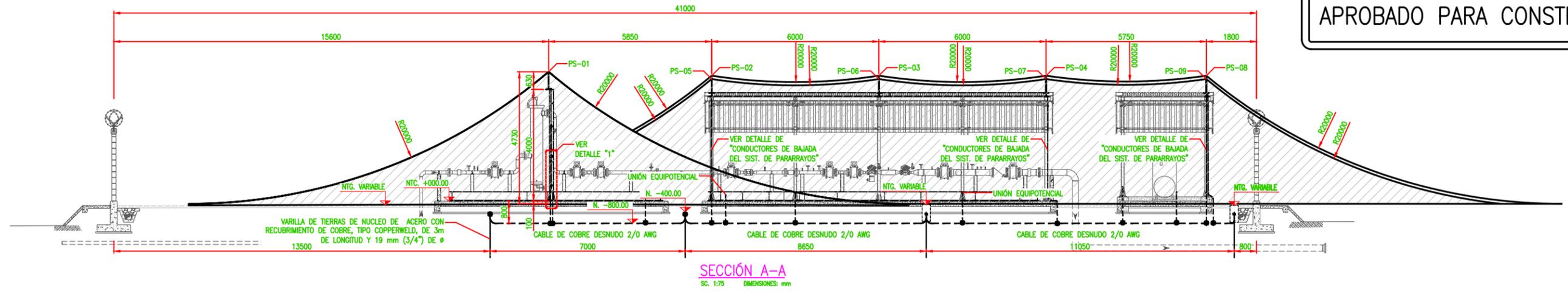
- REFERENCIAS**
- PL-EL-02-H2: SISTEMA EXTERNO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.
 - PL-EL-03: SISTEMA GENERAL DE PUESTA A TIERRA



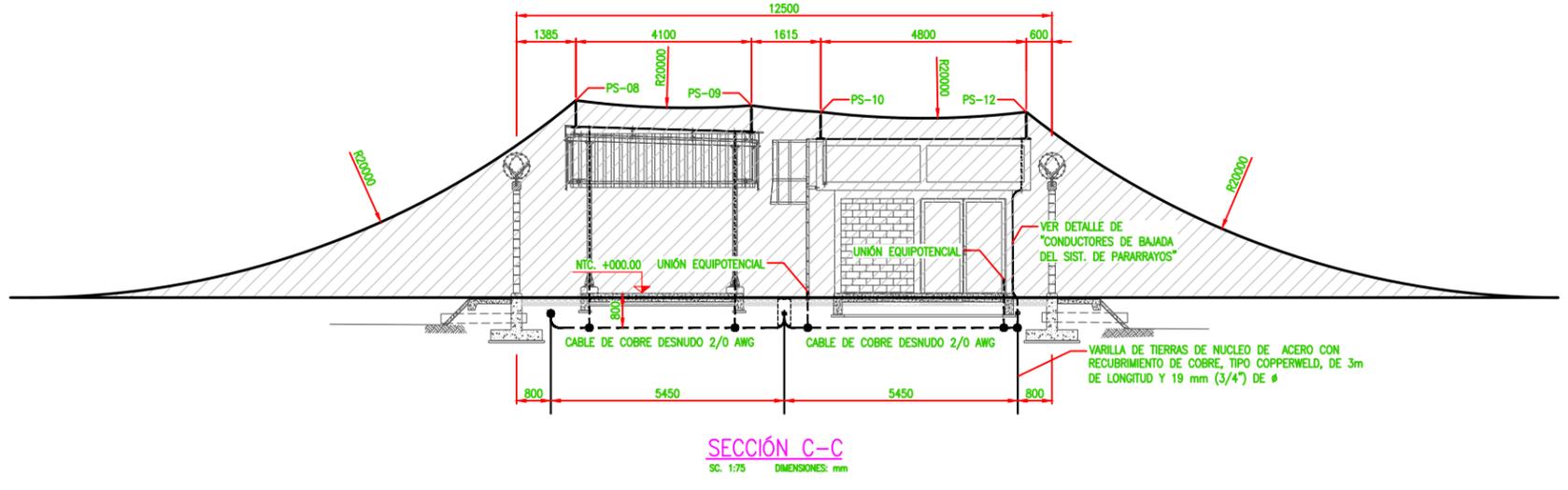
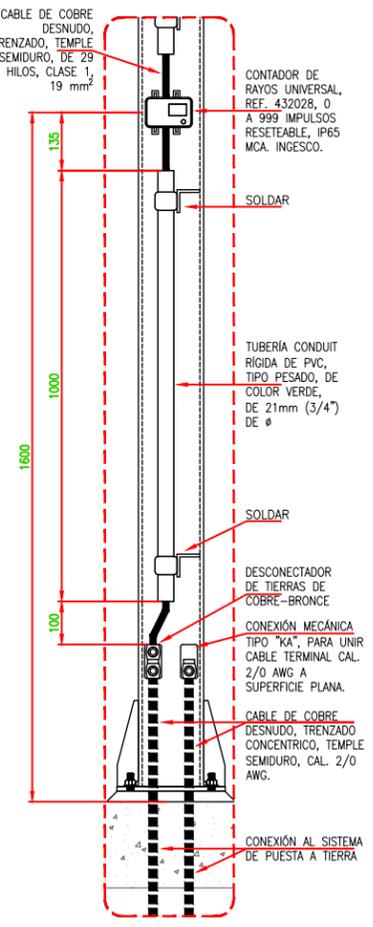
PL-EL-02-H1:
SISTEMA EXTERNO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
(HOJA 1)

Apéndice G. Sistema externo contra descargas atmosféricas (Hoja 2)

APROBADO PARA CONSTRUCCIÓN



CONDUCTORES DE BAJADA DEL SISTEMA DE PARARRAYOS
DETALLE TÍPICO



MATERIALES

1. DESCONECTADOR DE TIERRAS DE COBRE-BRONCE PARA BAJADA DE CABLE DE PARARRAYOS, VER NOTA 1.
2. ABRAZADERA DE COBRE PARA SUJETAR CABLE DE COBRE DESNUDO A SUPERFICIE PLANA.
3. PERNO ROSCADO PARA CONCRETO, DE 6.35mm (1/4") DE Ø, DE 19.05mm (3/4") DE LONGITUD DE ROSCA Y 25.4mm (1") DE VASTAGO.
4. ABRAZADERA DE LÁMINA GALVANIZADA, TIPO UÑA DE 21mm (3/4").
5. SELLO CON FIBRA CHICO "X" Y COMPUESTO CHICO "A".
6. TUBERÍA CONDUIT DE PVC, CEDULA 40, TRAMO DE 500mm, DE 21mm (3/4) DE Ø.
7. CABLE DE COBRE DESNUDO, TRENZADO ESPECIAL PARA PARARRAYOS, TEMPLE SEMIDURO, DE 29 HILOS, CLASE 1, 19 mm².
8. ANGULO DE LADOS IGUALES DE ACERO GALVANIZADO DE 50.80x50.80x6.35mm (2"x2"x1/4").
9. TUBERÍA CONDUIT RÍGIDA DE PVC, TIPO PESADO, DE COLOR VERDE, DE 21mm (3/4) DE Ø, EN TRAMOS DE 3000mm.
10. TORNILLO MÁQUINA GALVANIZADO CABEZA HEXAGONAL DE 50.80mm (2") DE LONGITUD Y 9.53mm (3/8") DE Ø, 1 TUERCA HEXAGONAL Y 2 RONDANAS PLANAS.
11. CABLE DE COBRE DESNUDO, TRENZADO CONCÉNTRICO, TEMPLE SEMIDURO CAL. 2/0

NOTAS GENERALES:

1. LOS CONECTORES DEBEN TENER RECUBRIMIENTO DE ESTAÑO PARA PROTECCION CONTRA LA CORROSION.
2. EL TRAMO DE TUBERÍA CONDUIT DEBE SER SELLADO CON FIBRA CHICO "X" Y COMPUESTO CHICO "A".
3. LA DISTANCIA ENTRE PUNTOS DE FIJACION VERTICAL, SERA A CADA 1.2 MTS.

NOMENCLATURA

- N.T.G NIVEL TERMINADO DE GRAVA
 N.T.C NIVEL TERMINADO DE CONCRETO
- PS-03 → NÚMERO CONSECUTIVO
 → PUNTA SIMPLE PARARRAYOS

REFERENCIAS

- PL-EL-02-H1: SISTEMA EXTERNO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.
 PL-EL-03: SISTEMA GENERAL DE PUESTA A TIERRA

PL-EL-02-H2:
SISTEMA EXTERNO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
(HOJA 2)

Apéndice H. Diagrama unifilar

