

PROTECCION DE EDIFICIOS Y ESTRUCTURAS DE LAS DESCARGAS ELECTRICAS ATMOSFERICAS

Una visión actualizada del tema

Ing. Ind. Carlos Mártony

Introducción

En 1752, hace 250 años, Benjamín Franklin inventó el primer sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas consistente en "una varilla metálica ubicada verticalmente en el exterior en un punto elevado, una varilla metálica hincada en tierra, y un conductor de conexión entre ambas". Franklin había percibido que de esa manera las descargas atmosféricas incidían en la varilla elevada, siguiendo el camino de menor resistencia hacia tierra, y de esa manera se reducía la posibilidad de ocasionar daños en otros elementos circundantes. Dicho diseño aun sigue vigente en la actualidad.

Desde Franklin hasta nuestros días mucha ha sido la investigación realizada para intentar reducir las pérdidas ocasionadas por los rayos. Dichas pérdidas son muy importantes por lo que, despierta un gran interés cualquier diseño que permita reducirlas.

Pérdidas ocasionadas por las descargas eléctricas de origen atmosférico

Las compañías de seguros han identificado a las descargas eléctricas atmosféricas como responsables de alrededor del 5 % del total de los montos pagados. Por otra parte, las empresas eléctricas atribuyen a los rayos, el 30 % de las interrupciones de suministro. En Estados Unidos las descargas eléctricas atmosféricas son responsables de cientos o miles de millones de dólares de pérdidas anuales. Por otra parte los rayos también causan incendios y desgracias personales por electrocución. El Servicio Meteorológico de Estados Unidos (National Weather Service) registró que, entre 1959 y 1994, los rayos causaron la muerte de 3.239 personas y provocaron lesiones a otras 9.818.

Cada día se producen en todo el mundo alrededor de unas 2000 tormentas eléctricas que en cada segundo producen de 30 a 100 descargas atmosféricas de nubes a tierra, o sea alrededor de 5 millones en un día, lo cual indica que en cada instante hay muchas propiedades y personas amenazadas por el riesgo eléctrico de origen atmosférico.



Los niveles de protección

Puesto que es imposible evitar que se produzcan las descargas eléctricas de origen atmosférico entre nubes y tierra, las normas de seguridad se refieren a los procedimientos para proteger bienes y personas de su inevitable incidencia.

Existen tres niveles de protección. El primero, al cual nos referimos en este artículo, consiste en establecer un camino directo a tierra para la corriente de descarga. Esta atracción o preferencia de que la descarga se produzca a través de un sistema de protección, evita que la misma incida directamente en otros puntos en los cuales podría ocasionar daños materiales o la electrocución de personas.

El segundo nivel de protección consiste en minimizar los efectos indirectos que puede causar una descarga eléctrica atmosférica mediante un adecuado diseño del recorrido de los elementos conductores que provienen del exterior, y que por lo tanto podrían captar, por fenómenos de inducción, parte de la energía disipada por una descarga. Estas medidas se complementan mediante la equipotencialización de elementos conductores y mediante blindajes adecuados.

Establecidas las dos barreras antes mencionadas, aun es posible que los pulsos inducidos por una descarga atmosférica, lleguen a través de los cables de suministro de

energía eléctrica o por los conductores que traen las señales de comunicaciones telefónicas o de radio desde el exterior, y ocasionen daños a equipos o personas. El tercer nivel de protección consiste en instalar filtros o dispositivos descargadores en las entradas o salidas de información y/o energía de los equipos. Estos dispositivos, que absorben el exceso de energía proveniente de la perturbación, pueden ser parte de la instalación general (protectores primarios), o integrar cada equipo individual.

En lo sucesivo nos referiremos a los sistemas de protección destinados a constituir el primer nivel de protección de una estructura.

Carga eléctrica de la tierra

La tierra está cargada negativamente con una carga de alrededor de 1 millón de culombios, y una carga igual y positiva reside en la atmósfera. La resistividad de la atmósfera es variable con la altura decreciendo a medida que esta aumenta, pero a partir de una altura de aproximadamente 50 km la resistividad se vuelve más o menos constante. Esta región se conoce con el nombre de electrósfera. Existe una diferencia de potencial de aproximadamente 300.000 voltios entre la superficie de la tierra y la electrósfera lo cual da un campo eléctrico promedio de 6 voltios por metro. Cerca de la superficie de la tierra en un día de buen tiempo el campo eléctrico es de unos 100 voltios por metro. Debido a que la atmósfera no es un aislador perfecto, hay una pequeña corriente entre la tierra y la electrósfera. Las cargas eléctricas negativas emergen de la tierra y suben hacia la electrósfera. Dicha corriente es de unos 2000 amperios. Con dicha intensidad de corriente, si la tierra no se volviera a cargar negativamente, disiparía toda su carga en menos de una hora.

Pero las descargas eléctricas atmosféricas que se producen durante las tormentas, recargan la tierra restituyendo su carga negativa. No siempre las descargas atmosféricas aportan cargas negativas a tierra pues algunas de ellas son positivas, vale decir que las cargas negativas van desde la tierra hacia las nubes. Pero por cada descarga positiva se producen 9 negativas, por lo que en un saldo final, las tormentas acaban por recargar negativamente a la tierra.

Características de las descargas eléctricas atmosféricas

Si bien las teorías sobre la forma en que se generan las cargas en una nube de tormenta son muy especulativas, en cambio, las características eléctricas de las descargas que la acumulación de dichas cargas produce, son bastante bien conocidas debido a las investigaciones realizadas por científicos a lo largo de muchos años.

Las descargas eléctricas de origen atmosférico se producen de 4 diferentes maneras:

- a. dentro de una misma nube
- b. de una nube a otra
- c. de una nube al aire circundante
- d. de una nube a tierra

Las tres primeras maneras de producirse las descargas tienen poca influencia sobre la superficie de la tierra, aunque si son una fuerte de preocupación para la aviación, pues se estima que un avión comercial recibe en promedio una descarga eléctrica de origen atmosférico por año.



Las descargas de nube a tierra son las que normalmente nos preocupan por sus efectos destructivos. Son sus características las que consideraremos a continuación.

Cuando las cargas negativas acumuladas en la parte inferior de una nube adquieren tal concentración que el campo eléctrico toma valores del orden de 3 o 4 kV por cm, comienza a producirse un proceso de ruptura dieléctrica del aire. Dicho proceso se produce en forma intermitente y escalonada. Cada escalón se va produciendo a continuación del anterior y va desarrollando una trayectoria ramificada de escasa luminosidad, que va descendiendo hacia tierra. La longitud típica de un escalón es de unos 50 metros, y el lapso entre escalones sucesivos es del orden de los 50 microsegundos. Esta descarga se denomina *trazador escalonado*.

Cuando la punta del trazador escalonado se acerca a la superficie de la tierra, su elevado campo eléctrico es suficiente para que desde determinados puntos de la tierra o desde edificios o estructuras, se produzca un proceso de ruptura dieléctrica del aire, similar a la del trazador escalonado, pero en sentido ascendente. Dichas descargas corona son conocidas como *trazador ascendente* o fuego de San Elmo, elevándose hasta alturas de 10 a 50 metros.

Cuando las puntas del trazador escalonado y el trazador ascendente se acercan lo suficiente como para ocasionar la ruptura dieléctrica del aire entre ellas, se unen los dos caminos ionizados, y se completa un camino conductor entre la nube y la tierra, produciéndose la primera *descarga de retorno*. Se denomina descarga de retorno pues su sentido de propagación es ascendente, vale decir contrario al sentido del trazador escalonado que, como vimos, es descendente. La descarga de retorno es muy luminosa, de aspecto ramificado y muy intensa, con corrientes del orden de decenas de miles de

amperios. El frente de onda se propaga a una velocidad del orden de 1/10 de la velocidad de la luz. La longitud típica del canal es de 5 km (min. 2 y max. 14 km), y la duración del recorrido desde tierra hasta la nube es del orden de 70 microsegundos.

La intensa luminosidad de la descarga es acompañada eventualmente de intensas ondas sonoras denominadas trueno, provocadas por la expansión supersónica del aire que rodea al canal de la descarga eléctrica,

Después de la primera descarga de retorno, el fenómeno puede finalizar sin otras descargas, pero generalmente ello no es así. En efecto lo más común son los rayos de múltiples descargas. Típicamente un rayo puede estar formado por 3 o 4 descargas de retorno, pero se han llegado a registrar rayos con hasta 26 descargas.

El proceso de producción de las descargas sucesivas es el siguiente. Después de la primera descarga de retorno, se produce una predescarga descendente de nube a tierra, que se denomina *trazador tipo dardo*, llamado así pues es una descarga luminosa que avanza en forma continua, como un dardo luminoso de unos 50 metros de largo, sin ramificaciones, que se desplaza por el canal por el cual se produjo la descarga de retorno precedente. El trazador tipo dardo deposita cargas a lo largo del canal de descarga previo, preparando las condiciones para que se produzca una segunda descarga de retorno, en la cual se drenan cargas adicionales disponibles en zonas más altas de la nube.

Después de la segunda descarga de retorno, puede volver a repetirse varias veces el mismo proceso en que un trazador tipo dardo precede a una nueva descarga de retorno. Cuando no quedan ya suficientes cargas en la nube para alimentar las descargas de retorno, estas cesan.

La descripción precedente deja bien claro que el rayo es un proceso que comienza con la ionización progresiva del aire entre la nube y tierra, lo cual va formando un canal conductor que una vez completado da lugar a la descarga intensa del rayo. Por lo tanto debe desecharse la errónea idea de que se trata de una brusca descarga disruptiva del aire entre la nube y tierra, como si se tratase de un gigantesco condensador en el cual súbitamente se produce la ruptura dieléctrica del aire descargando la carga de la nube a tierra. En efecto, sabido es que el campo eléctrico que provoca la tensión disruptiva del aire seco a la presión atmosférica es

$$E = 3 \times 10^6 \text{ V/m}$$

a una presión menor como a la altura de la nube, el valor puede ser 2 veces menor, y en presencia de gotas de agua 3 veces menor. Redondeando, asumiremos para el campo disruptivo un valor medio igual a

$$E = 10^6 \text{ V/m}$$

Si un rayo produjera súbitamente la ruptura dieléctrica del aire entre nube y tierra, atravesando una distancia de por ejemplo 10 kilómetros, el voltaje que se requeriría para ello sería de

$$V = E \times d = 10^6 \text{ V/m} \times 10^4 \text{ m} = 10^{10} \text{ Voltios}$$

Sin embargo los valores medidos en la práctica nunca llegan a esos valores, siendo del orden de 2×10^8 Voltios.

El mecanismo real de lo que ocurre en una descarga es que, las cargas de la nube crean *localmente* zonas con valores de campo del orden de 10^6 V/m que producen la ruptura dieléctrica del aire, y de esa manera, se va construyendo gradualmente un canal ionizado que cuando llega a tierra produce la descarga de retorno.

Corrientes eléctricas descargadas por un rayo

Las corrientes que circulan durante las sucesivas descargas de retorno de un rayo, son muy intensas, tienen muy corta duración y su forma de onda muestra inicialmente un crecimiento muy empinado hasta alcanzar su pico máximo, seguido de un decrecimiento más lento. Las descargas atmosféricas son un evento estadístico, por lo tanto los valores de las magnitudes que las caracterizan están siempre asociados a una probabilidad de ocurrencia. En los rayos con múltiples descargas, la primera es la que drena la mayor corriente, siendo las siguientes de menor intensidad.

De acuerdo con la distribución de frecuencias de las corrientes de pico de las descargas eléctricas atmosféricas realizadas por distintos investigadores, la primera descarga de retorno tiene las siguientes características:

- el 2 % tiene un pico de más de 140 kA
- el 10 % tiene un pico de más de 65 kA
- el 50 % tiene un pico de más de 18 kA
- el 90 % tiene un pico de más de 6,2 kA
- el 98 % tiene un pico de más de 3,1 kA

Las descargas siguientes tienen un pico de aproximadamente la mitad de los valores de la primera.

El pulso de corriente de una descarga tiene un rápido crecimiento inicial y en un tiempo del orden de unos pocos microsegundos llega a su máximo. Luego comienza a decrecer, y en unos 120 microsegundos transcurridos desde su inicio, la descarga cesa.

Si bien la energía disipada no es mucha, la potencia desarrollada en una descarga eléctrica atmosférica es muy grande, pues su elevada corriente se libera en muy corto tiempo. También las sobretensiones que aparecen en los cuerpos alcanzados por una descarga son elevadísimas pues aunque sólo se interpongan en su camino impedancias muy bajas, las elevadas corrientes del orden de los kA, producen caídas de tensión del orden de decenas o centenares de kV.

Modelos para estimar la zona de protección

Un punto colocado a una cierta elevación y conectado a tierra a través de una baja impedancia, al atraer hacia sí las descargas atmosféricas genera una zona de protección evitando que dentro de la misma las descargas incidan en otros elementos circundantes.

Tiempo atrás se utilizaba el modelo del cono de protección, pero actualmente ha sido sustituido por el modelo de la esfera rodante que tiene una mayor fundamentación científica.

El modelo del cono de protección

El criterio del cono de protección consiste en admitir que la punta de un pararrayos crea una zona de protección de forma cónica, cuyo eje es el pararrayos, su vértice la punta del pararrayos con un ángulo al centro α , que se asume igual a 45° para estructuras comunes y de 30° para estructuras de riesgo.

Para $\alpha = 45^\circ$ el área circular protegida al nivel del terreno tiene un radio R igual a la altura h de la punta del pararrayos. Para $\alpha = 30^\circ$ el radio es igual a 0,58 multiplicado por la altura.

El modelo de la esfera rodante

El punto exacto donde cae un rayo recién se define con el último escalón del trazador escalonado, y en esa definición es decisiva la longitud del último escalón. .

Por otra parte, la longitud del último escalón del trazador escalonado ha sido medida mediante métodos fotográficos, y se ha podido establecer que existe una correlación entre dicha longitud y la carga contenida en el canal de descarga. Como dicha carga, a su vez, está relacionada con la corriente descargada por el rayo, se tiene finalmente una relación entre la longitud del último escalón del trazador escalonado, y la corriente descargada por el rayo. Como ambos valores (la longitud del último escalón y la corriente de descarga del rayo), pueden ser medidos, se ha podido establecer una fórmula que relaciona a a ambos. La expresión general de dicha fórmula es la siguiente:

$$R_{SD} = K \cdot I^a$$

en la cual R_{SD} es la longitud del último escalón, denominada también distancia de descarga (striking distance)

K es una constante

I es la corriente de descarga

a es otra constante

Quiere decir que, del extremo del penúltimo paso del trazador escalonado, la descarga puede caer en cualquier punto de una esfera de radio R_{SD} . Por lo tanto la descarga se producirá en alguno de los puntos en que dicha esfera toque a la tierra o a una torre, mástil o conductor conectado a tierra.

Si se expresa R_{SD} en metros e I en kA los valores de K y a, según lo determinado por distintos investigadores están comprendidos entre los siguientes límites:

$$\begin{aligned} 3,3 < K < 10,6 \\ 0,51 < a < 0,85 \end{aligned}$$

En las Referencias 2 y 6 se menciona la fórmula debida a Golde, quien en 1977 halló los siguientes valores de las constantes: $K = 10$ y $a = 0,65$ de donde resulta la siguiente expresión:

$$R_{SD} = 10 \cdot I^{0,65}$$

en la que R_{SD} se expresa en metros e I en kA.

Consideremos por ejemplo un rayo con una descarga de retorno de 10 kA. Para dicho rayo la distancia de descarga vale

$$R_{SD} = 10 \cdot 10^{0,65} = 45 \text{ metros}$$

Por otra parte, la siguiente fórmula de la Conferencia Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos de Alta Tensión (CIGRE), nos permite calcular mediante la siguiente fórmula la cantidad de rayos cuya descarga excede una determinada corriente:

$$P = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{34} \right)^{2,6}}$$

en la cual P es la probabilidad expresada en tanto por uno que un rayo produzca un descarga mayor a I

I es la corriente de descarga del rayo expresada en kA

Si en la fórmula anterior hacemos $I = 10$ kA obtenemos un valor de $P = 0,96$ lo cual significa que existe un 96 % de probabilidades de que un rayo produzca una descarga de más de 10 kA. Consecuentemente, existe un 96 % de probabilidades de que un rayo tenga una distancia de descarga de 45 ó más metros.

Por lo tanto podemos considerar, con un 96 % de probabilidad que los fenómenos de descargas eléctricas atmosféricas podrán hacer impacto en aquellos puntos en los cuales una esfera rodante de 45 o más metros de radio toca a la tierra ó a un conductor, mástil, torre o cualquier parte de una estructura elevada sobre el nivel del piso. Para determinar dichos puntos hacemos rodar una esfera de 45 m de radio en todos sentidos apoyándose sobre tierra y sobre las estructuras cuya seguridad se quiere estudiar. Los espacios seguros son los que quedan verticalmente por debajo de la esfera rodante. Puesto que a mayores radios de la esfera corresponden mayores zonas de seguridad, al considerar solamente la esfera de 45 m de radio incrementamos la seguridad que proporciona la aplicación del modelo.

Partes que integran un sistema de protección

Un sistema de protección está integrado por las siguientes partes:

- a. los dispositivos terminales para la intercepción de las descargas y los conductores de interconexión entre ellos

- b. los conductores de bajada que conectan los dispositivos terminales con los electrodos de puesta a tierra
- c. los electrodos de puesta a tierra que ponen en contacto el sistema de protección con la tierra

Los dispositivos terminales

Los *dispositivos terminales para la intercepción de las descargas (Strike termination devices)*, son los componentes del sistema destinados a interceptar las descargas a los efectos de permitir su conducción a tierra a través de conductores apropiados. Los dispositivos terminales incluyen: terminales aéreos, mástiles metálicos, cables aéreos tendidos entre mástiles de soporte, partes metálicas estructurales del edificio, y dispositivos terminales especiales.

De las partes que constituyen un sistema de protección contra descargas eléctricas de origen atmosférico, el que más controversias provoca es el dispositivo terminal para la intercepción de descargas, principalmente debido a que muchos fabricantes ofrecen diseños especiales a los cuales les atribuyen propiedades que acrecientan la protección que puede brindar un simple pararrayos Franklin.

Veremos a continuación los distintos tipos de terminales para interceptar las descargas eléctricas de origen atmosférico.

Terminales aéreos

Un terminal aéreo (en inglés air terminal o lightning rod) es una punta metálica fabricada con un caño o una varilla maciza. La Norma NFPA 780 especifica la utilización de terminales aéreos distribuidos en los techos de los edificios, en cantidad y ubicación que la norma indica. En general un terminal aéreo es una punta, normalmente de baja altura, que sobresale no menos de 10 pulgadas (25 cm) por encima del área u objeto a proteger.

Mástiles

Un mástil metálico terminado en punta, es un dispositivo terminal cuya altura se determina a los efectos de crear una zona de seguridad de extensión suficiente para lograr una protección adecuada de la estructura. Tanto los terminales aéreos como los mástiles terminados en punta son dispositivos similares al pararrayos propuesto por Franklin

Cables aéreos tendidos entre mástiles

Un cable aéreo tendido entre mástiles, es un dispositivo terminal que en lugar de un punto, ofrece una línea para la intercepción de las descargas atmosféricas, y crea una zona de protección más extensa que la de una punta simple. Este dispositivo es extensamente usado por las empresas que suministran energía eléctrica, en sus

estaciones y subestaciones de transformación exteriores y líneas de transmisión. También son utilizados para proteger estructuras que contienen inflamables o explosivos.

Partes metálicas estructurales del edificio

Las partes metálicas estructurales de un edificio pueden actuar perfectamente como dispositivos de intercepción de las descargas eléctricas de origen atmosférico siempre que cumplan algunas condiciones que son especificados por las normas, entre las cuales las más importantes son la continuidad eléctrica y espesores suficientes.

Dispositivos terminales especiales

Dentro de esta denominación están comprendidos una gran cantidad de dispositivos, a los cuales sus respectivos fabricantes atribuyen propiedades especiales. Las controversias son numerosas y en general la agresividad de los departamentos de ventas hacen caso omiso de la fundamentación científica de sus productos, cuyas propiedades son mucho más una expresión de deseos que una realidad confirmada.

Pararrayos de puntas múltiples

Este diseño responde al criterio de que si un dispositivo terminal de una punta es efectivo, si tiene 4 o 5 será mejor. Está en discusión si las puntas adicionales constituyen realmente una mejora tangible para las posibilidades de captación de descargas. La Norma NFPA no menciona este tipo de dispositivo. Si nos atenemos al modelo de la esfera rodante, serían muy pocas las ventajas de un terminal de puntas múltiples, con respecto al de una punta única.

Pararrayos ionizantes

Los pararrayos ionizantes son los que buscan mejorar la captación de descargas atmosféricas, y por lo tanto ampliar la zona de seguridad mediante procedimientos de ionización del aire. Los dispositivos ionizantes se clasifican en radioactivos y no radioactivos.

Pararrayos ionizantes radioactivos

Se llaman *pararrayos radioactivos* a los dispositivos terminales que consisten en un cabezal que contiene un material radioactivo, y del cual sobresale una punta Franklin. El material radioactivo produce una ionización con lo cual se pretende que, al mejorar la conductividad del aire se facilite la descarga del rayo en la punta Franklin. Fue

concebido en 1914 por el físico húngaro L. Szilard, y patentado en los años 30 por el belga Capard. Como fuente radioactiva se han utilizado el Carbono 14, el Estroncio 90, el Radio 226 y el Americio 241. La desintegración radioactiva de estas sustancias produce partículas y radiaciones ionizantes. El proceso de desintegración es muy lento, por lo cual estas fuentes de radiación tienen una vida muy larga.

Por ejemplo el tiempo que debe transcurrir para que el número de núcleos en una muestra se reduzca a la mitad es de 1600 años para el Radio 226 y de 432 años para el Americio 241. Estos tiempos tan prolongados durante el cual dichas sustancias emiten radiaciones las transforman en un serio peligro ecológico, pues la destrucción del pararrayos, por accidentes o por demolición del edificio, podría darle a la sustancia radioactiva un destino inapropiado con la posibilidad de causar graves daños a la salud de los ciudadanos.

Al gran inconveniente mencionado se agrega el hecho de que *los pararrayos radioactivos no tienen mayor efectividad que un pararrayos común*. Ello se debe a que la ionización adicional producida por la fuente radioactiva es muy inferior a la ionización natural que se produce durante una tormenta. Varios institutos de normalización se han pronunciado negativamente en relación a los dispositivos ionizantes. Según estudios realizados en Inglaterra, no existen medios de ionización artificial que permitan incrementar el poder de atracción de un terminal aéreo. En igual sentido se ha pronunciado la Comisión Electrotécnica Internacional.

Lo que ocurre con los pararrayos radioactivos es algo que nos debe llamar a reflexión. Cuando un fenómeno estadísticamente aleatorio como las descargas eléctricas atmosféricas hace muy difícil demostrar la efectividad de un dispositivo, se crea un campo fértil para fabricantes oportunistas, que con un hábil manejo del mercado y una campaña de publicidad incisiva, pretenden para sus productos virtudes que no existen. Por ejemplo un fabricante pretendía que sus pararrayos radioactivos creaban un cono de protección cuyo ángulo al centro era de 60 ° hasta 78 ° según los modelos.

Por razones ambientales, los pararrayos radioactivos están prohibidos en muchos países, y fuertemente cuestionados en otros.

En Uruguay los pararrayos radioactivos comenzaron a instalarse por los años 50, utilizándose como fuente radioactiva el Radio 226 y el Americio 241, no existiendo en la actualidad un registro preciso de la cantidad instalada. Actualmente su importación está prohibida, y en el año 1998 se inició una campaña para el relevamiento de fuentes radioactivas en pararrayos.

Pararrayos ionizantes no radioactivos

Existen en el mercado otros tipos de pararrayos ionizantes que no emplean una fuente de material radioactivo para producir la ionización, y por lo tanto no merecen las objeciones que desde el punto de vista ambiental tienen los radioactivos. No obstante su efectividad también está cuestionada por las mismas consideraciones que descartan a los radioactivos: la ionización que generan es insignificante frente a la ionización natural de las descargas atmosféricas.

Los pararrayos ionizantes no radioactivos también se conocen en inglés por el nombre de ESE (Early Streamer Emission Devices) que traducido significa Dispositivos de Emisión Temprana de Trazadores. Con la ionización que producen se pretende aumentar el área de protección que brinda un pararrayos Franklin convencional.

Existen dos tipos, los de chispas y los de pulsos de tensión.

En el Dispositivo Ionizante Mediante Chispas, varios electrodos rodean a la punta principal de la cual están separados por pequeños espacios en los cuales saltan chispas para ionizar el aire. Las chispas son producidas por un dispositivo eléctrico de cebado que es alimentado por varios captadores inferiores que obtienen la energía del propio campo eléctrico de la tormenta.

En el Dispositivo Ionizante Mediante Pulsos de Tensión un transformador de alto voltaje emite pulsos de tensión cuando se detecta un aumento del campo eléctrico debido a la tormenta. Los pulsos generan descargas corona que ionizan el aire. El circuito requiere una alimentación por batería, la cual a su vez pueden cargarse desde la red eléctrica o mediante un panel solar.

Existen numerosos estudios e informes que contradicen los argumentos de los fabricantes que sostienen una mejora sustancial de la zona de protección por el efecto ionizante de dichos dispositivos especiales.

Si se compara la ionización producida por uno de dichos dispositivos con la ionización por efecto corona debido a la aproximación de un trazador escalonado, se comprueba que aquella es mucho menor. En experimentos de laboratorio con descargas largas, se ha visto que, a igual distancia, las descargas hacia una punta convencional y a una punta ionizante, tiene la misma posibilidad de ocurrir. En un estudio realizado por la NFPA que finalizó en el año 1994, de 303 trabajos 301 consideraron que los pararrayos ionizantes no mejoraban la efectividad de una punta convencional, y sólo 2 estuvieron a favor, pero eran presentados por los propios fabricantes. En definitiva se concluyó que el uso de los dispositivos ionizantes no era recomendable ya que no proporcionaban un margen sustancial de mejora. La norma inglesa dice expresamente que no hay razones suficientes para considerar que un pararrayos ionizante sea mejor que un pararrayos Franklin.

Los fabricantes de pararrayos ionizantes realizan ensayos de descargas entre un electrodo plano y una punta. En tales condiciones existe mayor probabilidad de descarga a una punta con dispositivo ionizante que a una punta convencional y en ello se basan para promocionar sus ventajas. En realidad, el modelo más adecuado para representar lo que ocurre en una tormenta, sería un cable colgante en lugar de un plano. Con dicho modelo (de punta a punta en lugar de plano a punta), las probabilidades de descarga desde el cable colgante a una punta ionizante y a una punta convencional son similares.

A favor del fabricante de pararrayos ionizantes, corresponde decir que ellos venden no solamente el pararrayos, sino el sistema de protección completo, y además un servicio

de inspección y mantenimiento. En general dichos sistemas están realizados siguiendo procedimientos constructivos adecuados, y sus fabricantes aseguran que su comportamiento es satisfactorio. En definitiva la promoción de una punta captora especial es un argumento para diferenciar sus sistemas de los que usan simples puntas convencionales tipo Franklin, lo cual constituye una forma de captar clientes.

Pararrayos disipativos

Sistemas disipativos (en inglés Dissipation Array System o D.A.S.) son los que pretenden impedir que se produzcan los rayos o que los mismos no caigan en una determinada estructura. El sistema en que se basan se ha llamado Sistema de Transferencia de Cargas (Charge Transfer System).

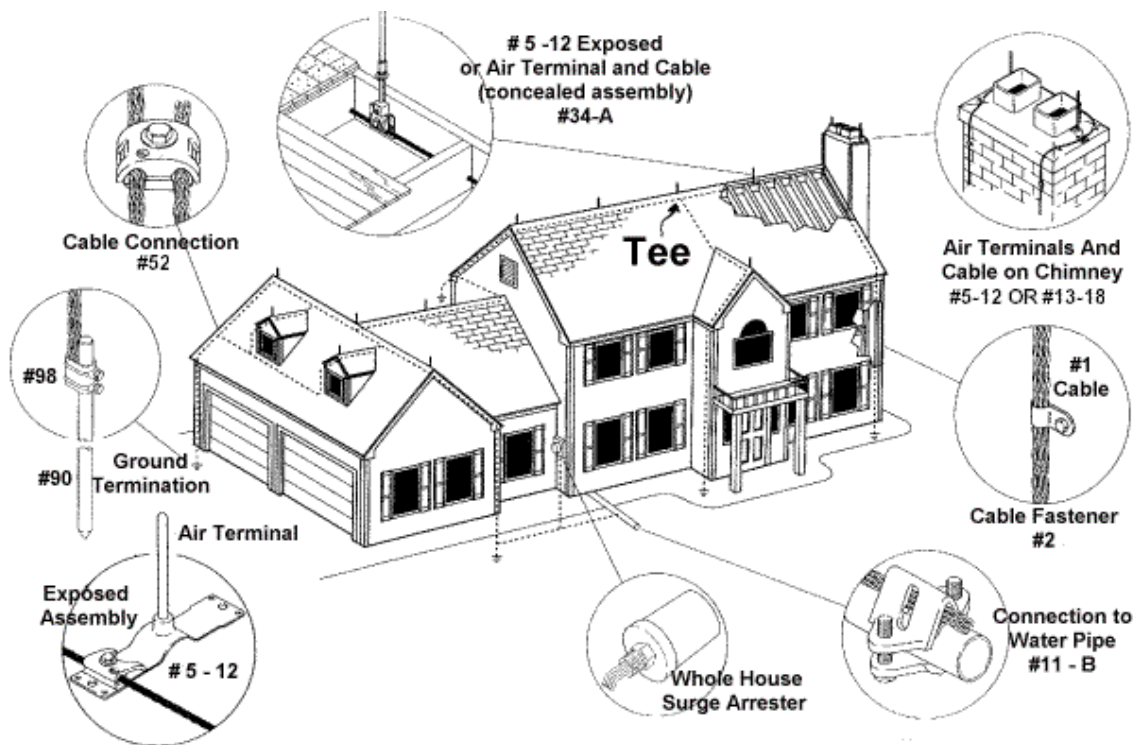
Es interesante retroceder en la historia y tratar de hallar el origen de la idea de los pararrayos disipativos. En sus experimentos Franklin había comprobado que se podían descargar objetos cargados con cargas estáticas, en forma silenciosa sin producir chispas, si se les acercaba a cierta distancia (algo mayor que la distancia que produce la descarga disruptiva), la punta aguzada de una varilla metálica conectada en su otro extremo a tierra. Esto le sugirió que también una nube electrificada podía ser descargada de la misma forma, y de esa manera se podrían evitar los rayos. Para ello, un día de tormenta erigió una varilla de hierro con punta aguzada, pero en vez de lograr que la nube descargara silenciosamente su carga a través de la varilla, consiguió que un rayo incidiera sobre ella. Ese resultado le permitió a Franklin reconocer que si bien una varilla de punta aguzada no le permitía evitar las descargas atmosféricas, en cambio actuaba como un receptor de las mismas, y de esa manera se protegían las estructuras circundantes. Sin embargo, a pesar de la comprobación anterior, Franklin siguió atraído por la idea del poder de las puntas y recomendaba que los pararrayos tuvieran su extremo terminado en una punta aguzada. Dicha configuración sigue aun siendo usada en la actualidad, *aunque la virtud de las puntas aguzadas de los pararrayos nunca ha sido establecida.*

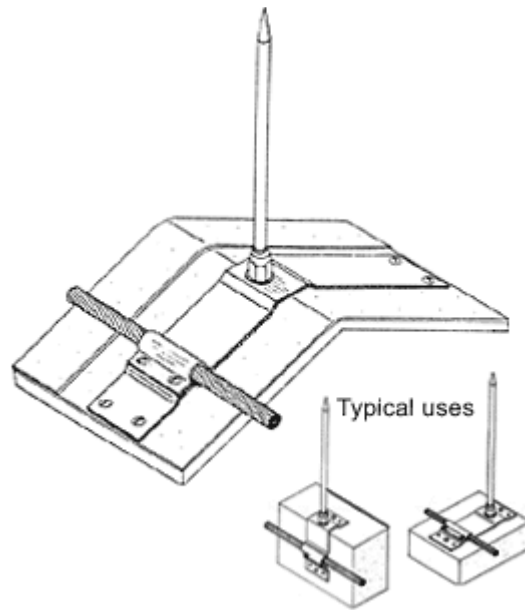
No obstante la idea de sistemas disipativos siguió atrayendo a algunos investigadores. El principio de funcionamiento pretendido es el siguiente. Si en presencia de una nube cargada negativamente tenemos una punta, esta se carga positivamente. Con un campo eléctrico E del orden de 10.000 V/m , se puede medir que la punta emite cargas, totalizando una corriente del orden de 20 microamperios. Por lo tanto colocando miles de estas puntas se pensó que la suma de las corrientes podía llegar a neutralizar la carga de la nube evitando así que el rayo se produzca. En los años 70 aparecieron firmas comerciales para explotar esta idea. En realidad la cantidad de pinchos necesaria es muy grande. Por ejemplo para totalizar una corriente de 1 Amperio se necesitarían 50.000 pinchos.

En experimentos realizados en el aeropuerto de Tampa a partir de 1988 por la Federal Aviation Administration se llegó a la conclusión que el sistema disipativo no evitaba la producción de descargas, por lo cual volvieron a colocar puntas Franklin en lugar de los dispositivos disipadores. La razón fundamental por la cual los sistemas disipativos no funcionan es que la reconstitución de las cargas positivas en la zona aterrada protegida, es muchísimo mayor que la velocidad de producción de iones por el sistema disipativo.

Por otra parte, el sistema disipativo puede llegar a ser peligroso pues los pinchos de acero inoxidable son muy numerosos y por lo tanto necesariamente finos. Cuando sobre alguno de ellos incide una descarga se pone incandescente, puede desprenderse y causar un incendio.

La principal razón por la cual los fabricantes del sistema reportan buenos resultados, es probablemente debido a que los paraguas o varillas recubiertas por pinchos se instalan asociados con puestas a tierra excelentes, de bajísima impedancia, actuando entonces con gran efectividad como dispositivos terminales interceptores de las descargas.





Conductores de bajada

Los conductores de bajada tienen por finalidad conducir a tierra las descargas eléctricas atmosféricas captadas por los dispositivos terminales. El comportamiento de dichos conductores tiene características muy diferentes al de los conductores comúnmente empleados en las instalaciones interiores de distribución de energía eléctrica. La diferencia se debe a que en la distribución de energía eléctrica se opera a frecuencia industrial, vale decir en forma estacionaria a 50 o 60 Hz según los países, mientras que en el caso de las descargas atmosféricas los fenómenos eléctricos ocurren con elevadísimas corrientes transitorias, que se desarrollan en tiempos muy breves.

La corriente que produce una descarga eléctrica atmosférica tiene un rápido crecimiento alcanzando su pico en unos 2 microsegundos, decreciendo después a una velocidad más lenta. La polaridad de la descarga se mantiene durante todo el pulso pues no hay una inversión en el sentido de la corriente.

La mayoría de la energía es debida a una importante componente continua, pero también existen importantes componentes de radiofrecuencia. Dichas componentes producen importantes efectos de autoinducción e inducción mutua y de efecto pelicular. Para tener una idea de las frecuencias asociadas con una descarga, podemos hacer la siguiente consideración. Si una subida hasta el pico insume digamos 1 microsegundo, podemos considerar que una senoide que llegue de 0 al máximo en ese tiempo, tendrá un período 4 veces mayor o sea 4 microsegundos, y la frecuencia correspondiente a ese período es de 0,25 MHz. La energía de la descarga también es radiada y puede producir acoplamiento en conductores próximos. La amplitud del espectro de frecuencias radiado depende del tiempo de crecimiento de la descarga. El campo eléctrico radiado es importante desde continua hasta aproximadamente la frecuencia de 1 MHz decreciendo a partir de ella.

En tales condiciones los conductores se comportan de manera muy diferente. En efecto, a frecuencia industrial un conductor de corta extensión de una instalación interior, se comporta como una simple resistencia ohmica, mientras que en el caso de una descarga atmosférica, debido a las características eléctricas de esta, tienen mucha importancia los fenómenos de autoinducción, inducción mutua y el efecto pelicular, que afectan al comportamiento del conductor de bajada de la descarga.

El circuito equivalente de un conductor de bajada en su configuración más sencilla, puede considerarse como la serie de una resistencia y una inductancia.

Por ello es tan importante que las bajadas sean lo más directas posibles, con el mínimo de curvas pues estas contribuyen a aumentar el valor de L , y si son inevitables su radio de curvatura debe ser el mayor posible, y en ningún caso menor que 20 cm.

Cuando tenemos dos conductores de bajada próximos, durante una descarga, sus diferentes impedancias pueden crear lateralmente diferencias de potencial que provocan las denominadas descargas laterales con el consiguiente peligro de incendio. Por ello deben interconectarse en tramos cuya longitud no sea excesiva

En el caso de un galpón con paredes metálicas bien aterradas, no es necesario un cable de bajada pues las propias paredes cumplen muy eficientemente dicha función, mucho mejor que un cable, pues su inductancia es mucho menor. El techo metálico debe conectarse en forma segura a las paredes para evitar chispas.

Siempre deben existir por lo menos dos caminos de descarga a tierra, y si la estructura tiene grandes dimensiones serán necesarias más. Cuando se produce una descarga, la corriente drena hacia tierra distribuyéndose entre los conductores de bajada, y en esas condiciones se producen fenómenos de inducción mutua entre las bajadas. Dicha inducción mutua aumenta la impedancia que las bajadas presentan a la corriente de descarga por lo cual, los conductores de bajada deben estar lo más alejados posible entre sí.-

Puesta a tierra de los pararrayos

Cada conductor de bajada debe terminar en un terminal de tierra o electrodo de tierra, dedicado al sistema de protección contra descargas atmosféricas.

Las prácticas recomendadas por la IEEE indican que la resistencia de las puestas a tierra deben ser menores que 25 ohmios para cualquier electrodo. Las condiciones locales pueden hacer variar dicho valor tentativo. En normativas del tipo comercial y de comunicaciones, se recomiendan valores de 10 ohmios. Valores de 1 a 5 ohmios se especifican en ciertas instalaciones de potencia que operan a las frecuencias industriales de 50 o 60 Hz.

La correcta realización de las puestas a tierra constituye un tema especializado que requiere conocimientos específicos así como la utilización de instrumentos para las mediciones de resistividad del terreno y de la resistencia de puesta a tierra de los electrodos. Al respecto remitimos al lector a la bibliografía específica sobre el tema.

Índice cerámico y mapas de densidad de descargas

El *Índice Cerámico* (keraunic level) es la cantidad de días tormentosos por año en un determinado punto geográfico. Por días tormentosos se entienden aquellos días en que se escuchan truenos en el punto considerado. Un día tormentoso se registra como uno sólo, en forma independiente de la *cantidad* de truenos que se escuchen en ese día. Los días en que se producen relámpagos pero no se escucha truenos, no son registrados como días tormentosos.

Si en el mapa de una región o un país se unen con líneas los puntos con igual Índice Cerámico, se obtiene lo que se denomina un *Mapa Isocerámico* (Isokeraunic Map).

En Estados Unidos se registran los índices cerámicos desde 1894, y existen detallados mapas isocerámicos. En nuestro país la Dirección de Meteorología llevaba registros pero actualmente están discontinuados. En muchos otros países pueden obtenerse mapas isocerámicos. Los valores de los Índices Cerámicos en Estados Unidos varían entre valores típicos de 10 días por año (en la costa oeste), hasta 90 en el estado de Florida, uno de los más castigados con días de tormenta. En nuestro país el Índice Cerámico está comprendido entre 30 y 50 días por año. Obviamente se trata de valores medios pues existen variaciones de año a año, y también variaciones locales dependientes de la topografía, minerales del suelo, humedad, etc., que no son tomados en cuenta en los mapas isocerámicos.

Los mapas isocerámicos si bien dan una información importante, ella no es de gran precisión en lo que respecta a las descargas atmosféricas de nubes a tierra. A los efectos de proyectar un sistema de protección contra las descargas atmosféricas, es muy importante conocer la densidad media anual de descargas nube-tierra que promedialmente se producen en el punto considerado. Se expresa en cantidad de descargas por kilómetro cuadrado y por año. De esa manera si tenemos una cierta área a proteger, podremos tener una idea de la cantidad media de rayos que puede incidir en ella en el término de un año. Por esa razón en algunas regiones se han confeccionado mapas en que aparecen unidos por líneas, los puntos de igual densidad de descargas.

Evaluación de la necesidad de instalar un pararrayos

Existen diversos procedimientos para determinar si en una estructura o edificio es conveniente instalar un sistema de protección contra descargas atmosféricas.

Hay casos obvios en que un sistema de protección es necesario. Algunos ejemplos son:

1. locales con concentración de grandes multitudes
2. instalaciones que deben brindar servicios esenciales con la máxima continuidad
3. localidades en que la frecuencia de descargas es excepcionalmente elevada
4. estructuras altas aisladas
5. edificaciones que contienen materiales explosivos o inflamables
6. edificios que contienen herencias culturales irremplazables

En los demás casos se utilizan procedimientos de evaluación, que consisten en:

a. estimar la cantidad de descargas N_d que pueden incidir en el edificio en un año, según el área ocupada por el edificio y su altura, y la densidad de descargas en la zona en que está ubicado. En un edificio de altura muy pequeña y sin edificios circundantes, N_d sería igual al valor de la densidad de descargas por año y por kilómetro cuadrado de la localidad, multiplicada por el área del edificio en kilómetros cuadrados. En un edificio de altura H y rodeado por otras estructuras, la superficie a utilizar en los cálculos se obtiene aplicando alguno de los modelos con los que se determina el área de protección

b. comparar dicha cantidad con un número preestablecido de cantidad aceptable de descargas en un año, N_c , que se determina teniendo en cuenta las características estructurales del edificio, el contenido del edificio, los ocupantes del edificio y las consecuencias que una descarga podría ocasionar.

Para un edificio común, de uso normal, el valor de N_c es igual a 0,0015 descargas por año (o inversamente 1 descarga cada 667 años). Si las condiciones son especiales, este valor se divide por un coeficiente C que normalmente es > 1 . Si $N_d > N_c$ se recomienda instalar un sistema de protección contra descargas.

En las normas se establecen los procedimientos y los coeficientes para hacer todos los cálculos.

La Norma NFPA 780

En el año 1904 la National Fire Protection Association (NFPA) de los Estados Unidos, editó por primera vez su norma NFPA 78 titulada "Specifications for Protection of Buildings Against Lightning", basada en la norma británica British Lightning Code. Luego se fué actualizando periódicamente, habiendo llegado en la actualidad a su revisión N° 26. En la edición del año 1992, cambió su designación numérica, de NFPA 78 a NFPA 780, y en la edición del año 1995 cambió su nombre de "Lightning Protection Code" a "Standard for the Installation of Lightning Protection Systems". Actualmente está vigente la edición 2000. Aunque el uso de esta norma es voluntario, ha sido adoptada en EEUU por muchas jurisdicciones regionales y agencias gubernamentales, y de hecho es un Código Nacional.

La norma NFPA 780 codifica la llamada tecnología convencional de protección contra descargas, basada principalmente en el uso generalizado de los denominados terminales aéreos (air terminals), que son pequeñas varillas de baja altura distribuidas en forma reticular en los techos, y conectadas entre sí y con los conductores de bajada a tierra. La norma también establece las especificaciones para el uso de mástiles y de líneas aéreas entre mástiles.

La Norma tiene tanto detractores como defensores. Luego de una cuidadosa lectura de la misma, a pesar de sus 26 revisiones, se pueden encontrar todavía, desde pequeños errores de conversión de unidades inglesas a métricas, o frases ambiguas o carentes de explicación, hasta inconsistencias en la aplicación de los criterios para determinar las zonas de protección. Obviamente la Norma no es un texto que deba explicar las razones de los criterios adoptados, pero por lo menos debería esperarse mayor coherencia en su aplicación. Algunos críticos de la norma, hacen comentarios suspicaces al mencionar

que en el Comité que elabora la Norma hay demasiados representantes de fabricantes de terminales aéreos y sus accesorios, los cuales tratan de defender sus intereses de mercado. Otro comentario que se encuentra en algunos artículos especializados es que, aparentemente a partir de los años 50 prácticamente cesó toda investigación relacionada con los sistemas tradicionales de protección contra descargas, como si todo el mundo ya estuviera de acuerdo con su infalibilidad.

No obstante todas las críticas, existe consenso en considerar la norma NFPA como una referencia que establece las condiciones básicas mínimas a cumplir por un sistema de protección contra descargas atmosféricas, con la salvedad de que las descargas atmosféricas son un fenómeno de la naturaleza con características aleatorias y a veces impredecibles.

En un extenso y documentado informe de fecha junio de 2001, titulado "The Basis of Conventional Lightning Protection Technology", el Federal Interagency Lightning Protection User Group, recomienda: "... continuar con el mantenimiento de la norma NFPA 780... y proceder al inmediato lanzamiento de la Edición 2000, para asegurar la consistencia de las técnicas de protección contra descargas usadas en Estados Unidos con las mejores prácticas disponibles y los nuevos desarrollos de la tecnología ..."

Por otra parte los conceptos de protección aplicados a las líneas de transmisión de energía eléctrica que presentan grandes extensiones expuestas al riesgo, han demostrado ser eficientes. El hilo de guardia protege a las líneas cuya tensión nominal es de 60 o más kV. Para tensiones menores un hilo de guardia no protege a la red debido al fenómeno denominado back-flash cuya explicación es la siguiente. Cuando una descarga incide directamente sobre el hilo de guardia, se produce una elevación de tensión de este con respecto a la tierra lejana o remota. Entonces puede producirse una descarga del hilo de guardia sobre la línea. Ello no sucede en las redes de 60 o más kV pues los aisladores de plato soportan sin contorneo dicha sobre elevación de tensión del hilo de guardia.

Proyecto de norma NFPA 781

Los fabricantes de los sistemas de protección con dispositivos terminales del tipo ionizante no radioactivo (denominado ESE en inglés), han tratado de que la NFPA aprobara una propuesta de norma con el número NFPA 781, a los efectos de impulsar dicho tipo de sistema en el mercado. La NFPA creó una comisión externa que estudió la solicitud, confirmando que no existen bases científicas para aprobarla. En otras palabras, la mayoría de las investigaciones realizadas hasta el presente, muestran que el sistema ESE no es mejor que los sistemas convencionales basados en pararrayos del tipo Franklin. Pero dicha comisión también agregó una frase inquietante al expresar que tampoco existía una base científica para los pararrayos convencionales tipo Franklin cubiertos por la norma NFPA 780. A consecuencia de ello surgió el documento emitido por el Federal Interagency Lightning Protection User Group mencionado anteriormente.

Todo lo dicho confirma la existencia de grandes presiones comerciales para aprobar los sistemas de protección cualesquiera que ellos sean. La gran dificultad que presentan

estas controversias, es que los ensayos de laboratorio no pueden simular las condiciones reales en las que se producen las descargas eléctricas atmosféricas, ni tener en cuenta las infinitas variaciones que se producen en la práctica.

Perdidas indirectas de las descargas atmosféricas

Los sistemas de protección contra descargas atmosféricas contruidos según la norma de la NFPA, constituyen el primer nivel de protección, el cual como ya vimos, debe ser complementado por el segundo y tercer nivel, si se quiere obtener una seguridad adecuada.

Debe tenerse en presente que las pérdidas por las consecuencias indirectas de las descargas son, según un estudio realizado por una empresa de seguros, mucho mayores que las pérdidas ocasionadas por la incidencia directa de las descargas.

Conclusión

Maxwell sugirió que un pararrayos Franklin atraía hacia una estructura un mayor número rayos que en el caso de que estuviera ausente. Esa afirmación es totalmente correcta pues basta tener en cuenta que la zona de seguridad brindada por un pararrayos Franklin al elevarse por encima de la parte más alta del edificio aumenta el área protegida, lo cual quiere decir que el pararrayos recibe más rayos de los que recibiría el edificio si el pararrayos no existiera. Pero si se instala un sistema de protección, debe realizarse según todas las reglas del arte, para captar las descargas y conducir las en forma segura a tierra, de lo contrario su existencia puede resultar contraproducente. Un buen sistema de protección comienza en el proyecto del propio edificio, y su ejecución se inicia en los pozos de la fundación. En nuestro país en que predominan las estructuras realizadas en hormigón armado, las armaduras de la fundación son un excelente medio de conducir las descargas a tierra, y el propio hormigón de la fundación es un excelente electrodo de puesta a tierra. Para ello se conectan las armaduras entre si mediante un cable de cobre desnudo de 35 mm² empalmado y uniendo con soldadura aluminotérmica. Luego se levantan conexiones hasta las regletas de puesta a tierra, a donde convergen los conductores del sistema de protección, entre ellos los conductores de bajada de los dispositivos interceptores de las descargas atmosféricas.

Instalar un sistema de protección en un edificio ya construido es una tarea que no siempre permite lograr una solución ideal.

Pero un buen proyecto y una buena ejecución no son suficientes. El sistema de protección debe ser inspeccionado y mantenido periódicamente para asegurar que los parámetros del diseño original siguen vigentes.

Luego de la lectura del texto precedente creo que el lector se hará seguramente las siguientes preguntas: ¿Debo instalar en el edificio proyectado un sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas? ¿En caso afirmativo qué sistema debo adoptar?. La primera pregunta requiere una respuesta previa: ¿Qué riesgos estoy

dispuesto a tolerar? En cuanto a la segunda pregunta, todo parece indicar que hoy por hoy, los sistemas basados en los pararrayos Franklin son los más efectivos.-
