

Protección contra el efecto de las tormentas eléctricas de estructuras y edificios: conceptos básicos, evolución y aplicación en México

Arturo Galván Diego, Raúl Velázquez Sánchez

Los procedimientos recomendados para la protección contra tormentas eléctricas se encuentran contenidas en normas internacionales, que combinan la experiencia en campo obtenida durante muchos años con pruebas de laboratorio.

Resumen

La tecnología aplicada, apoyada en el análisis, la experimentación y la observación científica, ha demostrado su eficacia en la modernización de cientos de procesos industriales, comerciales, de comunicación y de servicios, así como de los materiales y metodologías utilizadas para la protección de diversos equipos y procesos; desde la protección en sistemas y equipos en alta tensión hasta sistemas que manejan muy baja energía, entre los que se incluyen equipos electrónicos y digitales.

Sin embargo, existen leyes fundamentales como la ley de Ohm, la ley de gravedad o la ley universal de gases que, pese a que fueron descubiertos hace muchos años, siguen vigentes y su validez proporciona elementos invaluable para el desarrollo de nuevos métodos, procesos y desarrollos tecnológicos.

Uno de los casos más relevantes que amalgama la aplicación de criterios fundamentales y el desarrollo de nuevas tecnologías y su aplicación en los llamados dispositivos de protección no convencionales lo constituye la protección contra el efecto de las tormentas eléctricas en edificios y estructuras. La aplica-

ción de estos dispositivos en el ámbito mundial ha generado escepticismo de una gran parte de la comunidad científica, reacciones diversas entre los usuarios y una postura firme por parte de los fabricantes para que dichas tecnologías sean incluidas en normas internacionales.

El objetivo de este artículo es ofrecer al lector la información básica sobre los inicios de la protección, la evolución que los métodos de protección contra las tormentas eléctricas han tenido desde el siglo XVIII, la aplicación de los criterios fundamentales de protección en estructuras o edificios modernos y su contenido, así como la situación que prevalece actualmente en los comités de las diversas organizaciones normativas nacionales e internacionales en lo referente a la inclusión de las nuevas tecnologías en las guías de diseño.



Introducción

La dependencia que el ser humano tiene con el clima es obvia, ya que éste tiene serias consecuencias en todas nuestras actividades, desde un buen clima para las labores agrícolas hasta condiciones de desastre para las personas y propiedades. El rayo, o más técnicamente, la descarga eléctrica atmosférica a tierra, es una condición especial del clima que ha sido objeto, desde tiempos remotos, de fascinación y miedo, lo que generó el hecho de representar al rayo como un poder divino en la mitología de casi todos los pueblos del mundo.

Debido a los conocimientos adquiridos sobre este fenómeno mediante el análisis, experimentación y observación científica en los últimos siglos, el rayo ha sido transferido de su posición divina, donde la oración y los ritos constituyeron los únicos medios de protección, a una simple manifestación del clima, donde sus propiedades lo ubican como un fenómeno físico, cuyo entendimiento originó el desarrollo de los medios de protección conocidos hoy en día.

Con el objeto de identificar los sistemas de protección en el proceso de evolución, el término sistema convencional se aplicará a los sistemas que utilizan terminales aéreas simples, tales como los electrodos verticales (Electrodos Franklin), conductores horizontales y tipo malla o Jaula de Faraday; y el término sistema no convencional se aplicará a los sistemas que utilizan equipos con

nueva tecnología, como los dispositivos de emisión temprana (ESE por sus siglas en inglés) y los de transferencia de carga (CTS por sus siglas en inglés).

Inicios de la protección

El primer estudio científico sobre el rayo fue realizado por Benjamín Franklin hace aproximadamente 250 años. Con su famoso experimento del cometa, demostró que las nubes de tormenta están eléctricamente cargadas e infirió que el rayo es una descarga eléctrica a gran escala. En sus experimentos con puntas metálicas, llegó a la conclusión de que las nubes de tormenta descargan preferentemente dicha electricidad estática sobre montañas elevadas, árboles, torres, mástiles o cualquier otro objeto metálico aterrizado. Estos resultados le permitieron anticipar el primer sistema de protección con base en terminales aéreas verticales, conocidas como Electrodos Franklin, cuyo único objetivo es interponerse en la trayectoria del rayo y conducir a través de sus elementos constitutivos la corriente de rayo que podría, de otra manera, incidir sobre algunas de las partes vulnerables del objeto a protegerse.

A partir de entonces, la protección contra tormentas eléctricas basada en electrodos Franklin representó una solución práctica, extendiéndose a nivel mundial. Aún cuando el concepto fue puramente empírico con una protección por debajo del 100%, la técnica en el uso del Electrodo Franklin fue mejorado y perfeccionado con el paso del tiempo.

En 1820, Hans Cristian Oersted descubrió la presencia de campos magnéticos alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica. Esto originó que científicos de la talla de André-Marie Ampere en Francia y Michael Faraday en Inglaterra tomaran los resultados de Oersted para realizar trabajos de investigación en electromagnetismo. En los siguientes cincuenta años, una intensa campaña de investigación rindió sus frutos, cuando Clark Maxwell (un alumno de Michael Faraday) propuso, en 1866, un sistema alterno de protección contra tormentas eléctricas, que se conoce como Jaula de Faraday o una terminal aérea tipo Malla. Desde entonces, tanto el Electrodo Franklin como la Jaula de Faraday se utilizan ya sea en forma independiente o en combinación.

Para instalaciones o estructuras pequeñas, los Electrodos Franklin o terminales aéreas verticales pueden ubicarse en forma aislada cerca del objeto a protegerse para ofrecer una protección adecuada. Este criterio de diseño permite utilizar tanto terminales aéreas verticales como terminales aéreas horizontales. Para estructuras de grandes dimensiones, las terminales aéreas verticales pueden colocarse sobre la misma estructura, cuya interconexión a nivel de techo proporciona las condiciones necesarias para generar una Jaula de Faraday, y los conductores de bajada necesarios para disipar la corriente de rayo a tierra deben estar diseñados de manera que se

evite la generación de arcos laterales entre el sistema de protección y el material conductor de la estructura.

Al inicio, el único objetivo de la protección contra tormentas eléctricas era ofrecer un elemento de sacrificio para la terminación del rayo, desviando la corriente de rayo a tierra en forma segura a través de los conductores de bajada. Actualmente, este sistema de protección se conoce como Sistema Externo de Protección contra Tormentas Eléctricas (SEPTE). Sin embargo, el uso cada vez más frecuente de sistemas electrónicos-digitales ha hecho que el SEPTE resulte insuficiente para las necesidades de protección del equipo electrónico sensible actual, por lo que se hizo necesario el desarrollo de un nuevo sistema de protección conocido como Sistema Interno de Protección contra Tormentas Eléctricas (SIPTE), constituido por la unión equipotencial, el blindaje electromagnético y los dispositivos de protección contra sobrevoltaje.

Evolución del sistema convencional de protección

Generalmente, uno de los argumentos principales manejado por los responsables de los nuevos equipos en la aplicación e instalación de sus productos es que edificios y estructuras modernas requieren equipos modernos de protección contra tormentas eléctricas, con el objeto de estar a la altura de la tecnología del siglo XXI. Otro de los argumentos es que el sistema convencional de protección ha sido desarrollado con base en “datos históricos”, con un escaso soporte científico, tanto teórico como de pruebas de laboratorio. Esta sección tiene por objeto demostrar el soporte científico utilizado durante la evolución del sistema convencional de protección.

Electricidad estática

Benjamín Franklin, durante el desarrollo de su proyecto Identidad de la nube de tormenta de 1747 a 1756, apoyó sus conclusiones sobre el rayo en los conceptos y conocimientos que se tenían en esa época sobre electricidad estática:

- a) Un arco eléctrico se propaga en zig-zag; lo mismo que el rayo.
- b) Objetos terminados en punta atraen la electricidad: el rayo termina sobre montañas, árboles, mástiles y chimeneas.
- c) Cuando se tienen diferentes caminos, la electricidad se libera por el camino de menor resistencia; lo mismo que el rayo.
- d) La electricidad genera fuego en materiales combustibles; lo mismo que el rayo.
- e) La electricidad funde metales; lo mismo que el rayo.

f) El rayo destruye objetos poco conductores; lo mismo que la electricidad.

g) El rayo invierte los polos de un magneto; lo mismo que la electricidad.

A partir de 1752, los descubrimientos de Benjamín Franklin se propagaron rápidamente, tomando en cuenta los medios de comunicación de aquella época. Su sistema de protección fue aplicado básicamente en iglesias, edificios públicos y construcciones agrícolas, donde el daño debido a la incidencia de rayo era catastrófico. El sistema de protección convencional demostró su eficacia, comparando los daños antes y después de su instalación en muchas construcciones. La era de la protección contra tormentas eléctricas había comenzado, ofreciendo así elementos de comparación de daño en aquellas construcciones protegidas y en aquellas que no lo estaban.

Sin embargo, debido a la limitada información que se tenía del fenómeno del rayo, algunos sistemas convencionales no operaron como se esperaba. Uno de los casos que acaparó la atención fue el daño causado en la Casa del Consejo de Artillería, en Purfleet, Essex, Inglaterra, equipada con el sistema convencional de protección. El rayo penetró la protección, incidiendo en una pieza de unión de acero embebida en concreto cerca de uno de los Electrodo Franklin, cuyo extremo inferior conectaba a las canaletas, que eran las piezas metálicas principales del edificio, con una conexión a tierra. Este incidente, debido a la presencia de objetos metálicos adicionales al sistema de protección conven-

cional, originó la primera recomendación sobre la unión equipotencial y el concepto de distancia de protección de los Electrodo Franklin.

Primera guía de diseño. Cono de protección

Aún cuando se considera que Benjamin Franklin fue el primero en proponer un cono de protección como medida de la efectividad del sistema de protección convencional, en 1823 Gay-Lussac propuso un cono de protección con un radio de dos veces la altura de la terminal aérea. Debido a una gran actividad atmosférica de rayos a tierra en la mayor parte de Europa Continental en 1822, el Ministro del Interior de Francia ordenó la protección de todos los edificios públicos, utilizando el mejor modelo disponible y utilizando medidas de instalación mejoradas. Para llevar a cabo la protección, el Ministro pidió oficialmente a la Academia de Ciencias revisar la eficiencia del sistema de protección, nombrándose un comité de seis miembros notables, todos ellos investigadores del fenómeno de la electricidad: M. M. Poisson, Lefevre-Gineau, Girard, Dulong, Fresnel y Gay-Lussac. El informe sobre el estudio realizado por los investigadores fue entregado a la Academia de Ciencias, y fue adoptado como el modelo de protección y declarado como un documento de extrema importancia. La importancia de dicho documento fue de tal magnitud, que el gobierno francés ordenó distribuirlo a todos los funcionarios públicos, a la iglesia y otras instancias con el objeto de hacerlo del conocimiento general. Este documento llegó a ser la primera guía

de una zona de protección específica para su aplicación a las terminales aéreas de un sistema de protección contra tormentas eléctricas.

Modificación al cono de protección

Más adelante, en 1840 y basado en observaciones, Sir William Snow Harris publicó un documento para la protección de embarcaciones marítimas basado en la zona de protección. De alguna manera, lo elevado de las embarcaciones ofrecía un muy buen modelo de protección, debido a la poca influencia que se tenía alrededor de la embarcación.

El método ofrecido por Sir William Snow fue adoptado en 1847 por la Marina Real, debido al éxito obtenido en la instalación del sistema de protección en 30 buques de la Marina Real que durante los últimos 12 años habían sido expuestos a severas tormentas eléctricas ocurridas en diferentes latitudes, sin experimentar daño alguno. A partir de estas observaciones, puede decirse que el cono de protección mediante un ángulo de protección con relación 2:1 había sido un éxito.

En 1880, Preece condujo una serie de experimentos para medir el campo eléctrico cerca de una terminal aérea vertical, concluyendo lo siguiente: “una terminal aérea vertical ofrece una zona de protección por medio de un espacio cónico, cuya altura es la longitud de la terminal aérea y su base corresponde a un círculo con un radio igual a la altura de la terminal aérea, cuyos lados corresponden al cuadrante de un círculo con radio igual a la altura de la terminal aérea” (Preece, 1880). Este es el concepto de una zona de protección con relación 1:1, basado en los datos científicos obtenidos hasta esa fecha y que prevalecería por muchos años.

En 1892, Sir Oliver Lodge publicó una revisión de los conceptos de las zonas de protección propuestos hasta esa fecha. La variación encontrada fue muy amplia: desde 90 hasta 30 grados. Como resultado de las observaciones realizadas en ese tiempo, el cono de protección fue modificado con ángulos desde 45 hasta 64 grados.

En 1914, las investigaciones de Larmor & Larmor tuvieron un ingrediente innovador de análisis, ya que la zona de protección fue analizada por medio de las líneas de campo eléctrico mediante el uso (ya disponible en ese tiempo) de la teoría electromagnética de Maxwell y el trabajo tomaba en cuenta rayos oblicuos o inclinados. De hecho, este trabajo es considerado como el primer documento en correlacionar el mecanismo de la ionización de gases con la propagación del rayo.

En la década de los veinte, Peek evaluó el concepto de zona de protección mediante pruebas de laboratorio para determinar las zonas de protección desde 64 hasta 76 grados.

El modelo electrogeométrico y el método de la Esfera rodante

En el periodo comprendido entre 1950 y 1970, se estableció un fuerte compromiso para proteger las líneas de transmisión de energía eléctrica

contra el efecto de los rayos directos en Estados Unidos. Como consecuencia, se generó una extensa investigación, en donde investigadores como Whitehead, Wagner y Hileman realizaron importantes contribuciones. La aplicación del modelo electrogeométrico permitió que los índices de falla por tormentas eléctricas de las líneas de transmisión disminuyeran notablemente, aumentando en forma importante su confiabilidad. En 1978, Lee publicó un artículo en el que se describen las características de la protección de edificios contra tormentas eléctricas con base en el modelo electrogeométrico usado en la protección de líneas de transmisión. Este modelo, conocido actualmente como el método de la Esfera rodante, es aplicado por la mayoría de las normas nacionales e internacionales.

Con el fin de dar crédito a la aplicación del método de la Esfera rodante (en caso de que su uso por la comunidad científica no fuera suficiente), Horvath establece que este método ya había sido formulado y validado mediante experimentos en laboratorio desde 1948. En su libro publicado en 1991, Horvath establece la validación de la eficacia del método mediante simulaciones en computadora.

Primeras normas

En 1879 Anderson publicó un libro clave sobre protección contra tormentas eléctricas titulado Conductores de protección contra rayo. Su historia, naturaleza y forma de aplicación. Este libro es considerado como la primera norma sobre protección contra tormentas eléctricas y, de hecho, la mayor parte de las recomendaciones contenidas en este libro siguen vigentes y son aplicadas con éxito.

En el periodo de 1878 a 1882, la protección contra tormentas eléctricas capturó la atención de grandes arquitectos, ingenieros y científicos en la cultura occidental, en donde el esfuerzo consistió en lograr un entendimiento unificado de la tecnología de la protección contra tormentas eléctricas. La Real Sociedad de Meteorología de Inglaterra pidió al Instituto Real de Arquitectos, a la Sociedad de Física y a la Sociedad de Ingenieros Telegráficos considerar la publicación de una serie de recomendaciones para la instalación de los elementos constitutivos de un sistema de protección convencional contra tormentas eléctricas. Al final de un intenso debate e intercambio de experiencias, el comité publicó, en 1882, el Informe de la Conferencia sobre Electrodo Pararrayos que establecía una serie de recomendaciones para la instalación del sistema de protección contra tormentas eléctricas en Inglaterra. Las técnicas de protección contenidas en dicho informe fueron consideradas infalibles en ese tiempo.

En 1904, la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA por sus siglas en inglés) adoptó y condensó las recomendaciones contenidas en el informe de 1882 dentro de las Especificaciones

para la Protección de Edificios Contra Tormentas Eléctricas, cuyo principal objetivo fue proveer recomendaciones prácticas para la instalación de un sistema de protección. La filosofía de dichas especificaciones estaba contenida en las siguientes palabras:

“Se ha demostrado que los conductores de protección contra rayo, cuando son instalados adecuadamente, constituyen un medio de protección. La limitación que nos impone enfrentarnos a valores de corrientes desconocidas puede ser superada suministrando una superficie metálica suficiente para manejar, absorber y disipar la corriente de rayo que pudiera presentarse. Al mismo tiempo, la protección suministrada por un conductor dependerá de la posición relativa de la descarga eléctrica y de los objetos encontrados a su paso. Cuanto más elevada sea la proyección de dichos objetos sobre el nivel general a protegerse, menor será la distancia a la nube de tormenta y, por consecuencia, menor la resistencia ofrecida a la descarga. Por lo tanto, los objetos elevados serán golpeados más frecuentemente, de ahí la necesidad de diseñar un esquema de protección adecuado...” (Lemmon).

“...Nuestro deseo en la preparación de estas recomendaciones es proveer información al público, con la que pueda obtener un cierto grado de protección, reduciendo a un mínimo las pérdidas causadas por fuego”. (Hedges)

Esta primera norma estadounidense de protección contra tormentas eléctricas estuvo basada en los conocimientos del rayo más recientes que se tenían en aquella

época, por lo que fue tomada como base en la elaboración de otras normas y recomendaciones para implementar sistemas de protección contra tormentas eléctricas.

En el periodo de 1910 a 1950, hubo un gran interés por llevar una estadística de la efectividad de los sistemas de protección contra tormentas eléctricas en Estados Unidos. Uno de los registros al que muchos investigadores hacen referencia es el Iowa Fire Marshall's Records. McEachron en 1950, estableció el 91% de los edificios dañados por rayo fueron aquellos que no tenían instalado un sistema de protección; información avalada en los registros de Iowa. Muchos de los elementos constitutivos de los edificios dañados que contaban con un sistema de protección se encontraron en mal estado.

Normas de aplicación general

Los procedimientos recomendados para la protección contra tormentas eléctricas se encuentran contenidas en normas internacionales, que combinan la experiencia en campo obtenida durante muchos años con pruebas de laboratorio.

El concepto actualmente utilizado en la protección de edificios y estructuras contra tormentas eléctricas y recomendado en normas internacionales lo constituye el método de la Esfera rodante. El radio de esta esfera corresponde a la distancia crítica de rompimiento entre el líder descendente y el objeto a ser golpeado. De hecho, este método clarificó algunos con-

ceptos como el de la mayor cobertura de protección suministrada por las terminales aéreas para mayores corrientes de rayo, los casos anteriormente inexplicables de los rayos laterales en estructuras de gran altura, la mejor protección ofrecida entre dos terminales aéreas y la mayor incidencia de rayos en terminales aéreas de mayor altura.

Uno de los objetivos de los estudios realizados en la física de la descarga es precisamente obtener los parámetros más significativos del rayo y la evaluación de su impacto en la protección contra tormentas eléctricas. Estos resultados, junto con la experiencia en campo obtenida tanto en la aplicación de la protección externa basada en las terminales aéreas, los conductores de bajada y las redes de tierra; así como en la protección interna basada en redes de tierra, superficies equipotenciales, zonas de protección, blindaje electromagnético y dispositivos de protección contra transitorios, han conducido a una serie de recomendaciones emitidas por diferentes países, con el fin de homogeneizar los criterios de protección.

A nivel internacional, estas recomendaciones están concentradas en la norma de la International Electrotechnical Commission (IEC), Grupo de Trabajo 81, agrupadas en la serie 61024, libros 1, 1-1 y 1-2 para protección externa e interna; en la serie 1312, libro 1 para efectos de campos electromagnéticos; en la serie 1662 para el riesgo de daño y en la serie 1663 para instalaciones particulares, como las telecomunicaciones. Existen también normas nacionales que pueden representar una excelente referencia, como la British Standard BS-6651 para protección externa e interna y la norma francesa NFC 17-100, ésta última muy parecida a la norma IEC.

En Estados Unidos, se tienen las normas National Fire Protection Association NFPA-780, la Underwriters Laboratories UL 96-A y la American Petroleum Institute API-2003 para protección contra descargas estáticas y tormentas eléctricas en instalaciones con peligro de fuego y explosión. Existen además otras recomendaciones, como son la Federal Aviation Administration FAA-019c y la DOD Ammunition Safety Standard, Capítulo 7.

Otra excelente norma lo constituye la norma australiana Australian Standard AS-1768, que contiene información muy completa sobre el sistema de protección interna.

Aceptación de riesgo

Todas las normas, en mayor o menor grado, aceptan que no existe una protección absoluta contra el efecto de las tormentas eléctricas, sino sólo una protección adecuada, basada en el conocimiento del comportamiento estocástico del rayo y la experiencia obtenida a través de los años. A continuación se indican los párrafos en los que algunas normas especifican dicha situación:

BS 6651: 1992

Sección uno – Introducción

“Esta guía es de naturaleza general... Se hace énfasis en que, aún cuando se suministre protección, el riesgo de daño a la estructura a proteger nunca puede ser completamente efectiva”.

IEC 61024-1 (1990)

Parte uno: Principios Generales

“Un sistema de protección contra rayo, diseñado e instalado conforme a esta norma, no puede garantizar una protección absoluta a estructuras, personas u objetos; sin embargo, el riesgo de daño causado por rayo a estructuras protegidas será reducido significativamente mediante la aplicación de esta norma”.

API 2003 (1998)

Capítulo 5, Sección cinco

“Probablemente, la propiedad más importante del rayo es su complejidad, por lo que no existe una norma del rayo...No puede asegurarse, en forma absoluta, la prevención o la disipación en forma segura de la corriente de rayo, aún cuando se tomen las precauciones conocidas”.

UL 96A (1994)

Prefacio

“Esta norma contiene requerimientos básicos para los productos cubiertos por la UL...Estos requerimientos están basados en principios de ingeniería sólidos, investigación, registros de pruebas y experiencia de campo...”.

Aun cuando la norma UL 96A (1994) no indica específicamente que la protección no puede ser absoluta, indirectamente se adhiere al mismo concepto cuando acepta que sus requerimientos están basados en principios de ingeniería sólidos, registros de pruebas y experiencia de campo.

Esta aceptación de riesgo es particularmente importante, ya que la información que se tiene del rayo aún es incompleta. Lo único que sí se sabe acerca del rayo, es que es un fenómeno caprichoso, aleatorio y destructivo, por lo que es recomendable tomar todas las medidas de seguridad necesarias para asegurar la integridad de las instalaciones y estructuras, así como de su contenido.

Dispositivos no convencionales de protección

Breve resumen

En forma natural, existe la tendencia de mejorar la protección contra rayo a través de un aumento en la eficiencia de las terminales aéreas. En

los últimos cuarenta años, se han venido proponiendo nuevas tecnologías para incrementar la eficiencia en las terminales aéreas. Estas nuevas tecnologías están basadas en un supuesto mejoramiento del original del Electrodo Franklin, entre las que se encuentran:

- a. Un baño de oro en las puntas pararrayos para reducir la resistencia en la circulación de la corriente de rayo.
- b. Modificación de la punta pararrayos, utilizando diversas formas, como “erizos” o puntas adicionales con el objeto de “incrementar” la distancia de atracción del electrodo pararrayos.
- c. Electrodo radiactivo.
- d. Tecnología ESE (Early Streamer Emission).
- e. Tecnología CTS (Charge Transfer System).

Las dos primeras modificaciones han demostrado, a través de los años, no ser tan efectivas como se suponía. Para el caso de los llamados “erizos”, el problema principal es que su costo es muy elevado sin ser un medio de protección efectivo. Además, la filosofía de su operación se realiza en un marco pseudotécnico, difícil de entender desde el punto de vista científico.

Los electrodos radioactivos basan su efectividad en un incremento en el nivel ionizante alrededor de la punta pararrayos. Desafortunadamente, este nivel de ionización es muy pequeño comparado con el nivel de ionización producido por el líder descendente antes de producirse la descarga eléctrica de rayo. El uso de este tipo

de electrodos ha sido prácticamente prohibido debido a los riesgos de exposición del público en general a la radioactividad.

Como sustitutos de los electrodos radioactivos, se desarrollaron otros sistemas basados principalmente en electrodos auxiliares, generalmente “flotantes” que utilizan las diferencias de potencial que se logran en los cambios de campo eléctrico estático justo antes de la iniciación del rayo de retorno. Entre estos dispositivos se encuentran las terminales aéreas ESE, que pueden o no utilizar una fuente permanente de excitación instalada cerca de la punta pararrayos, con el objeto de acelerar o generar más rápidamente un líder ascendente en las inmediaciones de la punta justo antes de la iniciación del rayo. De esta forma, este líder ascendente forzado alcanzaría mayores distancias al momento de producirse el punto de contacto, aumentando la efectividad del sistema de protección. Al igual que las otras “mejoras”, este sistema no ha sido validado en campo, a pesar de que los fabricantes argumentan haber obtenido resultados positivos en laboratorio. Uno de los aspectos científicos más relevantes contra la utilización de estos dispositivos es que la microdescarga inicial no siempre garantiza la propagación del líder ascendente, porque aún cuando se inicie la microdescarga, el nivel de gradiente de potencial alrededor de la punta pararrayos necesario para la propagación del líder ascendente es prácticamente suministrado por la carga contenida en el líder ionizado descendente.

Algunos fabricantes, junto con pseudocientíficos, han ido mucho más lejos, proponiendo inclusive dispositivos que “evitan” o “neutralizan” la acumulación de carga en las celdas correspondientes de la nube (tecnología CTS) a través de corrientes iónicas que se propagan de la terminal aérea a la nube de tormenta, evitando con ello la formación del líder descendente en el volumen de interés, que es el paso previo a la iniciación del rayo. Este razonamiento está fuera de todo contexto científico, ya que los resultados obtenidos en las investigaciones de los últimos veinte años en la formación del rayo indican que:

El plano de tierra u objetos aterrizados elevados no tienen influencia alguna en la formación (desde la nube) del líder descendente, siendo esta influencia significativa hasta la etapa del último paso de la descarga.

Aspectos técnicos y de diseño

Las nuevas tecnologías pretenden -al menos eso se cree- aumentar la eficacia y eficiencia del sistema de protección, ofreciendo una mayor cobertura a un menor costo (por el simple hecho de utilizar un menor número de terminales aéreas convencionales), lo que implicaría además una reducción sustancial en el riesgo de daño.

Desafortunadamente, los aspectos de diseño no siempre son lo transparentes que deberían ser para el usuario. Por ejemplo, los fabricantes de la tecnología CTS especifican únicamente el número y características de ubicación de sus equipos de protección, pero no le entregan al usuario (como cualquier estudio de riesgo lo amerita) las memorias de cálculo respecto al tipo de tormentas eléctricas de las que están protegiendo la estructura o instalación (corriente de rayo o carga a ser neutralizada, densidad de rayos a tierra, volumen de atracción ofrecido por la estructura, etcétera). Los fabricantes e instaladores de la tecnología CTS consideran que las memorias de cálculo son “secretos de empresa”.

Para la tecnología ESE, existen varias empresas en México: algunas utilizan una fuente permanente emisora de iones que se activa con la presencia de la tormenta eléctrica, ya sea a través de la fuerza que ejerce el viento sobre el mástil que sostiene al dispositivo emisor o a través de fuentes permanentes emisoras de iones, y otra que utiliza la misma energía del líder descendente para generar micro descargas a través de un arreglo resistivo-capacitivo.

Algunas tecnologías apoyan sus criterios a través de la norma francesa 17-102 que ofrece aumentos en cobertura sobre el sistema convencional de protección. Otras apoyan su tecnología en registros propios obtenidos en laboratorio sobre el aumento en la cobertura sobre el sistema convencional de protección.

Sin embargo, los estudios en laboratorio tienen el inconveniente de no poder obtener una correcta extrapolación de los resultados de

laboratorio con los arcos eléctricos de grandes dimensiones, como los desarrollados en un rayo natural. Aun cuando estos resultados pudieran extrapolarse convenientemente, deberán pasar muchos años (como en el caso del sistema convencional) para poder emitir juicios correctos respecto a su operación.

Además, cualesquiera de las tecnologías referidas anteriormente, utilizan accesorios como terminales aéreas, cables de bajada y electrodos de tierra, que superan por mucho el costo de los elementos convencionales, sin que esto represente un aumento en la seguridad y la minimización del riesgo de daño.

Normatividad internacional

Tanto la tecnología ESE como la tecnología CTS han insistido mucho para que sus criterios de protección sean avalados y difundidos en las normas internacionales.

En un esfuerzo por ser incluida en la NFPA, la tecnología ESE recurrió a los procedimientos legales. En 1991 se constituye el Comité Técnico Sobre la Protección Contra Rayo Utilizando Dispositivos ESE. En 1993 se propone la norma correspondiente, conocida como NFPA 781. En el mismo año, la iniciativa se regresa nuevamente al comité técnico. En 1994 se presenta una demanda de inconformidad, por lo que la NFPA recurre a una tercera instancia, constituyendo un Consejo Evaluador para la reevaluación de la tecnología. En 1995, el Consejo determina no publicar la NFPA 781 debido a la falta de evidencia en el aumento de protección ofrecido por los dispositivos ESE, por lo que la compañía Heary Brothers toma acción penal contra la NFPA. En 1998 se reconsidera nuevamente la evaluación y publicación de la NFPA 781, por lo que el Consejo determina la intervención de una tercera instancia para la reevaluación, a cargo del Dr. John L. Bryan. En 1999 y de acuerdo con los resultados del documento Bryan, el Consejo votó por no publicar la norma de protección contra tormentas con base en los dispositivos ESE.

En el documento Bryan, sin embargo, existen algunos puntos importantes que merecen un análisis cuidadoso. Por ejemplo, el documento establece lo siguiente:

- a) Los dispositivos ESE tienen bases técnicas ya que, en general, son equivalentes a las terminales aéreas convencionales.
- b) Sin embargo, tanto las terminales aéreas convencionales como los dispositivos ESE parecen no tener una base científica sólida, de acuerdo a las pruebas de campo bajo condiciones naturales.
- c) La tecnología ESE no tiene una base sólida respecto al área de protección mejorada o al sistema de conexión a tierra, de acuerdo a sus criterios de instalación como un sistema completo de protección.

- d) Las pruebas de laboratorio realizadas para los dispositivos ESE se consideran con bases sólidas y adecuadas en cuanto a cantidad y finalidad, pero están limitadas en cuanto a que no son equivalentes para una evaluación bajo condiciones naturales de ocurrencia del rayo.

En un caso sin precedente, 17 científicos de 15 países miembros del Comité Científico de la Conferencia Internacional sobre Protección contra Rayo (ICLP por sus siglas en inglés), una de las conferencias internacionales de mayor prestigio en su género, establecieron su total oposición al uso de la tecnología ESE, entregando sus comentarios a la NFPA con respecto a la reevaluación de la norma NFPA 781.

La información entregada a la NFPA por parte del Comité Científico de la ICLP puede condensarse en los siguientes puntos:

- 1) La operación de los ESE no ha sido probada bajo condiciones naturales de rayo y las pruebas de laboratorio han sido muy limitadas en demostrar el aumento en la distancia de protección, demostrando además que el comportamiento de un dispositivo ESE y una terminal aérea convencional son similares.
- 2) La norma propuesta por la tecnología ESE no distingue entre los diferentes tipos de descargas, lo que indica un claro desconocimiento de sus propiedades, como corriente, campo eléctrico o velocidad.

- 3) Las pruebas de laboratorio no consideran la enorme diferencia que existe con las condiciones naturales de ocurrencia del rayo y lo que esto representa en la evaluación de las características altamente no lineales del rayo.
- 4) La posición de un plano conductor imaginario, a una altura determinada de la estructura, antes de rodar la Esfera rodante, cambia totalmente el campo eléctrico original alrededor del objeto, cambiando como consecuencia, los criterios de protección.
- 5) Debido a que el objetivo final de la protección contra tormentas eléctricas es salvaguardar la vida de las personas y las propiedades de los inmuebles, el concepto manejado por los dispositivos ESE es insuficiente. Por lo tanto, la propuesta NFPA 781 no debe ser aceptada.

Con respecto a la tecnología CTS, actualmente el Consejo de Normalización del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ha aprobado una propuesta para el desarrollo de la norma para la protección contra tormentas eléctricas mediante el uso del Sistema de Transferencia de Carga (CTS por sus siglas en inglés) para instalaciones industriales y comerciales. Dicha propuesta tiene el número P1576.

La Asociación de Normalización del IEEE es una autoridad administrativa responsable de facilitar el desarrollo de las normas y de asegurar que se desarrollen en forma

abierta y transparente y que además cumplan con el requerimiento de consenso necesario para estos casos. La diferencia entre el IEEE como institución y la Asociación de Normalización del IEEE es que la primera está compuesta por ingenieros calificados o expertos, mientras que la Asociación de Normalización está abierta a todos los partidos, ya sean individuales u organizaciones.

La aprobación de dicha propuesta en el IEEE ha provocado la reacción de un gran número de expertos en la física del rayo y en la protección contra tormentas eléctricas, que es muy fácil de entender, ya que los conocimientos del rayo indican que es imposible detener su desarrollo por cualquier objeto, aterrizado o no, a nivel de tierra.

El proyecto de norma tendrá una duración de cuatro años, al final de los cuales tendrá que ser considerado a votación por el pleno de la Asociación y personal calificado. Sin embargo, como cualquier lector podrá confirmarlo consultando la publicidad de los fabricantes de esta tecnología, la aprobación al desarrollo de la propuesta P1576 está siendo utilizada con fines comerciales, lo que manifiesta una falta de ética por parte de los fabricantes.

Aplicación del sistema convencional de protección

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), a través de sus investigadores capacitados dentro y fuera de México, ha desarrollado y sigue desarrollando proyectos de investigación con el fin de implantar esquemas de protección tanto para estructuras ordinarias como para instalaciones de alto riesgo. Así, el IIE a través de sus proyectos de investigación, de servicios técnicos especializados, de la información contenida en las normas internacionales y una estrecha comunicación y consulta con institutos como el Instituto Nacional de Seguridad contra Rayo de Estados Unidos (NLSI por sus siglas en inglés), el Instituto de Protección Contra Rayo (LPI por sus siglas en inglés) de Estados Unidos y la División de Investigaciones en Electricidad y el Rayo de Suecia (DELR por sus siglas en inglés) obtiene información y participa en la generación, adecuación e implantación de los resultados de vanguardia en la protección contra tormentas eléctricas, tomando como base el sistema convencional para la ubicación de terminales aéreas.

La proliferación e instalación de dispositivos no convencionales de protección contra tormentas eléctricas en México ha sido el resultado de una falta de normatividad, ya que cada fabricante utiliza sus propios criterios de diseño e instalación, generando una gran anarquía, con el consiguiente riesgo para los usuarios.

Actualmente, el IIE, junto con más de 8 empresas en México (fabricantes, distribuidores, privadas y de gobierno) están coordinados bajo la Asociación Nacional de Normalización y Certificación del Sector Eléctri-

co (Ance) para la elaboración de una norma mexicana tipo NMX para la protección contra tormentas eléctricas de estructuras ordinarias, tomando como base la norma internacional IEC 1024-1, 1-1 y 1-2. El objetivo de la norma mexicana es emitir las recomendaciones, basadas en el método de la Esfera rodante, para la ubicación e instalación de los elementos del sistema externo de protección, así como las acciones o recomendaciones para el establecimiento del sistema interno de protección. Con esta norma, México tendrá su primera guía de diseño y recomendaciones para la instalación de un sistema de protección contra tormentas eléctricas, independientemente de la tecnología utilizada.

Conclusiones

Durante muchos años, los criterios de protección mediante el uso de terminales aéreas de protección utilizadas en el sistema convencional han sido mejorados a través de estudios de campo y laboratorio para determinar la cobertura efectiva de protección, modificando los ángulos en el caso del método del cono de protección y relacionando los parámetros del rayo para la determinación de los radios de cobertura para el caso del método de la Esfera rodante. La aplicación de estos criterios ha reducido sustancialmente los riesgos de daño tanto en instalaciones industriales, comerciales y residenciales, como en el sector eléctrico, cuyas características de trazo y ubicación de las líneas de transmisión y distribución de energía los hace vulnerables a la incidencia de rayos.

En los últimos cincuenta años, la aplicación de nuevas tecnologías ha permitido nuevamente revivir el tema de protección contra rayo, proporcionando un nuevo auge y replanteando, con base en los nuevos descubrimientos sobre la física del rayo, criterios alternos de protección que permitan ofrecer realmente un aumento en la cobertura de protección.

Con la aparición de las tecnologías ESE y CTS, se han generado algunas preguntas respecto a su operación y la forma en que dichos dispositivos pueden ser evaluados para verificar su comportamiento. Mientras tanto, el rayo sigue siendo un fenómeno natural sumamente complejo y el conocimiento de sus parámetros eléctricos sigue obteniéndose en forma paulatina. Esto representa una severa limitación para que las nuevas tecnologías puedan ser totalmente evaluadas como un medio alternativo de protección contra tormentas eléctricas a corto plazo.

Por lo tanto, la mayoría de las instituciones de investigación relacionadas con la protección contra tormentas eléctricas han coincidido en enfrentar el reto de mejorar los sistemas de protección mediante las siguientes acciones:

a) Desde el punto de vista estadístico y de beneficios a corto plazo, es mucho más relevante desarrollar nuevos métodos de diseño

para determinar la distancia de protección relacionada con las zonas de protección que proponer dispositivos cuya operación bajo condiciones naturales es cuestionable.

- b) Continuar con las investigaciones, tanto de laboratorio como de campo, con el objeto de introducir parámetros del rayo adicionales, como polaridad, carga espacial, viento y humedad relativa sobre el proceso inicial de la microdescarga, paso previo al desarrollo del líder ascendente y su impacto tanto en terminales aéreas convencionales como en terminales aéreas con tecnologías nuevas.
- c) Continuar con las observaciones del rayo en su desarrollo natural en lugares con una elevada incidencia de rayos, aprovechando la infraestructura correspondiente para incluir la operación de terminales aéreas convencionales y no convencionales.
- d) Condensar toda la información estadística sobre el fenómeno del rayo, dándole un tratamiento efectivo con información de diferentes lugares y de diferentes fuentes de información.

Con el objeto de darle transparencia a los resultados, es necesario que dichos estudios, análisis, pruebas y evaluaciones sean realizadas por instituciones o personas ajenas a cualquier organización que tenga algún vínculo con fabricantes de dispositivos de protección contra tormentas eléctricas.

Arturo Galván Diego

Ingeniero electricista y Maestro en ingeniería eléctrica especialidad en sistemas de potencia por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, en 1984 y 1989 respectivamente. Doctor en la especialidad de compatibilidad electromagnética debido a descargas eléctricas atmosféricas por la Universidad de Uppsala, Suecia, en el período 1996-2000. Se integró al equipo de investigadores del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en 1986, en la Gerencia de Transmisión y Distribución, en donde actualmente sigue laborando. En 1990 obtuvo el Primer lugar en el 12º Certamen Nacional de Sistemas Eléctricos de Potencia con su tesis de maestría y en 1991 obtuvo el Premio al Desempeño Extraordinario que otorga anualmente el IIE. Ha publicado más de 30 artículos en foros nacionales e internacionales. Las actividades de investigación en las que participa son la protección contra rayo en instalaciones residenciales, industriales y de alto riesgo de fuego y explosión, protección en bajo voltaje de equipo electrónico sensible y sistemas de conexión a tierra.

agalvan@iie.org.mx

Raúl Velázquez Sánchez

Ingeniero Electricista por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), del Instituto Politécnico Nacional (1974). Maestro en Sistemas Eléctricos de Potencia en la Sección de Graduados e Investigación de la misma ESIME en 1978. Doctor en Filosofía por la Universidad de Montreal, Canadá en 1984.

En 1977 ingresó al IIE, donde integró un grupo de especialistas sobre Diseño de Líneas de Transmisión, Subestaciones Eléctricas y Redes de Distribución, grupo que hasta la fecha constituye la base de la Gerencia de Transmisión y Distribución del propio Instituto; donde el Dr. Velázquez es actualmente el Gerente. Fue profesor titular B de medio tiempo de la Sección de Graduados e Investigación de la ESIME.

Es autor de Manuales de diseño de líneas de transmisión que operan en regiones de alta incidencia de tormentas eléctricas y de redes de tierra en subestaciones. Coautor y editor del Manual de operación de la subdirección de transmisión, transformación y control de la CFE.

Entre 1980 y 1992 fue miembro de los Grupos de Trabajo encargados de las Guías 80 y 81 del IEEE, relativas al diseño y medición de Sistemas de Conexión a Tierra de Redes Eléctricas. Es autor de más de 50 publicaciones nacionales e internacionales en los temas de su interés y ha sido director de más de 15 tesis de Licenciatura y Maestría. Es miembro distinguido del IEEE (Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica) con sede en Nueva York.

rs@iie.org.mx

Referencias

- Berger K. & R.B.Anderson. Parameters of Lightning Flashes. Electra No. 41, 1976.
- British Standard BS 6651. Code of Practice for Protection of Structures Against Lightning. 1992.
- Davis N. H. III. The Rolling Sphere Interception Concept. 19th International Conference on Lightning Protection, Graz, Austria, 1988, pp. 95-97.
- Deller L. & E. Garbagnati. Lightning Exposure of Structures and Interception Efficiency of Air Terminals. Report of CIGRE Task Force 33.01.03 (Interception). 1998.
- Golde R. H. Lightning Protection. Butler & Tanner Ltd, London 1973.
- Golde R. H. Protection of Structures Against Lightning. Proc. Of the Institution of Electrical Engineers – Control & Science, Vol. 115, No. 10., 1968, pp. 1523-1529.
- Hedges, Killinworth. Modern Lightning Conductors: An Illustrated Supplement to the Report of the Lightning Research Committee of 1905 with Notes as The Methods of Protection and Specifications. Crosby Lockwood and Son. London.
- Horvath T. Computation of Lightning Protection. Wiley & Sons Inc. 1991.
- IEC 61024-1, 1-1 y 1-2. Protection of Structures Against Lightning. General Principles, Guide A and Guide B. 1990, 1993, 1998 respect.
- IEC 61312-1, -2, -3, -4. Protection Against Lightning Electromagnetic Impulse. General Principles. Shielding of Structures, Bonding Inside Structures and Bonding. Requirements of Surge Protective Devices. Protection of Equipment in Existing Structures. 1995, 1999, 2000, 1998 respect.
- IEC 61662. Assessment of the Risk of Damage Due to Lightning, 1996.
- IEC 61663-1. Lightning Protection – Telecommunication Lines. Part 1. Fibre Optic Installations. 1999.
- Krider E. P., Lightning Rods in the 18th Century. Lightning and Mountains '97, Chamonix Mont-Blanc, France, 1997, pp.3-9.
- Lee R. Lightning Protection of Buildings. IEEE Transac. On Industry Applications, Vol. IA-15, No. 3, 1979, pp.236-240.
- Lemmon, W. S. et al. Specifications for Protection of Buildings Against Lightning”. National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- National Fire Protection Association NFPA-780. Standard for the Installation of Lightning Protection Systems. 1997.
- Norma francesa NF C 17-100 Protection of Structures Against Lightning. Installation of Lightning Protective System.
- Preece, W. H. On the Space Protected by a Lightning Conductor Phil. Magazine, Vol. 9, pp. 427-430.
- Report of the Federal Interagency Lightning Protection User Group. The Basis of Conventional Lightning Protection Technology.
- Uman M. A. Lightning. Dover Pub. Inc. New York, 1984.
- Underwriters Laboratories Inc. UL. Installation Requirements for Lightning Protection Systems. 1994.
- Schonland, B. F. J. The Pilot Streamer in Lightning and the Long Spark. Proc. Roy. Soc. London, A, 220, 25-38, 1953.
- Van Brunt, R. J. et al. Early Streamer Emission Lightning Protection Systems: an Overview. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 16, No.1, 2000, pp. 5-24.