

Pararrayos no Convencionales

Prof. César Briozzo y Prof. María Simon, *Senior Member, IEEE*

Resumen-- Se presenta un análisis del funcionamiento propuesto y efectividad de terminales aéreos no convencionales para protección contra descargas atmosféricas. Se presenta en primer lugar el fundamento de la protección convencional. Luego se estudian los sistemas llamados disipativos o de transferencia de carga (CTS), con los que se dice impedir la formación del rayo sobre la estructura a proteger modificando las condiciones eléctricas de la atmósfera. Finalmente se tratan los llamados dispositivos de cebado o de emisión adelantada de trazador (ESE), cuyo pretendido objetivo es la captación de descargas en un área considerablemente más amplia que la que se protege mediante captores o pararrayos convencionales, como puntas Franklin o hilos de guardia. Se analiza la literatura existente, la normativa en uso, los resultados de experimentación y campañas de observaciones y las implicancias legales. Se concluye que no hay evidencia teórica ni experimental que sustente la posibilidad de impedir la formación del rayo ni la de extender la zona de protección más allá de la de un captor convencional. Estas conclusiones se reflejan tanto en decisiones judiciales sobre controversias en este contexto como en las normas internacionales más aceptadas.

Palabras Clave—Captore, cebado, CTS, disipativos, distancia de impacto, ESE, pararrayos.

I. INTRODUCCIÓN

EL propósito de la protección contra descargas atmosféricas es evitar los daños que puede producir el impacto de un rayo local o remoto a personas, estructuras, valores y a la continuidad de servicios. Esto se logra mediante dispositivos y sistemas que conduzcan a tierra la corriente del rayo directo en forma controlada y limiten a niveles seguros los efectos indirectos de la descarga. La primera fase de la acción de protección contra el rayo directo la constituye el impacto al elemento del sistema de protección destinado a recibirlo o captarlo, elemento que llamamos comúnmente pararrayos. Prácticamente desde el momento en que Benjamín Franklin propone su sistema de captor de descarga, conductor de bajada y puesta a tierra -básicamente el sistema que ha

C. Briozzo es Profesor Titular del Departamento de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Universidad de La República, Montevideo, Uruguay. Es además responsable de la División Potencia de Controles S.A., Montevideo, Uruguay. (Correo electrónico: cesar@fing.edu.uy).

M. Simon es Profesora Titular del Departamento de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Universidad de La República, Montevideo, Uruguay. Actualmente es la Ministra de Educación y Cultura de Uruguay, Ministerio también a cargo de Ciencia y Tecnología. (Correo electrónico: msimon@fing.edu.uy).

Artículo presentado al 7º Encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas EPIM - Oct. 2008-Uruguay.

probado su efectividad durante más de 250 años y que seguimos usando- quedaron planteados dos temas. Uno de ellos fue la determinación (y la ampliación) del área que un elemento captor de rayos era capaz de proteger interceptando las descargas que de otro modo impactarían en la misma y el otro implicaba la posibilidad de impedir directamente la formación del rayo. A lo largo de estos 250 años se han propuesto entonces diferentes sistemas alternativos con el fin de influir en el fenómeno en uno u otro sentido.

Es así que sobre todo en las cuatro últimas décadas se han estado comercializando dispositivos que mediante diversos métodos pretenden o bien aumentar significativamente el área de captación de descargas con respecto al pararrayos convencional o bien evitar la formación del rayo sobre la instalación a proteger. En la literatura se los denomina generalmente “sistemas no convencionales”. El propósito de este trabajo es presentar el funcionamiento pretendido de estas propuestas y analizar su validez.

II. ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Un sistema de protección contra descargas atmosféricas está compuesto esencialmente por el sistema captor del impacto, el conductor de bajada y la conexión a tierra. Si la instalación a proteger lo requiere se debe incluir un conjunto de interconexiones que disminuyan a niveles tolerables las diferencias de potencial generadas entre diferentes partes de la instalación protegida así como elementos supresores de tensiones transitorias entre conductores eléctricos creadas por el impacto local o remoto del rayo.

El sistema captor del impacto o interceptor del rayo consiste en uno o más elementos metálicos previstos para recibir la descarga de manera que el impacto no se produzca en partes vulnerables de la estructura o sistema a proteger. Pueden ser parte de la estructura a proteger o pueden ser elementos agregados, como barras metálicas verticales o conductores horizontales suspendidos sobre dicha estructura o sistema. En algunos casos los elementos captore se instalan separados de la instalación a proteger, de manera que la corriente del rayo no circule en las proximidades o por partes de la misma, aún en forma controlada. Es común esta exigencia en instalaciones con alto riesgo de explosión.

Las barras verticales se han fabricado tradicionalmente con la terminación superior en punta y se las llama “Puntas Franklin”, ya que fue Franklin quien propuso esta implementación desde un principio. El pararrayos común que se emplea en el Uruguay es una forma de punta Franklin. Los

conductores horizontales suspendidos suelen llamarse “hilos de guardia” y también fueron propuestos por Franklin en 1753 [1].

Ya sean propios de la estructura o agregados, los elementos metálicos que componen el sistema captor deben ser capaces de interceptar la descarga, soportar el efecto del impacto sin daños que afecten su función, efectividad y durabilidad, con sección suficiente como para conducir la corriente del rayo y ubicados en todos los puntos donde el impacto es probable. Dichos puntos se determinan mediante metodología basada en las propiedades físicas de la descarga atmosférica. Su efectividad depende fundamentalmente de su posición en la estructura a proteger y es independiente de detalles de forma o estructura en una escala de hasta algunas decenas de centímetros [2]. En particular la evidencia experimental de los últimos años indica que la terminación en punta no mejora la efectividad [3]. La última edición de la norma NFPA780 [4] que regula este tipo de instalaciones en Estados Unidos establece, en cada punto en que se trata el tema, que la terminación de las barras verticales puede ser tanto en punta como roma. En esta y otras normas como la CEI se establecen datos dimensionales solamente en el sentido de garantizar la necesaria capacidad de conducción de corriente y la robustez frente a los impactos [5].

El sistema de conductores de bajada que debe llevar la descarga a tierra consiste también en elementos metálicos adicionales tales como cables de dimensión adecuada para conducir la máxima corriente prevista y elementos de la propia instalación, llamados bajadas naturales, como torres metálicas, hierro de armado estructural de hormigón e incluso caños metálicos de agua que tengan la continuidad y las dimensiones adecuadas. El diseño del sistema de bajada debe tender a minimizar efectos de la corriente tales como sobretensiones en los propios conductores que pueden producir arcos a la estructura y campos electromagnéticos que afecten las instalaciones. Esto se logra minimizando la impedancia general del sistema mediante conductores múltiples - de longitud mínima y mínimo número de curvas - que dividan la corriente en forma razonablemente simétrica en torno a la instalación y usando los componentes naturales en la mayor extensión posible.

En las instalaciones en que no se permite la circulación de corriente de la descarga por partes estructurales las bajadas deben ser todas adicionales y estar suficientemente alejadas de la estructura a proteger, usualmente varios metros, debido a las sobretensiones por los conductores. Por ejemplo, la corriente de un rayo de valor de pico 20 kA (más del 50% de los rayos supera ese valor) circulando por un cable de bajada de 10 m de altura produce una tensión en la punta con respecto a tierra o respecto a una estructura próxima de entre 200 kV y 2 MV. El diseño según normas actuales implica prever tensiones de hasta 4 MV para ese tipo de instalación.

El sistema de puesta a tierra consiste en una interconexión de electrodos verticales y horizontales enterrados y partes conductoras enterradas de la estructura a proteger. La extensión y disposición debe ser tal que se asegure la

dispersión de la carga en el terreno de manera que las diferencias de potencial de tierra en la zona de la instalación causadas por la corriente del rayo se reduzcan a límites tolerables por personas y equipos.

El sistema de interconexión equipotencial consiste en conductores que unen todos los elementos metálicos de la estructura de manera de prevenir los efectos de las tensiones transitorias creadas por los rayos. Entre esos efectos se cuentan desde diferencias de potencial de tierra entre equipos hasta arcos eléctricos desde conductores de bajada a otros objetos metálicos.

Los supresores de transitorios son en general dispositivos de comportamiento fuertemente no lineal frente a la corriente y que limitan las sobretensiones que se crean entre conductores de servicios de energía o información y la estructura, ya sea porque un rayo directo en la estructura eleva la diferencia de potencial entre la misma y sus cables de servicios o porque un rayo remoto afectó el potencial de dichos cables con respecto al de la estructura.

Para esta presentación se debe analizar en primer término el funcionamiento del sistema captor. Sin embargo los otros componentes del sistema de protección deben ser tenidos en cuenta para la evaluación de la performance de todos los sistemas propuestos.

III. LA DESCARGA ATMOSFÉRICA Y EL FUNCIONAMIENTO CONVENCIONAL DEL CAPTOR

A. Estructura de la Nube y Fases de la Descarga

Una nube o célula típica de tormenta eléctrica se forma, madura y se disipa en unas horas. En su fase madura tiene su base a unos 2- 4 km del suelo, una altura que puede llegar hasta 20 km o más y se extiende horizontalmente unos 8-16 km [6]. Contiene agua en distintos estados, como agua líquida en partículas o gotas de distintos tamaños, diversas formas de hielo, nieve, y vapor de agua, llamadas todas hidrometeoros. Presenta grandes diferencias de temperatura, desde alguna decena de grados Celsius en la base, pasando por 0°C a unos 4-5 km de altura hasta unos -50 °C en la parte superior. En su interior se producen fuertes corrientes de aire ascendentes y descendentes del orden de 40 a 100 km/h [6], [7], [8]. La electrificación interna se produce fundamentalmente por procesos de interacción entre los distintos hidrometeoros y a grandes rasgos se compone de carga negativa en la parte inferior de la nube, carga positiva en la parte superior y usualmente una pequeña zona de carga positiva en una parte relativamente reducida de la base de la nube.

La carga total de la parte negativa es de unos - 40 C y tiene su centro de cargas a unos 7-8 km de altura, en la zona de temperaturas de -10 a -25 °C. La carga positiva también es de unos +40 C y tiene su centro de cargas a una altura de 10 a 12 km. La zona de carga positiva en la base es de unos +2 a +5 C y se cree que no siempre está presente [8]. Todos los valores numéricos dados en el presente trabajo corresponden aproximadamente al caso promedio, en la realidad presentan mucha dispersión (figura 1).

El 90% de las descargas nube-tierra se inician en el interior de la nube y llevan carga negativa a tierra. Una descarga de este tipo se inicia en un fenómeno llamado “Ruptura Preliminar”, una descarga electrostática en el interior de la nube, en la zona de carga negativa, típicamente a altura de unos 5 a 8 km. La ruptura preliminar es seguida por un proceso de descarga dentro de la nube que dura algunos milisegundos a partir del cual se comienza a formar la llamada “Guía Escalonada” de la nube a tierra.

La guía escalonada consiste en un tubo conductor de aire ionizado y cargado negativamente, de unos 10 cm de diámetro y rodeado de una capa de algunos metros de espesor de ionización tipo corona [9]. Ese tubo se va formando a saltos o pasos de longitud media típica 50 m, con un intervalo de 20 a 50 μ s entre saltos, propagándose hacia tierra a una velocidad media típica de 20 cm/ μ s. Usualmente se ramifica, y en general una o dos ramificaciones llegan a las proximidades del suelo en unos 20 a 30 ms. Cuando la punta de la guía llega a cierta distancia del suelo que puede ser de decenas a centenas de metros, se produce el llamado “proceso de enlace” (attachment process en la literatura en inglés, la más abundante), estableciéndose un canal conductor entre el suelo y la nube con una carga neta negativa total de 3 a 5 C. Se produce entonces la “descarga de retorno”, el rayo propiamente dicho desde el punto de vista de las protecciones, que se propaga hacia la nube a 1/3 de la velocidad de la luz, llevando carga negativa a tierra desde el canal de la guía y desde la nube, con una corriente impulsiva cuyo pico puede alcanzar hasta 400 kA. Su trayectoria sigue la de la guía y reproduce su forma a tramos de distintas direcciones (a esto se debe la típica forma en zigzag irregular de los rayos). Es usual que luego de la descarga de retorno el camino recorrido por la descarga de retorno vuelva a adquirir carga de la nube y provocar varias descargas de retorno subsecuentes, en promedio unas 4 veces, aunque se han registrado casos de más de 30. Estas descargas subsecuentes no presentan ramificaciones.

El rayo puede iniciarse también desde estructuras a tierra. El proceso de formación presenta algunas diferencias pero la descarga principal se propaga siempre desde tierra. Algunos rayos llevan carga positiva neta a tierra. De todas formas hay que tener presente que la corriente del rayo es siempre movimiento de electrones.

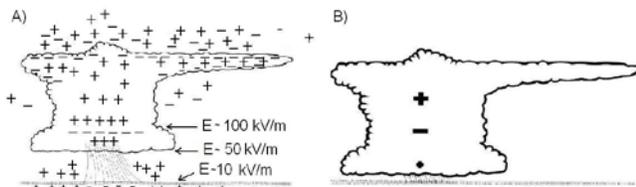


Fig. 1. A) Carga eléctrica en una nube. B) Modelo de estructura de carga de una nube. Adaptado de MacGorman y Rust [8].

B. El Proceso de Enlace

Los objetos en tierra - suelo, estructuras, árboles y el sistema captor- recién intervienen en el fenómeno durante el proceso de enlace, es decir unos 20-100 ms después del inicio de la descarga dentro de la nube y cuando la guía escalonada está formada casi en su totalidad.

En condiciones de buen tiempo la tierra está cargada negativamente, el campo eléctrico en el aire apunta hacia el suelo y tiene un valor medio de 100 V/m. Si hay una nube de tormenta eléctrica típica como la descrita la tierra adquiere carga positiva y el campo al nivel del suelo apunta hacia arriba con un valor medio de unos 5 - 10 kV/m. El campo en la base de la nube es de unos 50 kV/m. La diferencia de potencial entre nube y tierra puede ser de decenas a cientos de megavoltios.

Cuando no circulan corrientes la superficie de la tierra y de los objetos y estructuras ubicadas sobre ella puede considerarse como equipotencial, con el campo perpendicular a la misma. Si bien el campo medio es de algunos kilovoltios por metro, en bordes y zonas de bajo radio de curvatura de objetos salientes o expuestos la variación del potencial con la distancia aumenta drásticamente (figura 2). Por lo tanto el campo local en esas zonas es mucho mayor, llegando a valores cercanos al de la ruptura del aire como dieléctrico (del orden de 1 a 3 MV/m). En esos puntos se genera ionización y emisión tipo corona a su alrededor, que inicialmente es de unos pocos microamperes. Zonas típicas incluyen bordes y puntas de edificios y torres, árboles, rocas, mástiles, hilos conductores suspendidos y objetos similares.

Cuando la guía escalonada (llamado también líder descendente) con su carga eléctrica ya mencionada y su potencial en un valor del orden del de la nube se acerca al suelo el campo eléctrico promedio entre punta de guía y suelo va aumentando y también la emisión corona de todos los puntos salientes del tipo mencionado, que llega al orden de unidades de amperes.

Cuando el campo promedio entre la punta de la guía y los puntos salientes de tierra (que son múltiples en cualquier entorno normal) llega a unos 500 kV/m las corrientes corona de dichos puntos aumentan y se transforman en canales ionizados que se propagan hacia arriba de manera análoga a la propagación de la guía escalonada, impulsados por el propio campo eléctrico. Las velocidades medias de propagación observadas varían desde 1-2 cm/ μ s a poco menos de 30 cm/ μ s [1], [2]. Esos canales se llaman “guías o trazadores ascendentes” (upward leaders, a veces también streamers). Cuando el campo entre la punta de uno de esos trazadores ascendentes y la punta de la guía descendente llega a un valor suficientemente alto se completa el canal conductor entre la tierra y la nube y se produce la primera descarga de retorno entre la nube y el objeto que emitió el trazador ascendente. El objeto se convierte entonces en el punto de impacto. El trazador ascendente exitoso, que es de los múltiples trazadores generados por una guía el que logra establecer la conexión, proviene generalmente de uno de los primeros objetos cuya distancia a la punta de la guía descendente llega a un valor tal

que el campo medio a través de esa distancia adquiere el valor crítico.

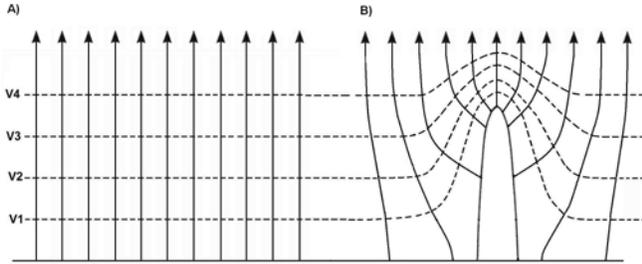


Fig. 2. A) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en terreno plano. B) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en presencia de un conductor en punta. Adaptado de MacGorman y Rust [8].

C. Distancia de Impacto r_s

Del proceso de enlace se desprende que el diseño del sistema captor de una protección se basa en la identificación de los lugares de la instalación a proteger capaces de emitir un trazador ascendente exitoso. El método de identificación se basa en el concepto de “distancia de impacto” (striking distance).

La distancia de impacto se define como la distancia entre la punta de la guía escalonada descendente y el punto de impacto en el momento en que el campo eléctrico medio entre esos dos puntos adquiere el valor crítico (500 kV/m) [6].

Alternativamente, la distancia de impacto se define como la distancia que hay entre la punta de la guía descendente y el objeto que recibirá el impacto en el momento en que comienza a desarrollarse el trazador ascendente exitoso desde ese objeto [2], [6].

De la definición se desprende que la distancia de impacto depende fuertemente de la carga eléctrica almacenada en la guía escalonada descendente, ya que es esta carga la que produce el campo eléctrico de valor tal que permite el inicio y desarrollo del trazador ascendente. Dicha carga es muy difícil de medir, y aún más difícil es determinar su distribución a lo largo del canal [6]. Por otra parte se dispone de datos sobre la corriente de pico de la primera descarga de retorno, que a su vez es uno de los parámetros fundamentales para el diseño de la protección. Esa corriente también depende de la carga en el canal, por lo tanto existe una relación entre la corriente de retorno y la distancia de impacto. Se han propuesto diversas formas para esta relación a partir de estudios teóricos, modelos, observaciones y datos experimentales. La expresión más usada es de la forma

$$r_s = AI^B \quad (1)$$

donde r_s es la distancia de impacto, I la corriente de pico de la primera descarga de retorno y A y b constantes. Se han propuesto distintos valores para A y b , muchos de ellos derivados de estudios de impactos sobre líneas de alta tensión. La norma de la CEI publicada en 2006 [5] toma los valores propuestos por un grupo de trabajo de la IEEE. La distancia de impacto se expresa entonces como

$$r_s = 10I^{0.65} \quad (2)$$

donde I es la corriente de pico en kiloampere y r_s la distancia de impacto en metros¹.

Esta expresión no toma en cuenta diferencias entre las formas de los objetos conectados a tierra capaces de generar un trazador ascendente. Como ya se señaló basta que presenten bordes o puntas que permitan el aumento del campo como para iniciar la descarga corona. Los detalles en escala menor que algunos centímetros no son relevantes en un modelo útil para las protecciones de estructuras.

Se han desarrollado expresiones más complejas para fines específicos, como líneas de transmisión de energía eléctrica. Los coeficientes varían ligeramente para la distancia de impacto a líneas, hilo de guardia y tierra [1].

D. Zonas de Atracción o Captura y Zonas de Protección. Esfera Rodante.

La distancia de impacto es entonces una herramienta adecuada para determinar las zonas expuestas de una estructura. Se elige su valor de acuerdo a la mínima corriente de pico para la cual se decide proteger la estructura y se determinan los puntos a los cuales la punta de la guía escalonada puede acercarse a esa distancia. La determinación se realiza mediante el llamado “método de la esfera rodante”. El método consiste en determinar qué zonas y puntos serían tocados por una esfera de radio r_s que rodara en todas direcciones sobre la instalación a proteger (figura 3). Los espacios y superficies no alcanzados por la esfera constituyen las “zonas de protección”. El centro de la esfera genera una superficie constituida por los puntos a los que podría llegar la punta de una guía para que se produzca un impacto a la instalación con la corriente de retorno correspondiente al valor de r_s elegido.

La superficie generada por el centro de la esfera cuando la misma está en contacto con la instalación a proteger es la “zona de atracción o captura” de dicha instalación.

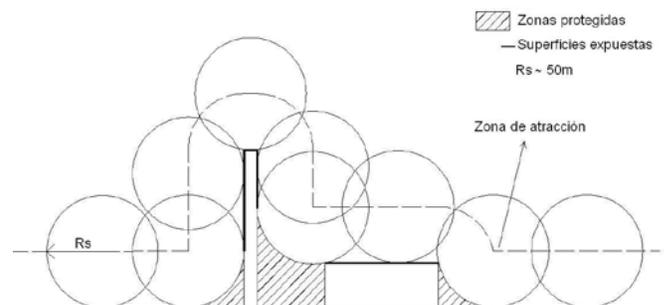


Fig. 3. Determinación de las zonas protegidas y las superficies expuestas mediante el método de la esfera rodante.

¹ Si bien la fórmula 2 es la adoptada por la norma CEI para la determinación de la distancia de impacto, cabe señalar que recientemente se ha propuesto otra fórmula $r_s = 1,9 \cdot I^{0,90}$ basada en una investigación sobre la distribución de carga a lo largo de la guía escalonada. Fue propuesta por Cooray, Rakov y Theethayi [10].

E. Diseño Convencional del Sistema Captor

Una vez determinadas las zonas de protección y las zonas expuestas se diseña el sistema captor. Se identifican los componentes naturales utilizables en las zonas expuestas, se agregan componentes adicionales en los lugares donde es necesario crear zonas de protección y se conecta todo a tierra en forma adecuada. Una vez realizado el diseño la esfera rodante solamente puede tocar elementos del sistema captor (figura 4). Las superficies lisas y planas como las paredes de edificios muy altos o el techo de edificios muy extensos se protegen mediante componentes naturales, cables de bajada utilizados como captosres y mallas de metal de dimensiones normalizadas adosadas a las superficies a proteger [5].

La norma NFPA780 establece una distancia de impacto de 45 m, correspondiente a un rayo de 10 kA. La estructura quedaría protegida contra rayos de más de 10 kA, que constituyen el 90% de las descargas a tierra. La norma CEI establece varios radios de acuerdo a una clasificación de niveles de protección. El mayor nivel de protección prevé un radio de la esfera de 20 m, correspondiente a un rayo de 3 kA. El 99% de los rayos tiene una corriente de pico mayor. (Tabla 1, adaptada de [1], [5]).

Un rayo de, digamos, 2 kA podría entonces impactar en zona protegida, pero con muy baja probabilidad y, por su baja magnitud, con consecuencias más leves.

Para las superficies planas se establece una correspondencia entre la malla de protección y el radio de la esfera. Aplicado estrictamente, el método de la esfera indica que el rayo podría impactar en la superficie protegida por la malla en los huecos dejados por la misma. En realidad la probabilidad de impacto de esas zonas es muy baja debido a su baja capacidad de generar aumento local del campo [2]. En todo caso los conductores de la malla cumplirían esa función. Aparentemente la relación entre las dimensiones de la malla y la distancia de impacto se fundamenta más en la experiencia que en la teoría [6].

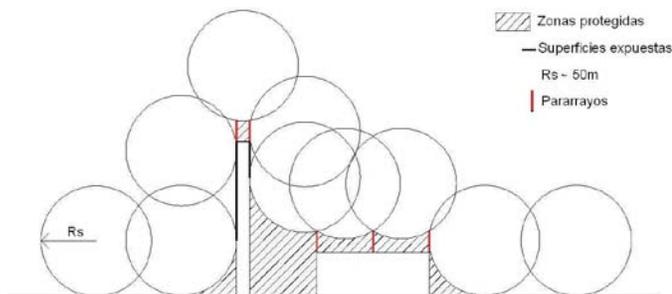


Fig. 4. Protección mediante pararrayos. En la estructura alta los pararrayos sólo protegen el extremo superior, su superficie lateral debe ser protegida de otra manera.

TABLA I

NIVELES DE PROTECCIÓN ESTABLECIDOS EN LA NORMA CEI 62305 – 3 INCLUYENDO DIMENSIONES DE LA ESFERA RODANTE, CORRIENTE MÍNIMA DE PICO, DIMENSIONES DE LA MALLA DE PROTECCIÓN DE SUPERFICIES PLANAS Y PROBABILIDAD DE INTERCEPCIÓN DE RAYOS. ADAPTADO DE [1], [5].

Nivel de Protección	Dist. Impacto/ Radio Esfera (m)	Corriente de pico Norma CEI (kA)	Tamaño de la malla para sup. planas (m)	Probabilidad de intercepción del rayo (%)
I	20	2,9	5 x 5	99
II	30	5,4	10 x 10	97
III	45	10,1	15 x 15	91
IV	60	15,7	20 x 20	84

IV. SISTEMAS NO CONVENCIONALES. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta las características del fenómeno y de la protección convencional se analizarán sistemas de protección que hemos llamado no convencionales.

Esos sistemas están comprendidos en una de dos clases [6], [11].

Una clase agrupa esquemas de protección cuyo objetivo es evitar la formación del rayo sobre la estructura modificando las condiciones eléctricas de la nube o de la guía escalonada funcionando como “Eliminadores de rayos”. Estos sistemas han sido comercializados bajo el nombre DAS (Dissipation Array System - Sistema de disipación) y últimamente como CTS (Charge Transfer System – sistema de transferencia de carga).

La otra clase se basa en captosres tipo pararrayos verticales pero equipados con un dispositivo en la punta destinado a aumentar significativamente el área de protección generada en comparación con la que se establece al aplicar el método de la esfera rodante a un pararrayos vertical convencional. Se los conoce como dispositivos ESE (Early Streamer Emission – emisión temprana de trazador). En español se les llama PDC (Pararrayos con Dispositivo de Cebado). A veces aparece la sigla en francés PDA (Paratonnerres à Dispositif d’Amorçage) ya que la mayor parte de estos dispositivos se ha desarrollado en Francia.

Ambas propuestas resultan naturalmente atractivas para el responsable del diseño de la instalación. En particular los dispositivos ESE permitirían proteger una instalación mediante unos pocos pararrayos de baja altura, simplificando el estudio y el diseño de la protección, particularmente en estructuras complejas ya existentes y no protegidas. En lo que sigue se presenta para ambas clases el funcionamiento pretendido, una síntesis del análisis de la teoría, y resultados de estudios, experimentos y observaciones realizados por usuarios y por la comunidad científica internacional.

V. SISTEMAS DE DISIPACIÓN O DE TRANSFERENCIA DE CARGA (SISTEMAS CTS – “CHARGE TRANSFER SYSTEMS”)

Con estos dispositivos se intenta cambiar las condiciones eléctricas de la atmósfera sobre y en las proximidades de la zona a proteger de manera de evitar el rayo o por lo menos reducir la probabilidad de su formación. Las descripciones de su funcionamiento dadas por los fabricantes se basan en el efecto corona ya mencionado que se produce en irregularidades del terreno y estructuras bajo un campo eléctrico como el que se produce bajo una nube durante una tormenta eléctrica, y en la correspondiente emisión o absorción de cargas por parte de objetos en punta sometidos a dicho campo eléctrico. Su construcción emplea conductores de bajo diámetro, del orden de algunos milímetros, cuyo extremo puede considerarse una punta. Estos conductores son comunes a todas las construcciones propuestas, y de aquí en adelante nos referiremos a esos conductores como “puntas”.

A. Descargas en Puntas (*Point Discharge*) o Efecto Corona

Se entiende por efecto corona o descarga en puntas [8], [12] una descarga eléctrica debida a la ionización del aire en una punta o lugar en que un campo eléctrico existente está fuertemente intensificado en forma local por factores geométricos. Su intensidad es menor que la de una chispa eléctrica y puede mantenerse en estado aproximadamente estacionario confinada en un volumen alrededor de la punta.

Si en un campo eléctrico uniforme sobre un plano conductor colocamos una punta conductora conectada al plano, se produce un aumento de la intensidad del campo en la punta debido a que la dirección del campo debe ser perpendicular al conductor.

La representación de la magnitud del campo eléctrico por la densidad de líneas de fuerza permite visualizar su intensificación en la punta y la dependencia de dicha intensificación de la curvatura de la punta (figura 2). Si la intensificación es suficiente el campo actúa sobre electrones libres (siempre presentes debido a rayos cósmicos y radiactividad natural) acelerándolos de manera que adquieran suficiente energía cinética como para ionizar la molécula o partícula atmosférica con la que choquen. De esa forma se generan nuevos iones que son acelerados produciéndose un efecto de avalancha. Si la punta y el plano están cargados positivamente (lo usual durante una tormenta eléctrica) parte de los electrones generados fluirán hacia la punta produciendo una corriente al plano -que puede ser la tierra- y los iones positivos se alejarán de la punta. Los iones positivos forman una carga espacial que hace disminuir el campo eléctrico alrededor de la punta, inhibiendo la formación de nuevos iones. Se puede llegar entonces a un estado estacionario definido por un volumen en el que se produce la descarga corona, una corriente que fluye por el conductor en punta y por la velocidad de recombinación de las moléculas ionizadas. El volumen y la corriente dependen del campo original en ausencia de la punta en la zona circundante. Si este campo aumenta, por ejemplo en una tormenta eléctrica con la aproximación de una guía descendente, la descarga corona

pierde su condición estacionaria y puede convertirse en un trazador ascendente y eventualmente formar un rayo de retorno. Los fuegos de San Telmo (St Elmo’s fire) son una forma de corona producida en mástiles durante una tormenta eléctrica.

El fenómeno puede ser alterado en alguna medida por el viento que arrastra los iones.

La emisión de cargas por puntas bajo la acción del campo eléctrico atmosférico fue descrita por Franklin ya en 1749, antes de la invención del pararrayos [13].

B. Estructura de un CTS y Acción Buscada

La idea básica detrás de los CTS es la utilización de las cargas eléctricas que salen de conductores en punta en el campo eléctrico en condiciones de tormenta. Se intenta formar una carga espacial de características tales que la hagan capaz de modificar las condiciones eléctricas de la atmósfera al punto de impedir la formación de un rayo entre la nube y la estructura a proteger. Se parte de la suposición de que esto es posible si el sistema CTS libera una cantidad suficientemente grande de carga eléctrica por unidad de tiempo, mediante un dispositivo provisto de una cantidad adecuada de puntas, ubicado sobre el área a proteger y conectado a una toma de tierra de muy baja impedancia y de distribución especial.

En los últimos años han aparecido otras propuestas, como dispositivos sin puntas que generan supuestamente iones en su interior y los liberan a la atmósfera, o aparatos “semiconductores” que pretenden limitar la corriente del rayo [14]. Al momento no se dispone de material con argumentación sobre el funcionamiento de estos dos últimos tipos, solamente material comercial [15]. Por lo tanto el presente documento tratará solamente los sistemas basados en emisión desde puntas, por ser los más difundidos y estudiados. En realidad las conclusiones pueden extenderse a cualquier otro mecanismo de emisión de cargas a la atmósfera.

C. Antecedentes

El análisis de de los mecanismos de funcionamiento propuestos requiere una presentación histórica, ya que los mismos han ido cambiando al ritmo de consecutivas refutaciones provenientes tanto de la comunidad científica como de la evidencia experimental y de la operación real.

El primero en especular con la posibilidad de impedir el rayo mediante la emisión - absorción de cargas en una punta conductora fue el propio Franklin, en 1752. Su idea original para la protección contra rayos consistía en la “descarga silenciosa de la nube” mediante la corriente de un conductor terminado en punta hacia arriba y enterrado en tierra en el otro extremo [1]. Más adelante sostuvo el doble funcionamiento para su pararrayos; si no podía prevenir el rayo, suministraba un punto preferente de impacto y conducía la corriente a tierra en forma segura. Ya en 1753 Lomonosov sugería que ésta última era la forma en que el pararrayos realmente funcionaba [1] lo que después fue corroborado con múltiples

observaciones al difundirse rápidamente la aplicación del dispositivo.

En 1754, mientras Franklin estaba experimentando, surge la primera propuesta de uso de múltiples puntas para generar carga suficiente como para neutralizar la nube e impedir el rayo. El checo Procop Divisch construyó una “Máquina meteorológica”. Las descripciones [6], [11] hacen referencia a una estructura con de 216 puntas puestas a tierra instaladas en un marco de madera a 7.4 m de altura. Más tarde, en 1775, el físico alemán Lichtenberg - conocido por las llamadas “figuras de Lichtenberg” en las cuales se basó una de las primeras formas de estimar la corriente de un rayo - propuso impedir la caída de rayos sobre una casa colocando un hilo de guardia de alambre de púas [1]. El hilo de guardia como pararrayos había sido propuesto en esa época por Franklin. La experiencia fue mostrando que la eficacia de la protección residía en el funcionamiento de la punta del pararrayos como punto preferencial de impacto desde donde se podía conducir la corriente a tierra en forma controlada. Los esfuerzos entonces se concentraron en la determinación de las áreas de protección del pararrayos convencional, tarea en la cual participaron conocidos físicos del siglo XIX como Gay-Lussac en 1823 [1].

El hito siguiente en los esfuerzos por impedir el rayo lo constituye la patente que en 1918 registró Nikola Tesla, considerado en Estados Unidos como el padre de la corriente alterna polifásica [16]. Según la patente de Tesla las medidas habían probado que la carga liberada por muchas puntas era insignificante comparada con la carga inducida en el terreno por la tormenta eléctrica y que las puntas “Franklin” provocaban una ionización que favorecía la formación del rayo. La propuesta de Tesla (figura 5) consistía en un dispositivo en forma de sombrilla, que por su forma no intensificaba el campo en sus proximidades y por lo tanto hacía más difícil la ionización previa a la formación de una guía ascendente. Una estructura cubierta por esas sombrillas no presentaría ante el rayo puntos para la formación preferencial de la guía ascendente ya que los bordes y puntas estarían cubiertos, y por lo tanto disminuiría la probabilidad de su formación. En caso de formarse el rayo el dispositivo funcionaría como una protección convencional. Si bien su implementación práctica es muy difícil por razones mecánicas e incluso estéticas, esta propuesta tiene interés por su relación con el funcionamiento efectivo de los dispositivos actuales, como se verá.

En 1930 se otorgó a J. M. Cage, de Los Ángeles, una patente para un sistema compuesto por alambres con puntas suspendidos de una torre de acero, destinado a proteger tanques de petróleo.

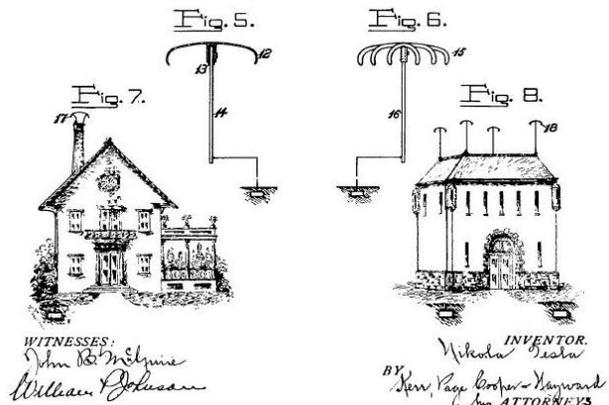


Fig. 5. Dibujos de Tesla tomados de su patente “Lightning Protector”, N° 1,266,175. 14 de Mayo 1918.

D. Sistemas Comercializados Actualmente

Es a partir de 1971 que los sistemas destinados a prevenir o impedir los rayos empiezan a ser fabricados y comercializados. Los nombres genéricos han ido cambiando, siendo los más usuales Sistemas Disipativos (DAS – Dissipative Array Systems) primero y Sistemas de Transferencia de Carga (CTS – Charge transfer Systems) en la actualidad.

El desarrollo, la fabricación y comercialización han sido realizados por prácticamente una sola empresa llamada “Lightning Eliminators and Consultants” (LEC), que comenzó sus actividades en 1971. Si bien han surgido otras empresas la situación de predominio subsiste, y su cofundador y responsable, R. B. Carpenter, fue el referente en la defensa del sistema y en la búsqueda de su justificación teórica y reconocimiento como protección efectiva. LEC está representada en el comité técnico de la norma NFPA 780, que trata de la instalación de sistemas de protección convencionales [4].

La figura 6 muestra la estructura de un dispositivo de transferencia de carga típico.

Se compone de tres elementos básicos [6], [17], [18]:

El “ionizador” o “disipador” que consiste en una armazón en forma de paraguas, usualmente de algunos metros de diámetro y envuelta en alambre con puntas, que se instala en una torre por encima de la estructura a proteger. Las dimensiones varían. Una estructura típica, como la usada por la NASA en uno de sus ensayos [17] puede tener 6 m de diámetro y 300 m de alambre con puntas (4 cada 7 cm) de 2 cm de largo. Otras implementaciones usan puntas más espaciadas y más largas.

El “colector de corriente o carga de tierra”, un conductor que rodea la zona a proteger y que conecta electrodos de puesta a tierra dispuestos en cerco cada 10 m aproximadamente, formando un sistema de puesta a tierra de muy baja impedancia. En terrenos de alta resistividad los fabricantes recomiendan electrodos químicos.

Los “conductores de servicio” que conectan el ionizador al sistema de tierras.

Además del conjunto de elementos mencionados, que eléctricamente no difiere de una buena instalación convencional, se recomienda la instalación de supresores de sobretensiones en los conductores eléctricos vinculados al equipamiento a proteger.

La figura 7 muestra una instalación típica. Otro tipo de ionizador es el esférico (figuras 8 y 9) o en forma de plumero (figura 10). De menores dimensiones y número de puntas, son comercializados como soluciones híbridas que “eliminan la mayoría de los rayos y capturan los restantes” [17]. Otras empresas han presentado distintas implementaciones, con ionizadores cilíndricos o en forma de anillo con las puntas dispuestas radialmente, así como líneas de guardia o riostras de torres con puntas, en definitiva iguales a la propuesta de Lichtenberg de 1775.

El funcionamiento pretendido del sistema se muestra en la figura 11. Debajo de una nube de tormenta cargada negativamente en su base, la tierra adquiere una carga positiva superficial, y el campo eléctrico es de algunos kilovoltios por metro, intensificándose en las irregularidades de las cuales puede partir un líder ascendente si el campo se intensifica ante las presencia de una guía escalonada.

La idea es que, al colocar el CTS, las puntas del ionizador bajo efecto del campo eléctrico generan por efecto de descarga en punta iones cargados positivamente, que forman una nube de carga espacial positiva de magnitud tal -en carga y extensión- que es capaz de interactuar con la nube o las descargas impidiendo la formación del rayo. De paso se afirma [6], [18], [19] que esa carga proviene de la zona “protegida” que queda dentro del colector de corriente o carga, que queda debajo de la nube de carga positiva, con carga superficial despreciable. Una zona de esas características no sería capaz de iniciar un trazador ascendente y estaría por lo tanto protegida.

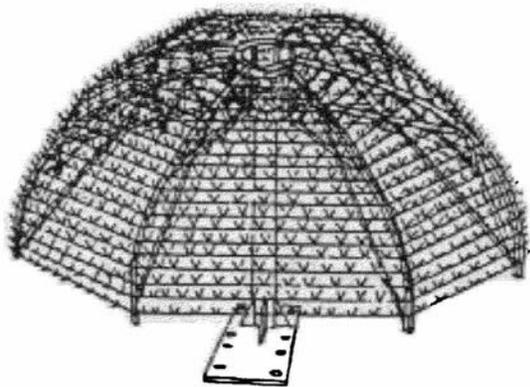


Fig. 6. Disipador en forma de paraguas. Cortesía de Mousa [17].



Fig. 7. Disipador en forma de paraguas para protección de una instalación de gas. Cortesía de Hartono [14].

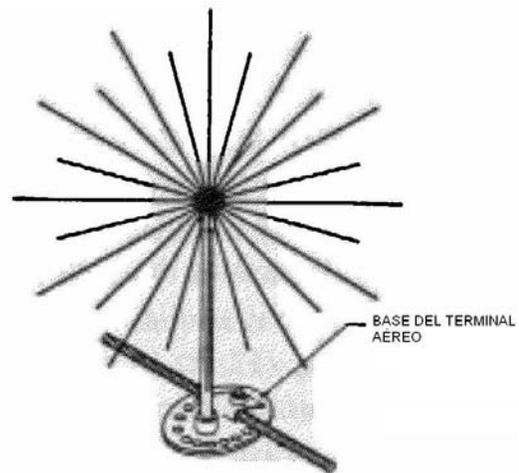


Fig. 8. Disipador esférico. Cortesía de Mousa [17].



Fig. 9. Disipadores esféricos. Cortesía de Hartono [14].



Fig. 10. Limitadores de corriente en una refinería. Cortesía de Hartono [14].

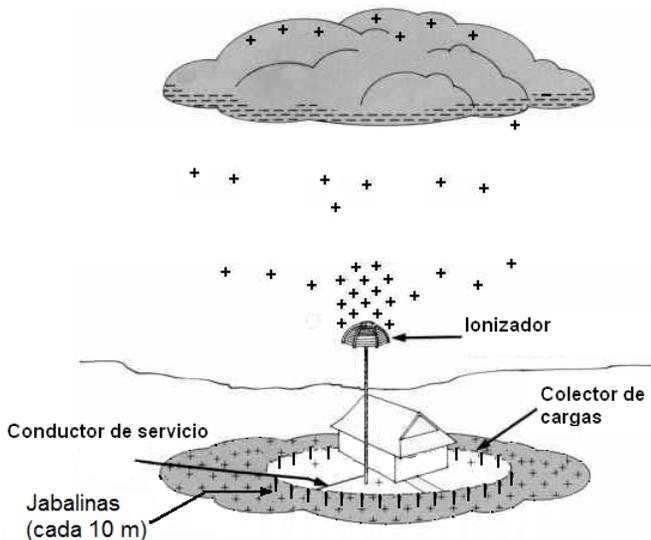


Fig. 11. Funcionamiento pretendido de un CTS. Adaptado de Zipse 1994 [18].

E. Teorías de Funcionamiento

Las teorías o más bien conjeturas propuestas del mecanismo de protección están basadas en la magnitud esperable de la carga liberada y en el carácter de la interacción de esa carga con los demás actores de la descarga atmosférica. Las propuestas varían, se mezclan con argumentos de venta destinados al cliente no informado sobre electricidad atmosférica, y en su mayor parte carecen de base cuantitativa, justificada o no [1], [6], [20]. En lo que sigue se presentan las teorías más significativas, siguiendo su evolución histórica.

1) Descarga de la Nube

El primer mecanismo de acción sugerido fue el de la descarga de la nube. Los iones positivos generados por las puntas neutralizarían la carga negativa de la nube en proporción suficiente como para impedir la formación de un rayo sobre la zona protegida. Por supuesto que esto implica que los iones son capaces de llegar en cantidad y velocidad adecuada a la nube, lo cual implica que decenas de Coulombs de carga deben subir varios kilómetros en menos de 10 s, que es el tiempo estimado de reconstitución de la carga en la célula

de tormenta eléctrica. La disponibilidad de iones está limitada por la intensidad de descarga de las puntas. Para explicar este mecanismo, esta intensidad se asumió como del orden de $40 \mu\text{A}$.

Aún admitiendo este valor, y admitiendo además que la corriente de un sistema de puntas es la suma de las corrientes de las puntas individuales, cosa que como se verá no es cierta, se llegaría a una generación de $0,6 \text{ C/s}$ por parte del ionizador descrito [17]. Estos iones positivos generados por las puntas no son electrones, sino moléculas de aire y partículas pesadas que se han cargado al perder electrones hacia las puntas por efecto del campo y tienen por lo tanto movilidad mucho más baja que los electrones, estimándose su velocidad en el orden de 10 m/s [21]. Una nube de tormenta puede generar en un minuto varias descargas de decenas de Coulombs, que duran unos 100 ms cada una y se extienden varios kilómetros. En ese tiempo el ionizador teóricamente lograría generar 36 C extendidos unos 600 m en ausencia total de viento. Aún este cálculo realizado con valores exageradamente optimistas muestra la imposibilidad de neutralizar ni siquiera parte de la carga de la nube.

La carga emitida realmente es mucho menor, y los propios defensores de estos sistemas han ya admitido hace tiempo la imposibilidad de que la misma afecte la nube [22].

2) Apantallamiento por Carga Espacial Generada

Esta explicación del modo de operación se basa en que, si bien las cargas no llegan a la nube, son efectivamente generadas por las puntas formando una carga espacial sobre la zona a proteger (figura 11) Dicha zona, presentada como la zona delimitada por el sistema de tierras llamado colector de carga, quedaría libre de cargas positivas inducidas por la nube. Adicionalmente la carga espacial generada formaría una pantalla protectora que actuaría como una "jaula de Faraday" según artículo de Carpenter et al. [20]. En esta referencia no hay argumentos cuantitativos asociados con esta explicación.

Habría dos mecanismos de protección derivados de este modo de operación.

El primero está relacionado con la ausencia de cargas positivas en la zona protegida, retiradas por el colector. El campo eléctrico entonces sería demasiado bajo como para que de los objetos de esa zona se pueda iniciar un trazador ascendente que vaya al encuentro de una guía descendente para formar el rayo. El rayo se formaría entonces con un trazador iniciado desde fuera de la zona. Este presunto mecanismo parece ser la justificación de los argumentos de los vendedores a fines de la década del 90. Entonces afirmaban que no se podía impedir el rayo pero sí que cayera en la zona protegida (protección más bien poco solidaria con los vecinos...).

Si se compara la conductividad del aire con la de la tierra se ve que la capacidad de suministrar cargas positivas de la tierra es mucho mayor que la capacidad de disiparlas de las puntas [23] por acción del campo. La zona vacía de cargas por acción del colector carece de toda base física, ya que toda la zona es el mismo conductor.

El segundo está relacionado con la carga espacial formada sobre la zona protegida con las cargas retiradas por el colector, zona que podría actuar como pantalla para que no se formen

nuevas cargas positivas en la tierra por inducción de la nube, lo cual no es sustentable dada la cantidad de carga positiva inducida en toda la región y la conductividad de la tierra.

Los árboles y hojas de pasto, a pesar de su baja conductividad, también generan descarga corona bajo la acción del campo eléctrico de una nube de tormenta, que muchas veces es visible [6], [18]. La corriente generada por los millones de agujas de un bosque de coníferas excede largamente la de un ionizador, sin lograr impedir los rayos, que incluso son responsables de la existencia de ciertas especies. Se ha observado que las semillas de sequoia gigante germinan en ceniza y no en pinocha, por ejemplo.

Medidas realizadas muestran que una palmera puede generar 4 veces más corriente corona que una punta metálica a una altura similar.

Se ha llegado a plantear la neutralización de la guía escalonada por parte de la carga espacial como mecanismo de protección. Como se le ha dado una cierta base cuantitativa e incluso se ha presentado como fundamento de un borrador de norma IEEE para CTS, que a su vez ha sido usado como argumento de venta, se trata este mecanismo con cierto detalle.

3) Neutralización de la Guía Escalonada Descendente

Esta explicación del modo de operación fue descrita por Zipse [22]. Se supone que el sistema CTS es capaz de crear una zona de carga espacial de magnitud suficiente como para atraer a la guía escalonada descendente, que generalmente es una carga negativa, y neutralizarla total o parcialmente. Se admite que no todas las guías pueden ser neutralizadas. En caso de formarse un rayo, éste se formaría con el ionizador, que entonces actuaría como una protección convencional.

La viabilidad de este modo de operación dependería de la cantidad de puntas del ionizador y de la corriente corona que es capaz de emitir cada punta.

Se asume además que el mínimo tiempo de reconstitución de la carga en la nube como para generar un nuevo rayo es de 10 s [1].

Según se desprende del artículo de Zipse y del borrador de la norma que se pretendió hacer aprobar con estos fundamentos, la idea básica es que el número de puntas del ionizador o disipador está dado por la expresión

$$N = \frac{k \cdot q}{I_p \cdot t} \quad (3)$$

donde N es el número de puntas requerido para el ionizador, I_p es la corriente corona que genera una punta en el campo eléctrico generado por una nube de tormenta, que puede estar entre 10 kV/m y 50 kV/m, t es el tiempo de regeneración de carga, los 10 s ya mencionados, q es la carga espacial necesaria para neutralizar la guía y k es una eficiencia no definida. En otras versiones la k no aparece [21].

El valor q se toma aparentemente igual a 5 C [6]. Zipse relaciona el valor q con la carga total de la nube mediante la fórmula

$$q = \frac{Q \cdot a}{A} \quad (3)$$

donde a es el área a proteger, A parece ser el área donde una celda de tormenta induce carga y Q la carga negativa de la nube.

El valor I_p que se toma para esta propuesta es del orden de 60 μ A [22].

Para disipar 5 C en 10 s se necesitaría (con $k=1$)

$$N = 5C / 60 \times 10^{-6} A / 10s \approx 8300 \text{ puntas}$$

Basándose en esta pretendida forma de operación Zipse [18], [22] presentó una solicitud de norma de CTS a la IEEE, quien la recibió para estudio con la denominación Draft IEEE P1576/02.01 2001.

La existencia de este borrador en trámite constituyó un nuevo argumento de venta, ya que la existencia de una norma sugiere legitimidad técnica.

Tanto la teoría de la emisión corona y temas afines como los datos experimentales muestran que no es posible neutralizar la guía escalonada descendente mediante estos dispositivos. Hay tres razones básicas [21], [24].

En primer lugar, la emisión de iones positivos por efecto corona en objetos con puntas o irregularidades salientes requiere un campo del orden de 1000 V/m. El campo a nivel del suelo originado por una nube de tormenta eléctrica alcanza valores típicos de 2000 a 10000 V/m [21], [22]. Como ya se dijo, los iones positivos son en general moléculas de aire ionizadas que se mueven mucho más lentamente que los electrones debido a las colisiones con otras moléculas siendo su velocidad típica de unos 10 m/s. Por lo tanto la emisión de iones por efecto del campo se mueve unos 100 m en los 10 s que en promedio tarda la carga eléctrica en una nube en recomponerse luego de una descarga. La eventual carga espacial generada por efecto corona en un sistema de puntas quedaría confinada en ese tiempo a una zona unos 100 m por encima del CTS. La carga emitida de esta forma reduce el campo eléctrico a nivel del suelo. Se puede hacer un cálculo del valor de una carga eléctrica positiva tal que desde una distancia de 100 m reduzca el campo eléctrico a nivel del CTS a un valor menor que 1000 V/m, valor necesario para iniciar la corriente corona. Si el campo eléctrico generado por la nube es de -5000 V/m el campo necesario es de 4000 V/m. Aplicando la fórmula del campo para una carga puntual se deduce que son necesarios solamente 4×10^{-3} C para que el efecto corona se inhiba fuertemente. Por lo tanto no es posible para el CTS emitir los 2.5 C que se dicen necesarios para neutralizar una guía escalonada, ya que su baja velocidad mantiene la carga confinada a distancias mucho menores que la recorrida por dicha guía [21]. El viento puede llevarse las cargas, pero ya no estarían para neutralizar la guía.

En segundo lugar, una punta en el campo eléctrico producido al nivel del suelo por una tormenta emite a lo sumo 10 μ A, 6 veces menos que lo supuesto por Zipse en el artículo en el cual justifica la presentación de su proyecto de norma para el uso de CTS [22].

En tercer lugar la fórmula (3) no es correcta, ya que la emisión producida por múltiples puntas próximas no es la suma de los valores de la emisión de cada punta como si estuviera sola. La emisión de cargas positivas por parte de una punta apantalla el campo negativo de la nube y hace que disminuya la cantidad de carga emitida por dicha punta y sus

puntas vecinas. Medidas realizadas, descritas en [21] muestran que un conjunto de 80 puntas emite una corriente corona del orden de 2 veces el valor de la corriente emitida por una punta aislada.

La aprobación del borrador de la norma PAR 1576 presentado por Zipse y otros fue descartada en 2004 por la comisión de la IEEE encargada de estudiarla debido a que los proponentes no presentaron la fundamentación física que habían prometido, consistente esencialmente en artículos de los autores de las referencias [25], [26].

4) Limitación de la Cantidad de Rayos Iniciados desde Estructuras y Eliminación Parcial de Rayos

En los últimos años la argumentación de los promotores y vendedores de CTS ha cambiado, fundamentalmente debido al acuerdo unánime de la comunidad científica internacional sobre la imposibilidad de evitar el impacto de un rayo mediante dispositivos generadores de carga. El principal vendedor (LEC) contrató científicos rusos especialistas en descargas eléctricas y física de plasma para elaborar una teoría científicamente sustentable sobre el funcionamiento de sus instalaciones. En base a los estudios realizados por estos científicos se admite ahora que las descargas pueden hacer impacto en estructuras protegidas por CTS pero se afirma que el número de impactos es mucho menor y que en todo caso el CTS es capaz de actuar como un pararrayos convencional conduciendo la corriente a tierra en forma segura. En particular se afirma que la generación de iones por parte del CTS genera una capa uniforme sobre el mismo que inhibe la formación de guías originadas desde la estructura (rayos iniciados desde abajo). Este tipo de protección tendría un efecto apreciable solamente en estructuras muy altas como edificios y torres de más de 200 m de altura, aproximadamente [26].

Estas conclusiones, que como se ve muestran ya una fuerte reducción en la pretensión de eliminar rayos mediante CTS, son incluso cuestionadas por otros investigadores. En particular Cooray [24] de la Universidad de Uppsala muestra que sería posible una reducción de la cantidad de rayos que pueden hacer impacto en un CTS sobre una torre a gran altura pero que esto se debe fundamentalmente a la forma geométrica del CTS (ionizador en forma de paraguas) que hace que la distancia de impacto r_s disminuya, y no a la presencia de ionización corona en las puntas. R_s tiene sin embargo un valor mínimo crítico dependiente de la carga en la guía escalonada e independiente del tamaño del "paraguas". Por lo tanto el dispositivo CTS es incapaz de evitar los impactos de descargas en el mismo. Si la disminución de r_s depende de la forma y no de la eventual generación de iones, queda claro que todas las otras formas de CTS que no sean el "paraguas" (hilos de guardia con puntas, disipadores esféricos, plumeros, etc.) son absolutamente inútiles.

La disminución de rayos ya sea por la forma o por los argumentos de los científicos que trabajan para los fabricantes (Aleksandrov y colaboradores) está restringida claramente a torres altas y se refiere exclusivamente a impactos sobre el propio protector. Se deduce por lo tanto que los CTS son totalmente inútiles para proteger estructuras no cubiertas por

los mismos. En particular Aleksandrov en [26] afirma que los sistemas CTS si reducen los rayos lo hacen solamente en su superficie y que no se puede afirmar que el área de protección pueda extenderse. Se trata entonces de un dispositivo que a lo sumo se protege a sí mismo y solo en cierta medida.

Es interesante observar entonces lo acertado de la conjetura de Tesla en 1918 sobre los mecanismos de inhibición de trazadores ascendentes mucho antes de que aparecieran los CTS ionizantes comerciales. Ver figura 5.

Cabe agregar un comentario sobre el funcionamiento como pararrayos convencional, funcionamiento previsto por los fabricantes al admitir que no todos los rayos son eliminados. Si el dispositivo tiene un r_s menor que el de otros objetos o partes de estructuras susceptibles de recibir rayos entonces funcionan como malos pararrayos ya que la zona de protección es menor que la de una punta Franklin común.

F. Resultados observados. Experimentos de Campo, Campañas de Observación y Registro de Eventos

Desde su introducción comercial en 1971 los dispositivos CTS que empezaron llamándose DAS (Dissipative Array System) se han estado instalando en distintos tipos de estructuras. Originalmente pensados para torres de comunicaciones, su uso se ha extendido a edificios, plantas industriales, líneas de transmisión, subestaciones, aeropuertos, etc. Los resultados de observaciones han mostrado múltiples impactos de rayos en instalaciones o estructuras protegidas por estos dispositivos. Es de particular interés señalar los casos que siguen.

La Nasa instaló dispositivos CTS para la protección en el centro espacial Kennedy en Florida para proteger los vehículos espaciales y sus instalaciones. Ya en 1975 se reportan repetidos impactos en las cuatro torres con CTS [13]. Actualmente la Nasa utiliza terminales convencionales e hilos de guardia para los mismos fines con resultados satisfactorios. Se ha utilizado también la iniciación artificial de rayos mediante cohetes que llevan un alambre aterrado.

En 1988 y 1989 la FAA (Federal Aviation Administration) realizó un estudio de la performance de dispositivos CTS instalándolos en lugar de dispositivos convencionales en tres aeropuertos de Florida. Se usaron dos tipos de instalaciones con sistemas de agujas, unos de forma toroidal y otros en forma de sombrilla. La FAA registró impactos en los sistemas CTS los cuales resultaron dañados [6], [27]. Los fabricantes objetaron estos experimentos entre otras cosas debido a que se habían utilizado los CTS con las puestas a tierra de los sistemas convencionales. De todas formas la FAA descartó el uso de DAS-CTS y reinstaló su protección convencional que ha probado ser efectiva.

En 1994 se presentó un estudio sobre descargas atmosféricas en una planta nuclear en Estados Unidos [6]. La planta había recibido tres impactos en dos años (1988 y 1989).

Luego de instalado un sistema DAS la planta recibió otros tres impactos en dos años.

En 1998 se presentó un estudio de torres de comunicaciones con sistemas DAS en Japón. Las torres estaban instrumentadas como para medir corrientes de rayos. Estas torres recibieron múltiples impactos antes y después de la instalación de los sistemas DAS mostrando una vez más que estos dispositivos son incapaces de impedir las descargas. Se reportó que los daños a los sistemas de comunicaciones asociados a estas torres disminuyeron lo cual se debe no a la ausencia de rayos sino a los sistemas de puesta a tierra y de supresión de transitorios que fueron instalados con el sistema [6].

Estos son algunos de los múltiples casos documentados de impactos a sistemas DAS-CTS que muestran por la vía de la experiencia que la pretensión de eliminación de descargas atmosféricas por parte de estos sistemas carece de fundamento.

El caso de las instalaciones de Federal Express en el aeropuerto de Memphis (Tennessee).

Los vendedores de sistemas CTS han basado largamente su argumentación en la existencia de muchos clientes satisfechos. En particular han tomado como bandera el aparente éxito de un sistema de CTS en las instalaciones de Federal Express en el aeropuerto de Memphis, Tennessee, USA [19]. Utilizando el sistema de detección de rayos en servicio en el área presentaron en 1999 un mapa mostrando los impactos registrados en el área de dicho aeropuerto. El mapa presentaba un "hueco", una zona donde no había registros de impactos que coincidía con el área pretendidamente protegida de Federal Express. Los registros válidos comprendían el período de 1996 a 1998. Este resultado fue presentado como una prueba de que los CTS efectivamente eliminaban los rayos. Los científicos que ponían en duda la efectividad de los CTS argumentaron que el período de medida era demasiado corto como para sacar conclusiones de ese tipo. También se presentaron otros argumentos. La controversia llegó a su fin con la publicación del trabajo de Krider en 2004 [28]. El mismo muestra un mapa de la distribución de descargas nube tierra en un área de 20 km por 20 km centrada en el aeropuerto de Memphis. Se muestra un registro de 4160 ocurridos entre 1997 y 1999 uniformemente distribuidos. No se registran huecos (zonas claramente sin rayos) en el área.

¿Muchos clientes satisfechos?

Los fabricantes muestran una lista de muchos clientes satisfechos como argumento para la efectividad de los sistemas CTS [6], [19], [25]. En relación a esto se debe señalar que estos clientes carecían de un sistema de protección antes de instalar estos sistemas. Junto con los dispositivos los vendedores instalan excelentes sistemas de tierra (que lo son con el pretexto de absorber cargas para disiparlas en el aire mediante el ionizador) y sistemas de supresión de transitorios. Tienen por lo tanto todas las características de un buen sistema convencional de protección contra descargas atmosféricas y por lo tanto ofrecen protección. La disminución de la distancia de impacto que se registra en algunos tipos no es apreciable si se coloca suficiente cantidad de ionizadores.

Se obtiene meramente protección convencional pero a un costo mucho más alto.

G. Funcionamiento del CTS como Protección Convencional

Un sistema CTS completo con sus terminales, sus bajadas, sus buenas puestas a tierra y sus protecciones complementarias parece constituir un buen sistema convencional y de hecho es de esta forma que proporciona protección, más allá de la eventual disminución de r_s . Sin embargo, se debe tener en cuenta que muchos dispositivos ionizadores están compuestos de conductores de sección muy inferior a la requerida en un captor para recibir una descarga sin sufrir daño, lo cual puede llevar a que un impacto dañe las puntas y las haga caer, constituyendo un riesgo para el sistema protegido y alrededores. También los hace vulnerables debido a la corrosión (ver puntas en los CTS en forma de sombrilla y en los que tienen forma de esfera o de plumero en las figuras 6 y 8).

Por otra parte se debe tener en cuenta que, aunque haya protección, una cosa es conocer el mecanismo por el cual la protección actúa, llevando la corriente de los rayos a tierra y suprimiendo los transitorios y otra muy distinta es creer que la ausencia de daños se debe a la falta de impactos ya que esto puede llevar a no darle la importancia que tiene el mantenimiento de las protecciones adicionales.

Si se tiene en cuenta esta consideración, lo que corresponde es realizar un diseño convencional tomando en cuenta todos sus aspectos. Un ejemplo interesante es el trabajo de Molina y Viggiano [29].

H. Resumen sobre Dispositivos CTS

Los sistemas de transferencia de carga o disipativos no son capaces ni de evitar los rayos ni de desviarlos de las estructuras o sistemas a proteger. No es posible ni neutralizar la nube ni la guía escalonada. La menor distancia de impacto que presentan ciertos dispositivos CTS se debe únicamente a su forma geométrica y no a la disipación de iones en el aire. En torres altas teóricamente se podría constatar una disminución de los rayos iniciados desde la estructura. Esto no ha sido confirmado por experiencias de campo ya que muchas torres de comunicaciones registran similar número de impactos antes y después de la instalación de dispositivos CTS. Incluso los científicos que han pretendido validar este sistema de protección han llegado a la conclusión de que la protección solo comprende el área de un CTS en forma de paraguas sin añadir protección a la estructura cercana. Esto confirma además que todos los otros sistemas de disipación mediante emisión de iones que no tienen esa forma son inútiles en todos los casos. El 80 % de los rayos son iniciados en la nube. El CTS es totalmente inefectivo frente a este tipo de rayos. Del 20 % restante solo una parte menor podría ser inhibida por un CTS.

VI. DISPOSITIVOS ESE (EARLY STREAMER EMISSION, EMISIÓN ADELANTADA DE TRAZADOR)

Son conocidos también como PDC (Pararrayo con Dispositivo de Cebado), PDA (Paratonnerre à Dispositif d'Amorçage) y también "pararrayos activos". Internacionalmente se los conoce como dispositivos ESE, y es esta sigla la que se usará en el presente texto.

Se ha creado solamente una norma relativa a su ensayo y empleo, la norma francesa NF C 17-102 de 1995. La norma española UNE 21186 es una traducción de la francesa con diferencias menores. La norma australiana-neozelandesa AS/NZS 1768 contiene un apéndice informativo sobre un método de cálculo de zonas protegidas basado en ESE. No es una norma en sí y no es considerada en este trabajo [14]. Hay referencias en información comercial de que en otros países (Argentina, Macedonia, Portugal, Rumania, Eslovaquia y Serbia) se han creado normas o reglamentos basados en la norma francesa original [30].

Los sistemas de protección basados en dispositivos ESE difieren de los convencionales en el uso de puntas verticales o pararrayos de características especiales pretendidamente capaces de generar un trazador ascendente antes, y por lo tanto significativamente más largo que una punta vertical convencional colocada en el mismo lugar y a la misma altura. Dicho trazador ascendente encontraría la guía escalonada a una distancia mayor, aumentando la zona de protección. De esta forma una única punta ESE sustituiría varias puntas convencionales, lo cual constituye la afirmación central de sus proponentes y el atractivo básico para su uso.

A. Funcionamiento de la protección basada en dispositivos ESE

Según sus proponentes y fabricantes el mecanismo de protección es el siguiente.

Al acercarse la guía escalonada, la punta del dispositivo ESE inicia el trazador ascendente un cierto tiempo Δt del orden de decenas de microsegundos antes de lo que lo haría la punta de una barra vertical común o punta Franklin ubicada en la misma posición. Se obtendría la "emisión temprana" a que hace referencia el nombre en inglés.

Esa afirmación implica que el trazador anticipado, que consiste en una descarga capaz de propagarse, se inicia y se propaga con un campo eléctrico significativamente menor que en el caso de la punta convencional u objeto emisor.

Se aduce además que esa ventaja temporal se traduce en una ventaja espacial o ganancia en longitud consistente en una distancia

$$\Delta L = v\Delta t \quad (5)$$

donde v es la velocidad pretendida de propagación del trazador ascendente generado, que se toma como de un valor medio de 1 m/ μ s, según lo consignado en la norma francesa citada [30] y en folletos de fabricantes [31].

La distancia de impacto al dispositivo ESE se toma entonces como $\Delta L + r_s$, siendo r_s la distancia de impacto convencional con valores según la tabla 1.

Una vez calculada la distancia de impacto al ESE se determina mediante el cálculo geométrico que sigue una "zona de protección".

Se considera un dispositivo ESE instalado en el extremo superior de un mástil vertical con su punta a una altura h sobre una superficie plana (figura 12). La zona de atracción o captura del plano es una recta horizontal a altura r_s , siendo r_s la distancia de impacto convencional estimada según la ecuación (2). La distancia de impacto supuesta para el ESE es $\Delta L + r_s$. Se concluye entonces que las guías descendentes cuyas puntas lleguen a una distancia $\Delta L + r_s$ del ESE antes que a una distancia r_s del piso generarán el trazador ascendente exitoso desde el ESE. Este criterio determina entonces una zona circular del piso con centro en el pie del mástil del ESE limitada por la proyección vertical I de los puntos P de altura r_s que distan $\Delta L + r_s$ de la punta A del ESE. (figura 12). Las descargas que se hubieran establecido contra el piso de esa zona se establecerían entonces contra el ESE. El radio de esa zona se denomina entonces radio de protección R_p y se calcula aplicando Pitágoras al triángulo ABP de la figura 12.

$$R_p^2 = (AB)^2 = (\Delta L + r_s)^2 - (r_s - h)^2 = v\Delta t$$

$$R_p = \left[(\Delta L + r_s)^2 - (r_s - h)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Haciendo cuentas se llega a la expresión que aparece en la norma francesa

$$R_p = \left[\Delta L (\Delta L + 2r_s) + h (r_s - h) \right]^{1/2} \quad (7)$$

De acuerdo al cálculo, la expresión (5) indicaría solamente el radio del área de suelo plano alrededor del ESE a altura h que estaría protegida por el mismo si las hipótesis sobre la distancia de impacto aumentada fueran correctas.

Sin embargo dicha expresión se utiliza además para determinar una "zona protegida" de carácter volumétrico [30, figura 2.2.3.1]. La construcción de esa zona se muestra en la figura 13.

La norma indica que la fórmula R_p es válida para $h \geq 5$ m. Para valores menores de h la superficie se completa mediante funciones lineales expresadas por curvas [30, figura 2.2.3.3 a) a c)].

Finalmente, los proponentes y fabricantes de ESE así como la norma afirman que cualquier objeto que quede dentro de la superficie de revolución así definida está protegido al mismo nivel que el establecido convencionalmente para la distancia de impacto adoptada para su cálculo. En esta afirmación se basa todo el método de protección mediante estos dispositivos.

Un elemento básico de la teoría es el valor de Δt . La norma establece el método que se describe a continuación para

medirlo de manera de determinar y comparar la efectividad de un ESE (figura 14).

Se instala a una distancia $h \geq 2$ m por encima de un piso plano metálico una superficie metálica paralela al piso de bordes redondeados hacia arriba y de dimensión mínima igual o mayor que h . Se instala en el medio una punta ESE a una distancia $d \geq 1$ m. Se bloquea el funcionamiento del dispositivo de manera que el ESE se comporte como una punta convencional.

Se aplica una tensión continua ente placa y piso tal que el campo esté entre 10 y 25 kV/m, en el entendido de que esos valores son representativos del medio eléctrico cerca de tierra bajo una nube de tormenta.

Se superpone una tensión de impulso tal que el tiempo de subida del campo esté entre 100 y 1000 μ s y que la pendiente en el instante inicial esté entre 2×10^8 y 2×10^9 V/m/s. Se mide el tiempo T_{PTS} desde el inicio del impulso al momento de la descarga entre la placa superior y la punta y se registra el valor E_{PTS} del campo en el momento de la descarga.

Luego se hace lo mismo con la punta activada, se mide el tiempo T_{PDA} y el campo correspondiente E_{PDA} . Si el dispositivo funciona estos valores deben ser menores que los anteriores. Los valores E_{PTS} y E_{PDA} se llevan a una curva de referencia dada por la norma, normalizada al campo máximo del impulso experimental, y que llega a dicho máximo en 650 μ s. De esa forma se determinan los tiempos deducidos T'_{PTS} y T'_{PDA} . Se determina la diferencia de tiempos $T'_{PTS} - T'_{PDA}$ en la onda de referencia correspondiente a la diferencia de campos (figura 15). Esta diferencia es tomada como la ventaja temporal Δt asociada al dispositivo ensayado.

Los subíndices empleados corresponden a las siglas en francés de pararrayos convencional (PTS) y pararrayos ESE (PDA).

El fabricante toma entonces este adelanto temporal Δt como característico de su dispositivo e incorpora a las especificaciones de su producto las áreas y volúmenes de protección calculados según lo descrito.

El adelanto medido de esta forma puede estar entre 20 y 100 μ s [32], lo que según la fórmula (7) puede dar, para una distancia de impacto convencional de 45 m (ver tabla 1) un radio de protección de 51 m a 135 m con un ESE con su punta a sólo 5 m de altura sobre la eventual superficie plana a proteger.

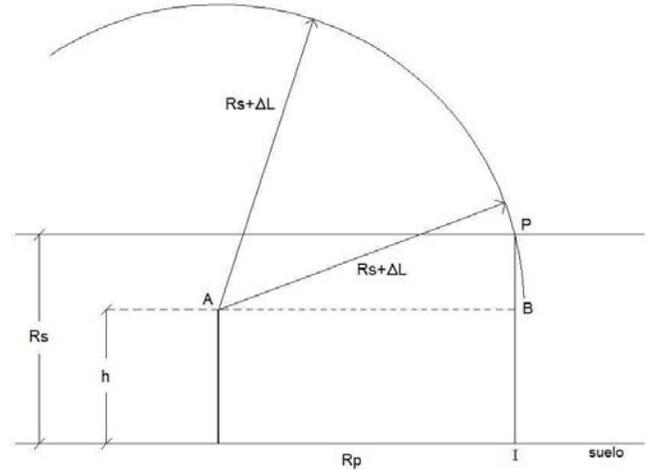


Fig. 12. Cálculo de la "zona de protección" de un ESE

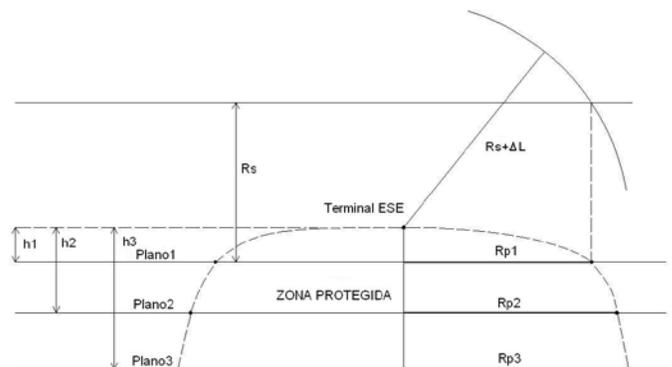


Fig. 13. Construcción de la zona espacial "protegida" de un ESE. $R_p = R_p(h)$ de acuerdo a la fórmula 7.

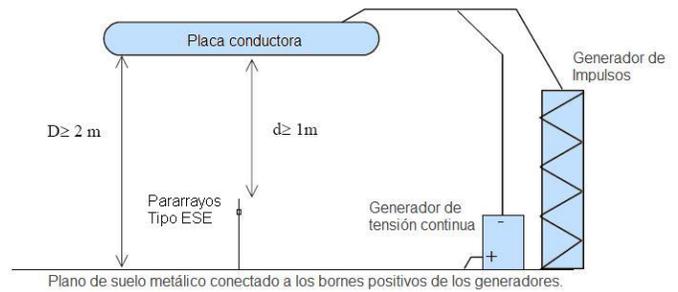


Fig. 14. Configuración de ensayo de un pararrayos tipo ESE en laboratorio.

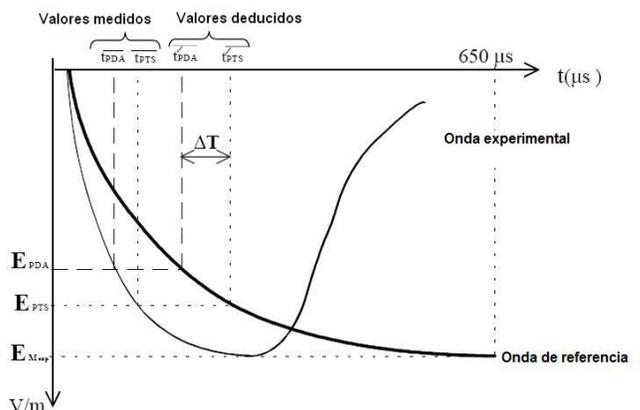


Fig. 15. Deducción del adelanto temporal Δt a partir de los resultados del ensayo según la figura 14.

B. Operación de los dispositivos ESE

El funcionamiento de los dispositivos ESE se basa en la creación, por algún medio, de una ionización del aire alrededor de su punta mucho mayor que la que se produce naturalmente en un captor vertical convencional en condiciones de campo eléctrico bajo una tormenta, de manera de crear condiciones para la emisión anticipada del trazador ascendente.

C. Pararrayos radiactivos

El primer medio utilizado para obtener un aumento de ionización fue la radiactividad. El físico húngaro Szillard planteó en 1914 por primera vez la posibilidad del aumento de la zona de atracción de un pararrayos agregando cerca de su punta una fuente radiactiva [6]. En su forma actual consiste en un vástago terminado en punta con un recinto en la proximidad de la misma que contiene un elemento radiactivo, normalmente radio o americio. (figura 16). Se han realizado numerosos experimentos para determinar la efectividad de estos dispositivos. Entre los más significativos se encuentran los realizados por Müller-Hillebrand en 1962 [9], [33], mostrando que en condiciones de tormenta la ionización producida por el campo eléctrico es la misma en una punta común y en un pararrayos radiactivo, y varios órdenes de magnitud mayor que la producida por la radiación propia de este último. El uso de pararrayos radiactivos está prohibido en muchos países, fundamentalmente debido al peligro potencial que implica el uso de una sustancia radiactiva en forma diseminada y sin mayor control. Sin embargo esta prohibición no es global y su empleo está muy difundido: desde 1930 hasta su prohibición en 1986 se instalaron sólo en Francia decenas de miles de pararrayos radiactivos [32].

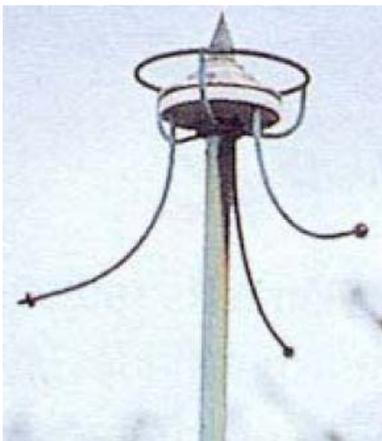


Fig. 16. Pararrayos radiactivo. Cortesía de P. Gruet [32].

D. Pararrayos activos (ESE) no radiactivos

Según un estudio realizado por un organismo dependiente del Ministerio de Desarrollo Territorial y Medio Ambiente de Francia [32] la prohibición de los pararrayos radiactivos en Francia estimuló el desarrollo de otros medios de producir el aumento de ionización buscado. Usualmente esta ionización se produce generando chispas en las proximidades de la punta del pararrayos. Existen por menos tres tipos de pararrayos activos no radiactivos: de disparo electrónico, piezoeléctricos y de perfil especial. Se indica el principio básico de su funcionamiento según [32].

Los dispositivos de disparo electrónico consisten en un generador de alta tensión que hace saltar una chispa entre dos electrodos. Esa chispa se traduce en la ionización del aire buscada. El generador es disparado por un dispositivo electrónico que incluye un detector de intensidad de campo eléctrico. Estos dispositivos necesitan energía eléctrica para su funcionamiento. Para su alimentación se han desarrollado distintos métodos. Algunos dispositivos usan una batería cargada por un panel solar. Otros utilizan el propio campo eléctrico ambiente creado por la nube de tormenta para cargar un condensador de almacenamiento de energía.

Los dispositivos piezoeléctricos se basan en que la parte superior del pararrayos descansa en equilibrio sobre una cerámica piezoeléctrica. El viento mueve la parte superior comprimiendo la cerámica y generando así impulsos de alta tensión que generan chispas en un punta auxiliar ubicada en una cámara de ionización dentro de la parte superior del pararrayos. Los iones suben a la punta del pararrayos aumentando la carga eléctrica en esa zona.

Los pararrayos de perfil especial consisten en un captor vertical conectado a tierra rodeado de elementos metálicos de formas especiales aislados de tal manera que tomen el potencial ambiente del aire. Su funcionamiento se basa en que al acercarse una guía descendente la tensión entre la parte a tierra y las partes aisladas (“antenas” o “captoreadores de energía”) aumenta a miles de voltios provocando chispas entre esas partes que contribuyen al aumento de la ionización.

Los principios de funcionamiento se ilustran en la figura 17. La figura 18, tomada de [14], [32] muestra ejemplos de pararrayos activos disponibles comercialmente.

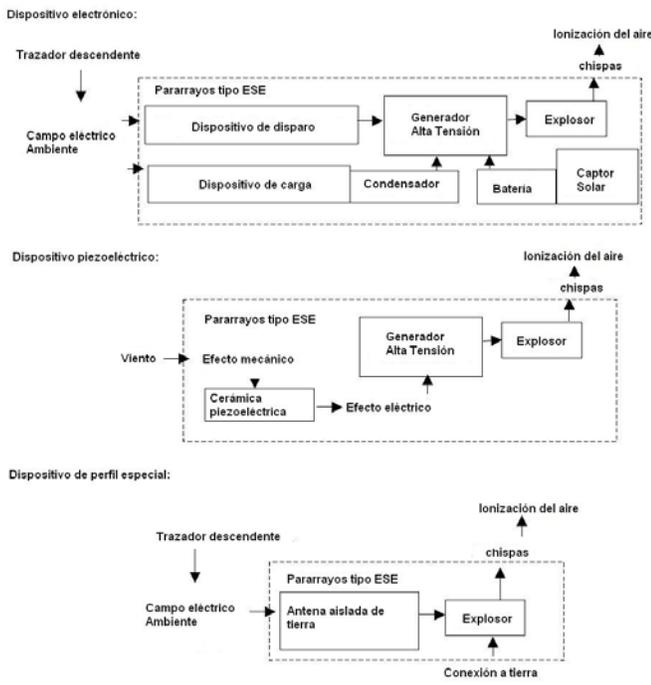


Fig. 17. Mecanismos de funcionamiento de distintos dispositivos ESE. Cortesía de P. Gruet [32].

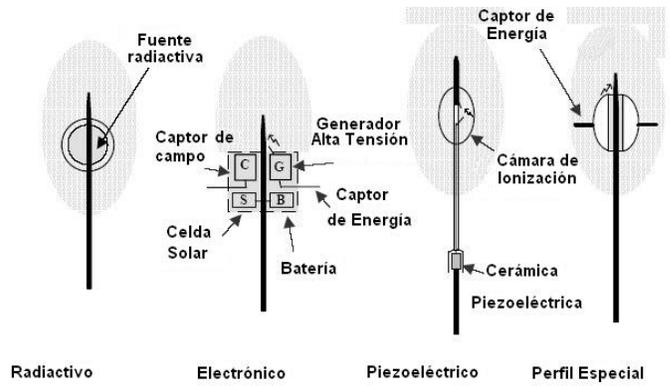


Fig. 19. Representación esquemática de distintos tipos de ESE. Cortesía de P. Gruet [32].

1) Efectividad de la protección basada en dispositivos ESE

Para este análisis debe tenerse en cuenta la validez de los argumentos físicos que sustentan este tipo de protección, las condiciones de medida y los valores reales de los parámetros utilizados, los métodos de cálculo, los resultados de experimentos relevantes de laboratorio y de campo y finalmente los resultados de campañas de observaciones de efectividad de protecciones en operación. Se debe tener en cuenta además los resultados de investigaciones realizadas por la comunidad científica internacional, las conclusiones de organismos de normalización y sus consecuencias técnicas e incluso legales.

2) La ventaja temporal Δt

Esta ventaja, base de todo el sistema, puede efectivamente medirse en las condiciones de ensayo de las figuras 14 y 15. Este ensayo sólo puede realizarse con los dispositivos radiactivos, de disparo electrónico o de perfil especial. Según [32] los dispositivos de perfil especial presentan los mayores valores. Es de hacer notar que muchos dispositivos ESE disponibles en el mercado no han sido ensayados [32]. Algunos, como los piezoeléctricos, no pueden ser ensayados bajo la norma.

La principal objeción a la ventaja temporal es que las condiciones de campo eléctrico en las que se realiza su medida (campo eléctrico transitorio pero espacialmente uniforme) difieren fuertemente de las condiciones reales reinantes en una tormenta, y ni siquiera son las más aproximadas a la realidad que se pueden obtener en laboratorio. Las condiciones creadas por la proximidad de la guía escalonada descendente son representadas con mejor aproximación por un campo entre puntas a la mayor distancia que permita un laboratorio que por un campo entre punta y plano a aproximadamente un metro de distancia [34]. En experimentos realizados generando descargas entre la punta de un pararrayos conectado al piso y la punta de un cable colgando del techo no se ha detectado diferencia entre un ESE y un pararrayos convencional. Como ejemplo de experimento de este tipo puede mencionarse el de C Buquegneau, de la Facultad politécnica de Mons, año 1985 [35]. Se instalaron dos pararrayos, un ESE y uno convencional, a la misma distancia de la punta de un cable colgante vertical. No se



Fig. 18. Ejemplos de pararrayos ESE disponibles comercialmente. Dispositivos A y D: Dispositivos eléctricos. Dispositivo B: Dispositivo de perfil especial. Dispositivo C: Dispositivo de perfil especial. Dispositivo E: Dispositivo de mecanismo no informado. Dispositivo F: Dispositivo piezoeléctrico. Cortesía de P. Gruet [32] y Hartono [14].

constataron diferencias significativas entre el número de descargas que impactaron al ESE y al pararrayos convencional.

Corresponde señalar que los resultados de experimentos y ensayos de laboratorio no pueden ser tomados como representativos de lo que sucede en el fenómeno a escala natural. En particular muchos investigadores (como Uman y Rakov de la Universidad de Florida) consideran que no es posible que con descargas de laboratorio se pueda simular el proceso de enlace del rayo natural [6].

3) *La velocidad del trazador ascendente y la ventaja espacial ΔL*

Las medidas de trazadores ascendentes naturales arrojan resultados que oscilan entre 1 y 30 cm/ μ s, con un valor medio del orden de 10 cm/ μ s [1], [8]. Probablemente las únicas medidas de velocidades de trazadores ascendentes naturales exitosos sean las de Yokohama et al., según [6], con valores entre 8 y 27 cm/ μ s. Admitiendo como ciertas todas las demás suposiciones sobre las cuales se basa el funcionamiento de los ESE, la velocidad adecuada a emplear para el cálculo ΔL parece ser no mayor a 2 cm/ μ s [2]. Estos valores son muy inferiores al de 1 metro por microsegundo que recomienda la norma. Aún suponiendo un Δt real de 100 μ s la ventaja espacial obtenida con velocidades de propagación reales es de 2 a 10 m, valores muy inferiores a los 100 m que implica el uso de la norma y por lo tanto irrelevantes en situaciones prácticas [6]. Las observaciones indican por lo tanto que un pararrayos ESE no ofrece ventaja significativa sobre el pararrayos vertical convencional [36].

4) *La propagación del trazador ascendente iniciado por el ESE*

El adelanto temporal implica que el trazador ascendente comienza a propagarse bajo la acción de un campo eléctrico entre el pararrayos y la punta de la guía escalonada de valor medio muy inferior al campo crítico necesario para iniciar un trazador desde una punta convencional. Según la norma, a un rayo potencial de 10 kA le correspondería, para un ESE de 100 μ s, una distancia de impacto de 145 m, tres veces mayor que en el caso convencional. Esto significaría que el trazador comienza a propagarse con un campo tres veces menor.

Una vez iniciado el trazador ascendente, para que se propague debe convertirse en un líder que vaya creando un camino conductor ascendente. Este fenómeno es completamente independiente del pararrayos, depende solamente de la intensidad del campo eléctrico y de las propiedades dieléctricas del aire [2], [14]. Por lo tanto, aunque el trazador se inicie con un campo más débil, es muy poco probable que empiece a propagarse hasta que el campo llegue a un valor que lo permita. Por lo tanto la ventaja temporal no se traducirá en una ventaja espacial, al retardarse la propagación. Esta es la conclusión del grupo de trabajo sobre descargas atmosféricas de CIGRE (Comisión Internacional de Grandes Redes Eléctricas) [36].

5) *La zona de protección del ESE y la norma francesa NF C 17-102*

Si se dejan de lado las objeciones sobre los adelantos temporales y espaciales y las condiciones de propagación del trazador ascendente, la fórmula (7) indica el área protegida en una superficie plana. Esa fórmula fue obtenida aplicando el método de la esfera rodante en forma convencional en una situación en que r_s es la distancia de impacto del suelo y $r_s + \Delta L$ la del ESE. La norma propone usar la misma expresión para generar una zona de protección volumétrica como se ha descrito.

La figura 20 muestra dicha zona dentro de la cual hay una estructura supuestamente protegida.

La figura 21 muestra un corte de la zona construida según la fórmula 7 y la figura 13, en la cual hay una estructura de techo AB supuestamente protegida. Si se aplica el método de la esfera rodante de la misma forma que la utilizada para deducir la expresión (5) se ve claramente que los puntos A y B no están protegidos por el ESE ya que estos puntos son capaces de emitir un trazador antes que el ESE con adelanto incluido. Se ve entonces que el volumen de revolución denominado zona protegida es una extrapolación totalmente incorrecta de la fórmula (7). La norma no toma en cuenta entonces todos los otros trazadores ascendentes que la estructura puede generar. La norma tiene por lo tanto un error geométrico básico que invalida sus resultados aún admitiendo sus propias suposiciones sobre el fenómeno físico. Cualquiera sean esas suposiciones, la norma es incorrecta en su punto fundamental.

Cabe señalar que la norma realiza otra afirmación peligrosa: Extiende la aplicabilidad de la zona de protección de los ESE a áreas de esparcimiento al aire libre (punto 1.1.1 de la norma francesa [30]), lo cual está en contra del consenso general de que durante una tormenta eléctrica no hay zonas abiertas en la cual no se corra riesgo de daño personal ni sistema de protección que elimine ese riesgo [37].

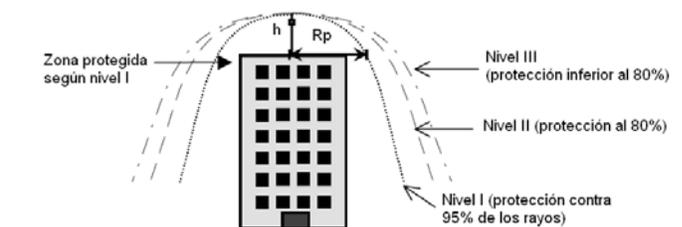


Fig. 20. Las curvas de la figura forman, girando alrededor del eje del pararrayos ESE, el volumen presuntamente protegido por el mismo. Cortesía de P. Gruet [32].

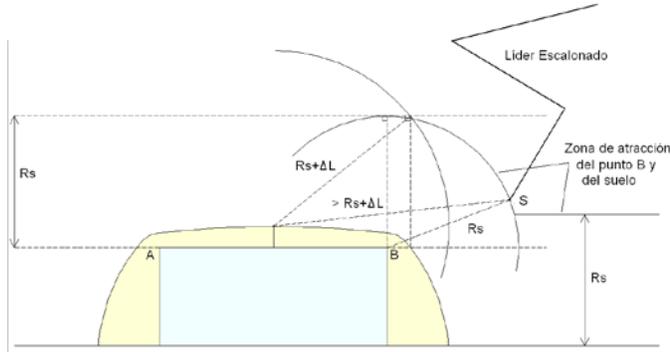


Fig. 21. Al llegar al punto S la punta de la guía escalonada se encuentra a una distancia r_s de B y a una distancia mayor a $r_s + \Delta L$ de la punta del ESE. Por lo tanto el rayo va a hacer impacto en la estructura a proteger, en el punto B que está dentro de la zona supuestamente de protección del ESE.

E. Experimentos de campo, campañas de observación y registro de eventos

Los resultados del análisis precedente, que muestra la carencia de fundamentos físicos para el funcionamiento pretendido de los ESE, han sido confirmados con rayos reales por experimentos y campañas de observaciones, así como por reiterados reportes de impactos sobre instalaciones con este tipo de equipos como protectores.

En el campo experimental, uno de los trabajos más relevantes es el de Moore et al. [3]. Moore y su equipo instaló un conjunto de pararrayos en una zona de Nuevo México en la que hay frecuentes tormentas eléctricas y registró impactos en los mismos. Los registros se realizaron durante 8 años culminando en el año 2000. El objetivo del experimento era comparar pararrayos de puntas afiladas comunes -puntas Franklin- con pararrayos con el extremo romo con distintos diámetros, pero incluyó varios pararrayos tipo ESE, radiactivos y no radiactivos. Todos los impactos sobre pararrayos se produjeron sobre puntas romas de diámetros 12,7 mm, 19 mm y 24 mm de diámetro. Ningún ESE logró captar rayos aunque los impactos (incluyendo uno en un árbol cercano) se produjeron claramente dentro de la zona pretendida de protección. Se constató además que tampoco hubo impactos sobre las puntas Franklin afiladas. Tampoco se constató diferencias entre las corrientes producidas por el campo eléctrico en las puntas Franklin y los ESE. La conclusión del estudio es que las puntas ESE y las Franklin se comportan en forma similar, siendo a su vez menos efectivas que las puntas romas. Según los autores, el aumento del campo eléctrico por efecto de la punta afilada decrece rápidamente con la distancia a la punta, con lo cual cualquier inicio de trazador ascendente entra rápidamente en una zona de campo demasiado bajo para su propagación. Los resultados concuerdan con las conclusiones de CIGRÉ ya citadas, en cuanto a la ineffectividad de producir ionización temprana si el campo no es lo suficientemente intenso como para sostener la propagación de un trazador.

La norma de Estados Unidos NFPA780 en su última versión (2004) incorpora las puntas romas aunque a un nivel equivalente a las afiladas tradicionales [4].

Una de las campañas de observaciones más significativas es la realizada por Hartono y Robiah en Kuala Lumpur y Shah Alam, Malaysia [38], [39]. Los autores aprovecharon dos circunstancias favorables en esas ciudades: Un gran número de pararrayos ESE instalados y un índice cerámico promedio de 250, quizás el más alto del mundo en zonas densamente pobladas y por lo menos 6 veces más alto que el de Uruguay. En esas condiciones fue posible en una campaña de unos 12 años registrar un número importante de impactos de rayos y estudiar su relación con los dispositivos ESE. Los autores tomaron fotografías de un cierto número de edificios importantes equipados con ESE antes y después de impactos de rayos. Los registros muestran daños en los edificios por impactos reiterados, no solamente en la discutible zona de protección indicada por los fabricantes sino incluso a distancias del orden de 10 m del mástil de estos dispositivos. Se registró un lapso medio de 2 años entre las fotografías antes y después de un impacto con daños. Es interesante destacar que en el estudio se incluyó el seguimiento de edificios con puntas Franklin tradicionales, constatándose daños en los mismos como consecuencia de una instalación incorrecta. Los impactos se produjeron en zonas claramente no protegidas según el criterio de la esfera rodante ya presentado en el punto 2. Lo mismo sucedió con los ESE, con lo cual se generó nueva evidencia tanto del comportamiento similar de puntas Franklin y ESE como de la validez del método aceptado por las normas internacionales para determinación de las áreas expuestas.

Existen además registros de eventos aislados en los cuales instalaciones de importancia con protección basada en ESE han sido dañadas durante tormentas eléctricas. El más conocido es el que causó la destrucción en 1976 de un monumento de Bernini en el Vaticano, supuestamente protegido por un pararrayos radiactivo [6]. Como eventos recientes documentados pueden citarse los daños en una refinera en Colombia en el 2000 [11], o la salida de servicio de una estación de radar para uso meteorológico un mes después de su puesta en servicio debido a 7 impactos en las instalaciones durante una tormenta en Turquía en febrero de 2004 [40].

F. Uso de los ESE en Estados Unidos: intentos de normalización y situación legal actual

La norma más difundida y aceptada en Estados Unidos es la NFPA780, elaborada y publicada por la National Fire Protection Association (NFPA), e incluye solamente la protección llamada convencional en este artículo. Por iniciativa de fabricantes de pararrayos ESE radiactivos y no radiactivos se elaboró un borrador de una norma para dispositivos ESE análoga a la norma francesa. La norma llevaría el nombre NFPA781. Un extenso estudio financiado por el Consejo de Normalización de la NFPA dio lugar a más de 300 informes y artículos, de los cuales el 99% llegaba a la conclusión de que los ESE no presentaban ventaja alguna sobre el pararrayos convencional [33]. La NFPA decidió entonces rechazar en primera instancia el borrador y no publicar normas sobre ESE debido a la falta de evidencia

sobre su presunta mayor eficacia y también a la falta de base científica para la misma.

Se inició así un proceso en el cual fabricantes de ESE trataron de revertir la situación. Entre otras acciones plantearon que la protección convencional según la norma NFPA780 tampoco tenía base científica. Los ataques llevaron a la NFPA en el año 2000 a considerar la suspensión de su actividad de normalización en el área, cosa que fue rechazada por la comunidad técnica y científica internacional [12], [41]. Finalmente la norma NFPA781 fue desechada en forma definitiva y en 2004 la NFPA publicó la nueva edición de la norma 780 actualmente vigente.

En 1996 y en conexión con estos hechos, los fabricantes de ESE Heary Bros, Lightning Preventor of America y Nacional Lightning Protection Corp. demandaron judicialmente a una asociación y a dos compañías (Lightning Protection Institute, Thompson Lightning Protection Inc., and East Coast Lightning Equipment, Inc.) por conspiración, falsa publicidad y difamación de producto en relación a la mejor performance de los pararrayos ESE frente a los convencionales.

En octubre de 2003 la Corte Federal de Arizona desechó la demanda y habilitó una contrademanda por parte de una de las compañías inicialmente llevadas a juicio [42].

El fallo final fue dado el 7 de octubre de 2005 [43], [44]. Según el mismo, considerando la documentación presentada, se prohíbe a los fabricantes de ESE anunciar y promover la venta de sus productos utilizando como argumento de venta que los mismos protegen un área mayor que la especificada en la norma NFPA780 para los pararrayos convencionales. Se les prohíbe además decir en su publicidad que los dispositivos ESE son aptos para protección de áreas abiertas tales como canchas de juego, parques de diversiones, campos de golf, estadios y similares. Cabe recordar que la norma francesa los avala para este uso.

VII. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo expuesto, no hay argumentos científicos ni evidencia experimental que sustente la posibilidad de evitar mediante un dispositivo CTS que un rayo haga impacto en una estructura si se dan las condiciones para el mismo. La carga emitida por el sistema típico en condiciones de tormenta es despreciable frente a la de una guía descendente. El registro de impactos en este tipo de instalaciones muestra que a lo sumo se puede confiar en ellas en calidad de captosres convencionales.

Tampoco hay evidencia de que un dispositivo de “cebado” tipo ESE o PDC pueda proteger un área mayor que una punta Franklin tradicional. Incluso objetos romos pero capaces de generar un aumento local de campo pueden ser tan o más efectivos en el momento de establecer una guía ascendente exitosa. Los argumentos en que se basa el funcionamiento de los ESE consisten en extrapolaciones de resultados de laboratorio que no son consistentes con las observaciones de los fenómenos a escala real. La velocidad del trazador ascendente es en realidad un orden de magnitud menor que la

supuesta. Además la ionización anticipada supone un trazador ascendente que se propaga por acción de un campo eléctrico menor que el necesario para que se produzca este fenómeno. A esto se agrega que la norma que pretende dar sustento formal a estos dispositivos propone una extrapolación de sus propias suposiciones totalmente errónea.

La protección contra descargas atmosféricas es ante todo un problema de seguridad, y debe ser por lo tanto basada en sistemas probados. La evidencia de la efectividad de los modelos electrogeométricos está avalada por abundante material experimental, entre el cual se destaca la experiencia con líneas de transmisión de energía eléctrica.

En cualquier caso, la efectividad de un sistema contra descargas atmosféricas no depende sólo del tipo y forma de los captosres -que además pueden ser parte de la estructura- sino de que sea concebido en forma integral, tomando en cuenta todos los aspectos: las bajadas, las puestas a tierra, las protecciones contra sobretensiones, la equipotencialidad, la educación del usuario y el mantenimiento posterior y de que además dicho sistema sea parte de la instalación a proteger desde el inicio del proyecto y construcción.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración, en forma de información actualizada, artículos, referencias y permisos de reproducción de material, recibida de R. Kithil, a través del National Lightning Safety Institute así como de A. Mousa, Z. A. Hartono, P. Gruet, J. Molina, E. P. Krider y A. Carranza

Agradecen además muy especialmente el trabajo realizado por la Ing. Andrea Pizzini, del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, quien tuvo a su cargo la edición del material y el procesamiento y elaboración de todas sus figuras.

IX. REFERENCIAS

- [1] Rakov, V. y Uman, M. "Lightning", 687 pp. Cambridge 2005, UK ISBN 0-521-58327-6.
- [2] Mackerras, D., Darveniza, M., Liew, A. C. "Review of Claimed Enhanced Lightning protection of Buildings by Early Streamer Emission Air Terminals" IEE Proc. -Sci. Meas. Technol. Vol 144. N° 1, Enero 1997.
- [3] Moore, C. B., Aulich, G. and Rison, W. "Responses of Lightning Rods to Nearby Lightning" International Conference on Lightning and Static Electricity, Aerospace Congress and Exhibiton, Seattle, USA, 10-14 de Setiembre, 2001.
- [4] National Fire Protection Association. "NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems" Edición 2004.
- [5] International Electrotechnical Commission. "International Standard CEI-IEC 62305-1. to 4 Protection Against Lightning" 2006.
- [6] Uman, M. and Rakov. "A Critical Review of Nonconventional Approaches to Lightning Protection". BAMS, American Meteorological Society, Diciembre 2002.
- [7] Feynman, R., Leighton, R., Sands, M. "The Feynman Lectures on Physics", Vol 2, Cap 9. "Electricity in the Atmosphere". Fondo Educativo Interamericano 1973, Addison Wesley 1963.
- [8] MacGorman, D., Rust, W. D. "The Electrical Nature of Storms" 422 pp Oxford Univ. Press, New York 1998 ISBN 0-19-507337-1.
- [9] Mackerras, D., Darveniza, M., Liew, A. C. "Standard and Non-standard Lightning Protection Methods" Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia - IE Aust.&IREE Aust. Vol 7 N° 2, Junio 1987.
- [10] Cooray, V., Rakov, V., Theethayi, N., "The lightning striking distance - Revisited", Journal of Electrostatics, Nr. 65 (2007) 296-306, www.sciencedirect.com.
- [11] Torres - Sánchez, H. "Puntas Franklin y Dispositivos No Convencionales de Protección Contra Rayos". Univ. Nal. de Colombia. Presentado en ALTAE 2003, San José, Costa Rica, Agosto 2003.
- [12] Report of the Federal Interagency Lightning Protection User Group. "The Basis of Conventional Lightning Protection Technology" Junio 2001.
- [13] Block, R. R., "Dissipation Arrays, Do they work?" Mobile Radio Technology, Abril 1988.
- [14] Hartono, Z. A., Robiah, I "Conventional and Unconventional Lightning terminals: An Overview" Forum on Lightning Protection Jaya, Malaysia, Enero, 2004.
- [15] Rodríguez Montes, A. "Pararrayos CTS y CEC, cómo funcionan, implantación y seguimiento", INT, Andorra, www.pararrayos.org.
- [16] Tesla, Nikola. "Lightning Protector" US Patent N° 1,266,175, 14 de Mayo, 1918.
- [17] Mousa A. "The Applicability of Lightning Elimination Devices to Substations and Power Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, vol 13, N° 4, Octubre 1998.
- [18] Zipse, Donald W., "Lightning Protection Systems, Advantages and Disadvantages" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30 N° 5, Setiembre / Octubre 1994.
- [19] Mousa A. "Validity of the Lightning Elimination Claim", Power Engineering Society General Meeting, Toronto, 13 - 17 de Julio, 2003.
- [20] Carpenter, R. y Auer, R., "Lightning and Surge Protection of Substations", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, Nr. , Enero - Febrero 1995.
- [21] Rison, William "There Is No Magic To Lightning Protection; Charge Transfer Systems Do Not Prevent Lightning Strikes". New Mexico Institute of Mining and Technology, Langmuir Laboratory for Atmospheric Research. Artículo para NLSI, www.lightningsafety.com. 2002.
- [22] Zipse, Donald W., "Lightning Protection Methods: An Update and a Discredited System Vindicated" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37 N° 2, Marzo - Abril 2001.
- [23] Rand, K. "Lightning Protection And Grounding Solutions For Communication Sites" 90pp. Polyphaser Inc. Material de Curso, 2000.
- [24] Cooray, V. and Zitnik, M., "On Attempts to Protect a Structure from Lightning Strikes by Enhanced Space Charge Generation", 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, 2004.
- [25] Aleksandrov, N. L., Carpenter R. B., Bazelyan, E. M., Drabkin, M. M. y Raizer, Yu. P. "The Effect of Coronae on Leader Initiation and Development under Thunderstorm Conditions and in long Air Gaps", J. Phys. D.: Appl.Phys.34 2001.
- [26] Aleksandrov, N. L., Bazelyan, E. M., Raizer, Yu. P., "The Effect of a Corona Discharge on a Lightning Attachment", Plasma Physics Reports, Vol. 31, No I, 2005.
- [27] Bishop D., "Lightning Devices undergo Tests at Florida Airports", Mobile Radio Technology Mayo, 1990.
- [28] Krider E. P. y Kehoe K. E., "On Quantifying the Exposure to Cloud-to-Ground Lightning", International Conference on Lightning Protection, Francia, Setiembre, 2004.
- [29] Molina, J., Viggiano, D., "Diseño y Adecuación de Sistemas de Protección Contra Rayos", CVIE, 2004.
- [30] Norme Française "Protection des structures et des zones ouvertes contre la foudre par paratonnerre á dispositif d'amorçage" Norme Francaise NF C 17-102, Julio, 1995.
- [31] Aplicaciones Tecnológicas S. A. Folleto del dispositivo Ion-Corona DAT-CONTROLLER. Folleto comercial.
- [32] Gruet, P. "Etude des Paratonnerres á Dispositif d'Amorçage" 89 pp, Laboratoire d'Evaluation des Equipements Electriques. Direction de la Certification. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, France, Octubre 2001.
- [33] McIvor, S., Carpenter, R., Drabkin, M. "Evaluation of Early Streamer Emission Air Terminals" ITEM 1998.
- [34] Liew Ah Choy "Principles of Lightning Protection", Material del curso "Lightning and Lightning Protection", National University of Singapore 1998.
- [35] Bouquegneau, C. "Laboratory Tests on Some Radioactive and Corona Lightning Rods - Faculté Polytechnique de Mons, Belgium" 18th International Conference on Lightning Protection ICLP, Munich, 16 - 20 de Setiembre, 1985.
- [36] CIGRE. Statement of CIGRE Working Group 33.01 "Lightning". CIGRE 95 SC 33 (WG 01)17 IWD 24 de Mayo, 1995.
- [37] National Lightning Safety Institute (NLSI) "Lightning Protection for Engineers" 216 pp. NLSI 2004. ISBN 0-9759001-0-2.
- [38] Hartono, Z. A., Robiah, I, "A Study of Non- Conventional Air Terminals and Stricken Points in a High Thunderstorm Region" 25th International Conference on Lightning Protection, ILCP, Rhodes, Greece, 18-22 de Setiembre 2000.
- [39] Hartono Z. A., I. Robiah, "A Long Term Study on the Performance of Early Streamer Emission Air Terminals in a High Keraunic Region", Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE 2003), Shah Alam, Malaysia, Agosto 2003.
- [40] Bülent Ozince, EE Turquía. "Lightning Protection on Radar Sites" Comunicación personal a NLSI y NOAA, 16 de Febrero 2004.
- [41] Pedersen, Aage ICLP. "Comments to NFPA's Proposal of Resigning from Issuing Lightning Standards". Recomendación a NFPA. 12 de Setiembre, 2000.
- [42] Pedersen, Aage. The result of a Court Case Concerning ESE Devices. 21 de Enero, 2004. Versión completa en: <http://www.azd.uscourts.gov/azd/courttopinions.nsf/Opinions%20by%20date?OpenView>
Fecha: 23-10-2003 - CV 96-2796 PHX ROS, Heary Bros. Lightning Protection Co., Inc., et al. vs. Lightning Protection Institute, et al.
- [43] United States District Court for the District of Arizona. "Heary Bros. Et al. Plaintiffs, vs National Fire Protection Association, Inc. et al., Defendants. No. CIV 96-2796 PHX/ROS. Injunction and Order Re: Heary Bros. Lightning Protection Inc., Lightning Preventor of America Inc. and National Lightning Protection Corp." Roslyn O. Silver, U.S. District Judge, 7 de Octubre, 2005.
- [44] United States District Court for the District of Arizona. "Heary Bros. Lightning Protection Inc.; Lightning Preventor of America Inc.; National Lightning Protection Corporation, Plaintiffs, vs National Fire Protection Association, Inc.; Lightning Protection Inst.; Allan P. Steffes; Thompson Lightning Protection Co., Inc.; East Coast Lightning Equipment, Inc., Defendants. No. CIV 96-2796 PHX/ROS. Judgment" Roslyn O. Silver, U.S. District Judge, 7 de Octubre, 2005.

X. BIOGRAFÍAS



María Simon es Ingeniera Industrial (opción Electrónica) de la Universidad de la República, desde 1980.

Es Profesora Titular de la Universidad de la República desde 1993, en el área de Telecomunicaciones. Es Ministra de Educación y Cultura desde marzo del 2008. Fue Presidenta de ANTEL desde marzo del 2005 a Febrero del 2008 y Decana de la Facultad de Ingeniería desde 1998, reelecta en 2002.

Dentro del área de las Telecomunicaciones, trabaja en Teoría de la Información, codificación de señales y redes de datos. Trabaja también en el estudio crítico de protección contra descargas atmosféricas, tema estrechamente vinculado a la operación de los sistemas de telecomunicaciones.

Ha publicado capítulos de libros, artículos en revistas y en memorias de congresos arbitrados, de los que es autora o coautora, en sus temas de trabajo. Ha expuesto en numerosos congresos, en algunas ocasiones en calidad de invitada.

Ha dirigido y dirige tesis de postgrado.

Participó en temas de políticas de desarrollo científico tecnológico desde la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad, desde el CONICYT y desde la Comisión de Postgrados de Ingeniería Eléctrica.

Ha recibido distinciones de la Asociación de Ingenieros del Uruguay y del Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica (IEEE, Sección Uruguay).

A través de su propio trabajo, así como del desempeño de los cargos de los que fue o es responsable, ha buscado fomentar la calidad académica y la imprescindible vinculación entre ciencias fundamentales y tecnologías, así como impulsar el rol de los profesionales, los estudios, la cultura y la producción nacionales.



César Briozzo obtuvo su título de M. Sc. en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Tecnológica Chalmers, en Göteborg, Suecia, en 1981, donde luego trabajó en el área de sistemas eléctricos para plantas de generación eólica y sistemas de evaluación de aerogeneradores en pequeña escala.

Desde 1992 es Profesor Titular del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de La Universidad de la República, Uruguay, actuando en la implementación de planes de estudio, enseñanza de medidas eléctricas y de electrónica de potencia y en investigación en energías alternativas. Es además responsable de la División Potencia de Controles S. A., donde ha trabajado desde 1985 en el diseño y fabricación de equipamiento de electrónica de potencia.

Sus áreas actuales de trabajo incluyen diseño de convertidores, electrónica de potencia aplicada a sistemas eléctricos de potencia, dispositivos semiconductores para conmutación de potencia y protección contra descargas atmosféricas.

Es además, junto con la Prof Simon, uno de los responsables de la creación y desarrollo del Programa de Postgrados en Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, actividad que lleva adelante desde 1996.